

Low cost instrumentation for water quality measurements in ocean environment

Treball Final de Grau



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Treball realitzat per:
Benjamí Calvillo Melero

Dirigit per:
Manel Grifoll
Jaume Puigagut

Grau en Enginyeria en Sistemes i Tecnologia naval

Barcelona, 7 de Juliol de 2022

Departament de Ciència i Enginyeria Nàutiques

Agraïments

El present treball es va realitzar als Laboratoris d'Enginyeria Ambiental de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona de la Universitat Politècnica de Catalunya, sota la direcció del Dr. Manel Grifoll i la codirecció del Dr. Jaume Puigagut. Voldria començar agraint l'oportunitat que em va brindar en Jaume a l'acceptar-me a la beca d'aprenentatge de la que va néixer aquest TFG, però sobretot per confiar en mi en tot moment i donar-me suport sempre que ho he necessitat. Em quedo amb tots els cafès, xerrades i consells, no hauria pogut tenir un "jefe" millor en la meua primera feina com a enginyer, et prometo que serè més metòdic i menys caòtic. Després voldria agrair al Manel que m'acceptes com al seu estudiant de TFG i que m'engresques no només a realitzar la beca sinó per descobrir-me una ciència diferent. Com a tutor has anat més enllà del TFG recomanant-me xerrades, articles, conferències, persones a part de donar-me altres tipus d'oportunitats. Les ganes per aprendre i fer coses noves i diferents és una cosa que s'enganxa i per això t'estic molt agraït.

Com ja he dit aquest treball es va realitzar als laboratoris del GEMMA i voldria donar les gràcies per la paciència i tota l'ajuda prestada als tècnics dels laboratoris, a l'Eduardo i al Javi. També voldria agrair a les meves companyes d'equip del Recircula Challenge, a l'Anna Espina amb qui he treballat a la beca d'aprenentatge i a la doctorant Marta Fernández que ha estat sempre donant-nos suport quan en Jaume no podia. En aquesta línia també vull donar les gràcies a les doctorandes i estudiantes del GEMMA, a l'Anna, l'Evelyn, a l'Ana, al Toni... amb qui he compartit moltes hores de laboratori, de dinars i de cafès.

Ara voldria enrecordar-me dels meus companys de classe, en Nil i en Carlos, amb qui fa quatre anys vam començar aquesta singladura. No podria haver trobat millors companys amb qui fer treballs, compartir penes i alegries, però sobretot no podria haver trobat unes millors persones. Ara ens dispersem per les universitats i per altres països, però estic segur que quan ens retrobem allà on sigui, com sigui i quan sigui no hauran passat els anys i seguirem a l'aula 24 a les 8 del matí després de 2 hores de transport públic, esperant que comencí la classe.

Per acabar també voldria donar les gràcies als professors de la FNB que de manera inconscient m'han motivat a estudiar, a treure millors notes, i m'han transmès les ganes per aprendre i d'anar més enllà, com en Daniel, en Xavi, la Montse, en Jordi... però en especial la Dra. Anna Mujal, amb qui vaig tenir la sort de topar a mecànica de fluids (no em perdonaré mai haver integrat malament el sinus al final!). Sempre ha tingut un moment per xerrar amb mi, donar-me consells i oportunitats, però sobretot li he d'agrair que m'apropes al món de la recerca i la confiança que sempre ha tingut en mi.

Deia el meu avi que el temps que et dediquen les persones no té preu. Tenia raó.

Resum

Els principals objectius del treball són analitzar la viabilitat de la instrumentació de baix cost per a l'observació en continu i el control de la qualitat de l'aigua marina, així com construir un prototip de sonda multiparamètrica per a desenvolupar aquesta tasca.

Per culpa del canvi climàtic derivat de la contaminació per emissions de CO₂, vessament de residus o del malbaratament de recursos, han sorgit diferents problemàtiques pel que respecta a l'estat de la qualitat de les aigües costaneres i oceàniques. En els darrers anys són molts els estudis i publicacions que proposen utilitzar els conceptes *LOW COST* (LC) i *DO IT YOURSELF* (DIY) per a desenvolupar diferents instruments de baix cost per a diferents camps de recerca oceanogràfica. En aquest projecte s'analitza la viabilitat d'utilitzar sensors de baix cost per tal de construir un dispositiu multiparamètric enèrgicament autònom, LC i DIY per a l'estudi de la qualitat de l'aigua marina. Els diferents resultats obtinguts en les proves puntuals i en continu realitzades en sistemes de tractament d'aigües residuals de baix cost, van assenyalar que els sensors presenten una major precisió realitzant mesures puntuals que no pas observacions en continu, però que, tot i això, podien servir per a ambdues funcions.

Tot i que els resultats obtinguts en aquest treball final de grau, assenyalen la viabilitat de desenvolupar eines oceanogràfiques LC i DIY per al control de la qualitat de l'aigua marina, queden molts aspectes per explorar com l'aplicació de xarxes neuronals per a establir un millor calibratge dels sensors, el desenvolupament de sensor DIY més precisos o l'enviament telemàtic de dades a un servidor entre d'altres, poden ser el punt de partida de futurs treballs a desenvolupar.

Abstract

The main goals of this work are studying the viability of the low-cost instrumentation to monitoring and the control of sea water quality, as well as build a multiparameter probe prototype to develop the task.

The climate change due to CO₂ emissions, to spill residues or to waste resources, there are some different problems regarding the status of the quality of the coastal and oceanic waters. These past years, there have been lots of studies and publications that put faith on using the concept of LOW COST (LC) and DO IT YOURSELF (DIY) to develop new low-cost instruments for different oceanographic research fields. In this project, it's analyzed the viability of using low-cost sensors to build an energetically autonomous multiparametric device, LC and DIY to look at the sea water quality. The various results provided by low-cost wastewater treatment systems, showed that the sensors presented a better precision doing punctual measurements than monitoring, although they could work for both functions.

Even though the results obtained in this TFG, show the viability of developing oceanographic LC and DIY tools to control the quality of the marine water, there are lots of aspects to explore, like the application of neuronal roots to improve the prototype sensors calibration, the development of more precise DIY sensors or the telematic sending of data to a server can be the starting point of future works to be developed.

Índex

AGRAÏMENTS.....	1
RESUM.....	3
ABSTRACT.....	4

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ I OBJECTIUS..... 12

1.1.	LA CONTAMINACIÓ I LA QUALITAT DE L' AIGUA MARINA.....	12
1.2.	INSTRUMENTACIÓ DE BAIX COST.....	13
1.3.	IMPACTE ECONÒMIC DE LA CONTAMINACIÓ MARÍTIMA.....	15
1.4.	COST DE LA SENSORITZACIÓ OCEANOGRÀFICA CONVENCIONAL.....	16
1.5.	PROPIETATS FÍSICOQUÍMIQUES.....	18
1.6.	PH.....	20
1.6.1.	EL PH DE L' AIGUA MARINA I LES SEVES PROBLEMÀTIQUES.....	22
1.7.	OXIGEN DISSOLT.....	24
1.7.1.	L' OXIGEN DISSOLT DE L' AIGUA MARINA I LES SEVES PROBLEMÀTIQUES.....	25
1.8.	TERBOLESA.....	26
1.8.1.	LA TERBOLESA DE L' AIGUA MARINA I LES SEVES PROBLEMÀTIQUES.....	27
1.9.	SALINITAT.....	28
1.9.1.	VARIACIÓ DE LA CONDUCTIVITAT EN FUNCIÓ DE LA TEMPERATURA.....	29
1.9.2.	LA SALINITAT DE L' AIGUA MARINA I LES SEVES PROBLEMÀTIQUES.....	30
1.10.	TEMPERATURA.....	31
1.10.1.	LA TEMPERATURA DE L' AIGUA MARINA I LES SEVES PROBLEMÀTIQUES.....	32

CAPÍTOL 2. MÈTODES..... 33

2.1.	TECNOLOGIA ARDUINO E INSTRUMENTACIÓ DE BAIX COST.....	33
2.2.	SENSORS DE QUALITAT DE L' AIGUA.....	34
2.2.1.	SENSORS DE PH.....	34
	SENSOR DE PH ASHTA.....	35
2.2.2.	SENSORS D'OXIGEN DISSOLT.....	36
	SENSOR D'OXIGEN DISSOLT ATLAS SCIENTIFIC MINI LAB GRADE.....	37
2.2.3.	SENSOR DE TERBOLESA.....	38
	SENSOR DE TERBOLESA DFROBOT TURBIDITY SENSOR.....	39
2.2.4.	SENSOR DE CONDUCTIVITAT.....	40
	SENSOR DE CONDUCTIVITAT DFROBOT EC METER $K=10$	41
2.2.5.	SENSOR DE TEMPERATURA.....	42
	SENSOR DE TEMPERATURA AZDELIVERY DS18B20.....	43
2.3.	VALIDACIÓ I CALIBRATGE DE LES SONDES.....	44
2.3.1.	MÈTRICA DELS ERRORS ESTUDIATS PER A L' ESTUDI DE LA VIABILITAT DE LA SENSORITZACIÓ DE BAIX COST.....	45
2.3.2.	VALIDACIÓ DELS SENSORS DE PH, OD I TEMPERATURA A LES LLACUNES ALGALS DE TRACTAMENT D' AIGÜES RESIDUALS.....	46
2.3.3.	VALIDACIÓ DEL SENSORS DE PH, OD I TEMPERATURA ALS FANGS ACTIVATS.....	50
2.3.4.	VALIDACIÓ DEL SENSOR DE TERBOLESA AMB EL JART-TEST.....	51

CAPÍTOL 3. RESULTATS I DISCUSSIÓ..... 52

3.1.	DESCRIPCIÓ DEL PROTOTIP.....	52
3.1.1.	ALIMENTACIÓ DEL SISTEMA.....	52

3.1.2.	PLAQUES SOLARS PER A L'ALIMENTACIÓ DEL PROTOTIP	56
3.1.3.	ARQUITECTURA ELECTRÒNICA DEL PROTOTIP.....	58
3.1.4.	MUNTATGE DEL PROTOTIP	60
3.1.1.	VALORACIÓ ECONÒMICA DEL PROJECTE	66
3.2.	CALIBRATGE DELS SENSORS	67
3.2.1.	CALIBRATGE DEL SENSOR DE <i>PH ASHTA</i>	67
3.2.2.	CALIBRATGE DEL SENSOR DE OXIGEN DISSOLT ATLAS SCIENTIFIC MINI LAB GRADE OXYGEN PROBE.....	70
3.2.3.	CALIBRATGE DEL SENSOR DE TERBOLESA DFRobot TURBIDITY SENSOR	72
3.2.4.	CALIBRATGE DEL SENSOR DE CONDUCTIVITAT DFRobot EC METERK=10	75
3.3.	VALIDACIÓ DELS SENSORS.....	81
3.3.1.	VALIDACIÓ DEL SENSOR DE PH AMB EL MONITORATGE DE LES <i>HRAP</i>	81
3.3.2.	VALIDACIÓ DEL SENSOR DE OXIGEN DISSOLT AMB EL MONITORATGE DE LES <i>HRAP</i> 85	
3.3.3.	VALIDACIÓ DEL SENSOR DE TEMPERATURA AMB EL MONITORATGE DE LES <i>HRAP</i> 87	
3.3.4.	VALIDACIÓ DELS SENSORS AMB MESURES PUNTUALS DELS FANGS ACTIVATS	89
3.3.5.	VALIDACIÓ DEL SENSOR DE TERBOLESA AMB EL JART TEST.....	92
3.4.	DISCUSSIÓ DELS RESULTATS	95
<u>CAPÍTOL 4. CONCLUSIONS</u>		97
<u>REFERÈNCIES I BIBLIOGRAFIA.....</u>		98
<u>ANNEXOS</u>		104
<u>ANNEX A1.</u>	<u>CODI DE CALIBRATGE DEL SENSOR DE PH.....</u>	105
<u>ANNEX A2.</u>	<u>CODI DE CALIBRATGE SENOR DE OD.....</u>	106
<u>ANNEX A3.</u>	<u>CODI DE CALIBRATGE SENOR DE TERBOLESA</u>	108
<u>ANNEX A4.</u>	<u>CODI DE CALIBRATGE SONDA DE CONDUCTIVITAT</u>	109
<u>ANNEX A5.</u>	<u>CODI DE VALIDACIÓ DEL SENSOR DE PH</u>	110
<u>ANNEX A6.</u>	<u>CODI DE VALIDACIÓ DEL SENSOR DE TEMPERATURA.....</u>	112
<u>ANNEX A7.</u>	<u>CODI DE LES PROVES DE LES MESURES PUNTUALS</u>	114
<u>ANNEX A8.</u>	<u>CODI DE VALIDACIÓ DE LA TERBOLESA</u>	116
<u>ANNEX A9.</u>	<u>MEMÒRIA TÈCNICA PRESENTADA PER AL CONCURS RECIRCULA CHALLENGE 2022</u>	117

Llistat d'abreviatures y símbols

Ca – Consum diari

Cf – Concentració final

DIY – Do it Yourself

FA – Fangs activats/Activated sludge

GM – Glass Membrane

HRAP – Sistema de tractament d'aigües residuals amb algues/High Rate Algal Ponds

HS_m= Hora Solar mínim

I – Intensitat consumida

LC – Low Cost

MAE – Mean Absolute Error/Error absolut mitja

MAPE– Mean Absolute Percentatge Error/Error absolut mitja percentual

MES – Matèria en Suspensió

MSE – Mean Error Square/Error quadràtic mig

NaCl – Clorur de sodi

OD – Oxigen dissolt

P – Potència

Pa – Potència d'autonomia

RMSE –Root Mean Square Error/Mitjana quadràtica

V – Voltatge

Va – Volum alíquota

Vt – Volum total de la concentració

Índex de imatges

Imatge 1. Producció primari de oxigen dels oceans. Font: Copernicus Marine Service.....	12
Imatge 2. CTD proposats per Oceanography for Everyone. Font: Oceanography for Everyone.....	13
Imatge 3. CTD desenvolupat amb la filosofia DIY. Font: Fries i Sanisaly (2007).....	14
Imatge 4. Conduino. Font: Carminati i Luzzatto (2017).....	14
Imatge 5. Elements majoritaris presents a l'aigua marina. Font: Pilson (1998).....	18
Imatge 6. Escala logarítmica del pH. Font: whoi.edu.....	20
Imatge 7. Perfil del pH del mar Mediterrani. Font: Pròpia i de MyOcean Pro.....	21
Imatge 8. Variació de la profunditat en funció de la profunditat. Font: Chen et al. (1996).....	22
Imatge 9. Increment del pH en funció del CO ₂ dissolt a l'aigua marina. Font: EPA(EU).....	22
Imatge 10. Variació del pH amb la interacció del aigua desembocada als estuaris. Font: Lauchlan et al. (2020).....	23
Imatge 11. Eutrofització de l'aigua costanera. Font: projecteutrophication.weebly.com.....	25
Imatge 12. Mostres d'aigua tèrbola. Font: Pròpia.....	26
Imatge 13. Diferents zones tèrboles de les aigües costaneres. Font: Shi et al. (2010).....	27
Imatge 14. Efecte de la terbolesa en la flora marina. Font: Bulmer et al. (2018).....	27
Imatge 15. Distribució de la salinitat en PSU. Font: MyOcean Viewer i Pròpia.....	28
Imatge 16. Distribució de la salinitat en funció de la profunditat. Font: Vargas et al. (2017).....	30
Imatge 17. Representació de la temperatura en funció del moviment de les seves partícules. Font: Fisicalab.com.....	31
Imatge 18. Anomalies en la temperatura de la zona superficial de les aigües marines: Font: noaa.gov.....	32
Imatge 19. Parts i elements de un microcontrolador Arduino. Font: aprendiendoarduino.wordpress.com.....	33
Imatge 20. Parts de una sonda convencional de pH. Font: ph-meter.info.....	34
Imatge 21. Sensor de pH ASHTA. Font: Pròpia.....	35
Imatge 22. Placa convertidora del sensor de pH. Font: Pròpia.....	35
Imatge 23. Parts de una sonda convencional de oxigen dissolt que utilitza el mètode de cel·les galvàniques. Font: instrumentationtools.com.....	36
Imatge 24. Sensor de OD Atlas Scientific Mini Lab Grade. Font: Pròpia.....	37
Imatge 25. Diferències entre els turbidímetres i els nefelòmetres. Font: ee2-nitk.vlabs.ac.in.....	38
Imatge 26. Projecte de turbidímetre DIY. Font: Kelly et al (2014).....	38
Imatge 27. Procés de ensiliconat del sel·legat de compressió amb el sensor de terbolesa. Font: Pròpia.....	39
Imatge 28. Forma final del sensor de terbolesa DFRobot Turbidity sensor. Font Pròpia.....	39
Imatge 29. Part de un sensor convencional de conductivitat. Font: Emerson Process Management. (2010).....	40
Imatge 30. Sensor de conductivitat conductiu. Font: Opetek.com.....	40
Imatge 31. Sensor de conductivitat DFRobot K=10. Font: Pròpia.....	41
Imatge 32. Termistor i termoresistor, respectivament. Font: Pròpia.....	42
Imatge 33. Connexió del sensor de temperatura.....	43
Imatge 34. Esquema de la validació i calibratge dels sensors. Font: Pròpia.....	44
Imatge 35. Representació dels errors estudiats. Font: Pròpia.....	45
Imatge 36. HRAP instal·lades a la UPC. Font: Garcia et al. (2000).....	46
Imatge 37. Llacuna "platja" amb les sondes convencionals instal·lades. Font: Pròpia.....	47
Imatge 38. Sensors de temperatura, oxigen dissolt i conductivitat instal·lats a la HRAP. Font: Pròpia.....	47
Imatge 39. Primera prova conjunta dels sensors. Font: Pròpia.....	48
Imatge 40. Caixa passa-cables per a les proves individuals, a la Imatge el sensor de pH. Font: Pròpia.....	48
Imatge 41. Recollida de dades del sensor de pH amb el <i>datalogger</i> . Font: Pròpia.....	49
Imatge 42. Recollida de dades del sensor de temperatura i del de oxigen dissolt. Font: Pròpia.....	49
Imatge 43. Esquema del sistema de tractament per fangs activats. Font: Fiter et al (2006).....	50

Imatge 44. Sistema de fangs activats del laboratori del GEMMA. Font: Pròpia.	50
Imatge 45. Floculador de pràctiques de la UPC. Font: Pròpia.	51
Imatge 46. Ports d'alimentació de un microcontrolador tipus Arduino. Font: practicasconarduino.com.....	52
Imatge 47. Petaca protapiles instal·lada per a la validació dels sensors. Font: Pròpia.....	53
Imatge 48. Connexió del multímetre per a poder determinar el consum dels elements del projecte. Font: Pròpia.....	53
Imatge 49. Mesura del consum del mòdul SD. Font: Pròpia.	54
Imatge 50. Bateria JIAN YA NA DC12680. Font: amazon.com.....	55
Imatge 51. Tensió de sortida de la placa solar ALLPAWERS DIY mesurada amb un multímetre. Font: Pròpia.....	56
Imatge 52. Primer muntatge de les plaques solars en paral·lel. Font: Pròpia.	57
Imatge 53. Esquema del sistema d'alimentació per plaques solars. Font: Pròpia.	57
Imatge 54. Esquema de les connexions del prototip de sonda multiparamètrica. Font: Pròpia.	58
Imatge 55. Esquema de les connexions soldades de la placa PCB. Font: Pròpia.....	58
Imatge 56. Procés de soldatge de la placa de connexions PCD i el resultat final. Font: Pròpia...	59
Imatge 57. Mòdul 1. Font: Pròpia.	61
Imatge 58. Mòdul 2 Font: Pròpia.	61
Imatge 59. Mòdul 3. Font: Pròpia.	61
Imatge 60. Mòdul 4. Font: Pròpia.	62
Imatge 61. Mòdul 5. Font: Pròpia.	62
Imatge 62. Mòdul 6. Font: Pròpia.	62
Imatge 63. Perforació de la caixa per a les obertures dels sellegats de compressió. Font: Pròpia. ..	63
Imatge 64. Sellegats de compressió col·locats a la caixa del sensor. Font: Pròpia.	63
Imatge 65. Realització de les obertures per al cablejat de les plaques solars. Font: Pròpia.	63
Imatge 66. Disposició final dels elements de la tapa del sensor. Font: Pròpia.....	64
Imatge 67. Primer muntatge dels mòduls i components del sensor. Font: Pròpia.....	64
Imatge 68. Base de la caixa passa-cables amb el cablejat unit per brides de plàstic. Font: Pròpia..	65
Imatge 69. Tapa de la caixa passa-cables amb el cablejat unit per brides de plàstic. Font: Pròpia..	65
Imatge 70. Sensor de pH mesurant enregistrant el voltatge en mV del tampó. Font: Pròpia.....	67
Imatge 71. Sensor de oxigen dissolt sense “bombolles” i la solució per a l'elèctrode. Font: Pròpia.	70
Imatge 72. Realització de les solucions partint d'una concentració inicial. Font: Pròpia.	72
Imatge 73. Tampons esterilitzats amb les diferents solucions de aigua tèrbola. Font. Pròpia.	73
Imatge 74. Sensor de terbolesa dins una solució de calibratge. Font: Pròpia.	73
Imatge 75. Distribució global de la salinitat en PSU. Font: Pròpia., extreta de <i>MyOcean Viewer</i> . .	75
Imatge 76. Preparació dels 25 g de Clorur de sodi per a la concentració inicial. Font: Pròpia.....	76
Imatge 77. Material utilitzat per a la preparació de les diferents concentracions. Font: Pròpia.....	77
Imatge 78. Preparació de les concentracions. Font: Pròpia.....	77
Imatge 79. Imatge de com es va col·locar el sensor amb tampones. Font: Pròpia.....	78
Imatge 80. Sensor de pH instal·lat a les llacunes. Font: Pròpia.	81
Imatge 81. Algues acumulades a les parets de les llacunes. Font: Pròpia.....	85
Imatge 82. Sensor de oxigen dissolta instal·lat a les HRAP. Font: Pròpia.	85
Imatge 83. Sensor de temperatura instal·lat a les HRAP. Font: Pròpia.	87
Imatge 84. Sonda de pH instal·lada per realitzar les mesures puntuals. Font: Pròpia.....	89

Índex de gràfiques

Gràfica 1. Cost dels sensors convencionals. Font: Pròpia.....	16
Gràfica 2. Cost de les sondes multiparamètriques. Font: Pròpia.....	17
Gràfica 3. Comparativa del voltatge enregistrat en les 3 proves de calibratge (pH 4). Font: Pròpia.	68
Gràfica 4. Comparativa del voltatge enregistrat en les 3 proves de calibratge (pH 7). Font: Pròpia.	68
Gràfica 5. Ajust lineal entre el voltatge enregistrat per el sensor de pH i els valors reals de les solucions. Font: Pròpia.....	69
Gràfica 6. Variacions del OD en les HRAP. Font: Pròpia.	70
Gràfica 7. Ajust lineal entre el voltatge enregistrat per el sensor de OD i els valors reals de HRAP. Font: Pròpia.....	71
Gràfica 8. Ajust lineal entre el voltatge enregistrat per el sensor de terbolesa i els valors reals de les solucions.....	74
Gràfica 9. Voltatge enregistrat per el sensor de conductivitat en les diferents concentracions. Font: Pròpia.	78
Gràfica 10. Voltatge enregistrat per el sensor de conductivitat en les diferents concentracions. Font Pròpia.	78
Gràfica 11. Ajust lineal entre el voltatge enregistrat per el sensor de conductivitat i els valors reals de les solucions en ppm. Font: Pròpia.....	79
Gràfica 12. Ajust lineal entre el voltatge enregistrat per el sensor de conductivitat i els valors reals de les solucions en mS/cm. Font: Pròpia.....	80
Gràfica 13. Comparació de la sensorització del pH de les HRAP entre el sensor de pH de baix cost i el convencional. Font: Pròpia.....	82
Gràfica 14. Comparació entre el voltatge enregistrat per el sensor de pH de baix cost i els valors reals de pH de les HRAP. Font: Pròpia.	82
Gràfica 15. Ajust lineal entre el voltatge enregistrat per el sensor de pH i els valors reals de les de pH de les HRAP. Font: Pròpia.	83
Gràfica 16. Comparació de la sensorització del pH de les HRAP entre el sensor de pH de baix cost i el convencional. Font: Pròpia.....	83
Gràfica 17. Comparació de la sensorització de l'oxigen dissolt de les HRAP entre el sensor de pH de baix cost i el convencional. Font: Pròpia.	86
Gràfica 18. Comparació de la sensorització de la temperatura de les HRAP entre el sensor de temperatura de baix cost i el convencional. Font: Pròpia.....	87
Gràfica 19. Evolució dels errors RMSE, MAE, MSE i MAPE, de les mesures puntuals amb les mesures en continu del sensor de pH. Font: Pròpia.	90
Gràfica 20. Evolució dels errors RMSE, MAE, MSE i MAPE, de les mesures puntuals amb les mesures en continu DEL sensor de oxigen dissolt. Font: Pròpia.	90
Gràfica 21. Evolució dels errors RMSE, MAE, MSE i MAPE, de les mesures puntuals amb les mesures en continu del sensor de temperatura. Font: Pròpia.	91
Gràfica 22. Comparativa de les lectures de terbolesa del sensor convencional, del de baix cost i del seu voltatge enregistrat. Font: Pròpia.....	92
Gràfica 23. Recta de regressió per al calibratge del sensor de terbolesa. Font: Pròpia.....	93
Gràfica 24. Comparació entre el sensor de terbolesa convencional i el de baix cost. Font: Pròpia.	93

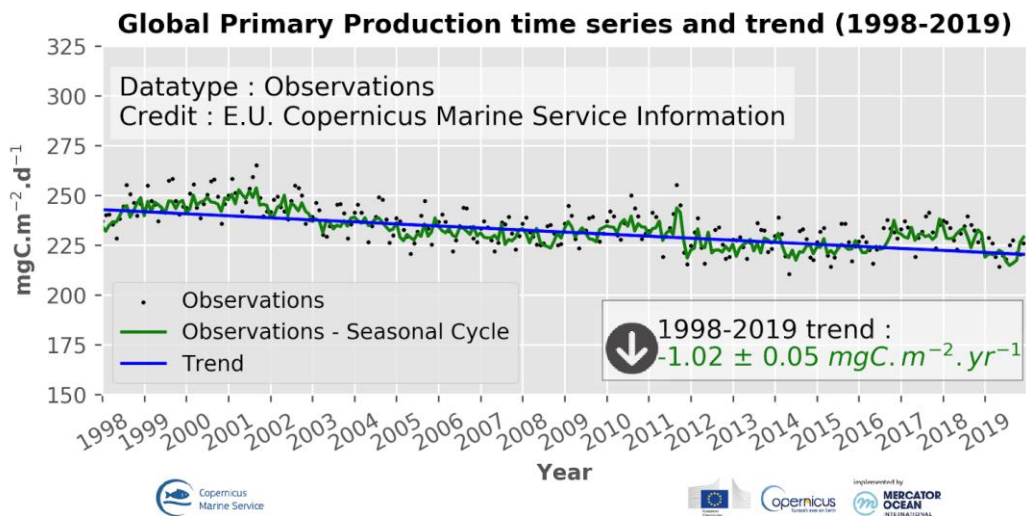
Índex de taules

Taula 1. Dispositius consultats. Font: Pròpia.....	16
Taula 2. Dispositius multiparamètrics consultats. Font: Pròpia.....	17
Taula 3. Rangs de terbolesa. Font: Pròpia.....	26
Taula 4. Especificacions dels sensors de pH. Font: Pròpia.....	35
Taula 5. Especificacions dels sensors de oxigen dissolt. Font: Pròpia.....	37
Taula 6. Especificacions dels sensors de terbolesa. Font: Pròpia.....	39
Taula 7. Especificacions del sensor de conductivitat. Font: Pròpia.....	41
Taula 8. Especificacions del sensor de temperatura. Font: Pròpia.....	43
Taula 9. Sondes convencionals utilitzades per a la validació del calibratge dels sensors. Font: Pròpia.	46
Taula 10. Data i hores de les proves realitzades. Font: Pròpia.....	49
Taula 11. Sensors convencionals utilitzats per a les mesura del pH i l'oxigen dissolt. Font: Pròpia.	50
Taula 12. Concentracions i dosis de coagulant per al Jart-test. Font: Pròpia.....	51
Taula 13. Consum dels dispositius electrònics del prototip. Font: Pròpia.....	54
Taula 14. Desglossament del cost total del projecte. Font: Pròpia.....	66
Taula 15. Voltatge mitja de les diferents solucions de calibratge de pH. Font: Pròpia.....	68
Taula 16. Dades per a realitzar la recta de calibratge. Font: Pròpia.....	71
Taula 17. Volum alíquota per a la preparació de les concentracions finals de terbolesa. Font: Pròpia.	72
Taula 18. Voltatge de les diferents solucions de calibratge de terbolesa. Font: Pròpia.....	73
Taula 19. Volum alíquota per a la preparació de les concentracions finals de conductivitat. Font: Pròpia.....	76
Taula 20. Voltatge mitja de les diferents solucions de calibratge de conductivitat. Font: Pròpia...	79
Taula 21. RMSE, MAE, MSE i MAPE del sensor de baix cost de pH respecte el sensor convencional convencionals. Font: Pròpia.....	84
Taula 22. RMSE, MAE, MSE i MAPE del sensor de baix cost de oxigen dissolt respecte el sensor convencional convencionals. Font: Pròpia.....	86
Taula 23. RMSE, MAE, MSE i MAPE del sensor de baix cost de temperatura respecte el sensor convencional convencionals. Font: Pròpia.....	88
Taula 24. Dades obtingudes de les mesures realitzades en dies puntuals per al control de la planta: Font: Pròpia.....	89
Taula 25. RMSE, MAE, MSE i MAPE del sensor de baix cost de pH respecte el sensor convencional convencionals. Font: Pròpia.....	89
Taula 26. Dades dels sensors utilitzats en el Jarts-test. Font: Pròpia.....	92
Taula 27. Taula d'errors del sensor de terbolesa. Font: Pròpia.....	94

Capítol 1. Introducció i objectius

1.1. La contaminació i la qualitat de l'aigua marina

La qualitat de l'aigua salada a les costes, mars i oceans és de vital importància per a les diferents espècies animals i vegetals que habiten el medi marí, cal recordar que mars i oceans ocupen el 70,9% de la superfície terrestre, i que el 97,4 % de l'aigua del planeta és aigua salada segons dades de la UNESCO. Aquest gran volum de superfície ocupada provoca que el medi marí sigui essencial per a la subsistència del planeta, bona mostra de la importància d'aquest és la rellevància dels oceans en el cicle de carboni, ja que aquests produeixen vora del 50-80% de l'oxigen que respirem segons Paulmier et al. (2017).



Imatge 1. Producció primari de oxigen dels oceans. Font: Copernicus Marine Service

Com es pot observar a la Imatge 1, la producció global d'oxigen dels oceans ha disminuït en els darrers 20 anys, això és degut al canvi climàtic, que amenaça al medi marí dramàticament. La subsistència de la fauna i flora marina depèn principalment de la qualitat de les aigües en les quals aquestes es troben. Les diferents espècies que hi habiten són aquelles que es van adaptar al medi, de manera que les modificacions d'aquest esdevé un problema per a l'ecosistema. Un altre motiu pel qual és important controlar la qualitat de les aigües marines, és que en els darrers anys a causa del canvi climàtic, les aigües marines han patit directament les conseqüències d'aquest. L'augment de la temperatura, la salinitat i el pH han tingut conseqüències respecte a la subsistència de determinades espècies animals i vegetals, així com també han provocat canvis en les corrents oceàniques. D'igual manera, la disminució de l'oxigen provoca la hipòxia de les aigües, el que dificulta la viabilitat de la vida al mar de moltes espècies animals.

Com s'ha esmentat, la qualitat de l'aigua marina és de vital importància no només per al medi marí, sinó també per al planeta, i és per això que el monitoratge, control i estudi de la qualitat de l'aigua és molt important. Per fer-ho és necessari disposar de la instrumentació adequada. Alguns dels mitjans més importants per desenvolupar aquesta tasca són els diferents tipus de boies oceanogràfiques, CTD's o satèl·lits com el *Sentinel 3* del programa Europeu *Copernicus*. Aquests mitjans tenen un cost molt elevat, el que xoca diametralment amb la precarietat econòmica actual de la recerca, naixent una necessitat imperiosa de disposar d'eines el més econòmiques possibles per a l'estudi massiu de la qualitat de l'aigua marina.

1.2. Instrumentació de baix cost

La necessitat de controlar l'estat de l'aigua marina és gairebé categòrica, ja que el canvi climàtic i els sistemes de producció i consum actuals de l'ésser humà afecten directament a les costes i als oceans. Els estudis de Fan, Deser i Schneider (2014) destaquen un increment en la temperatura i de la salinitat de l'aigua marina des dels anys 50, així com també ho han fet altres paràmetres, el qual amenaça el futur no tan sols de l'ecosistema marí, sinó del nostre planeta.

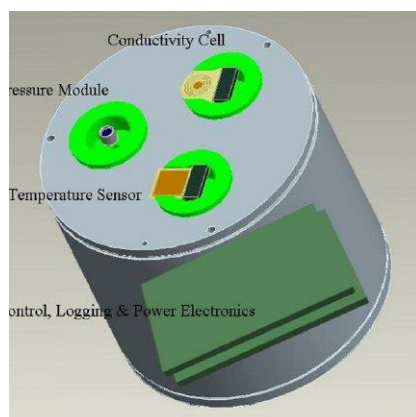
És per aquests motius que camps com els de l'oceanografia s'han preocupat en estudiar l'evolució d'aquesta problemàtica que va en augment. Els models predictius no fan més que assenyalar la gravetat d'aquesta situació. L'IPCC (2021) alerta que el decreixement de la salut de les costes i del oceans podria costar a l'economia mundial un total de 428 milions de dollars anuals, el que significa que per al 2050 s'arribaria amb una despesa total de 1,98 billions (Gaines et al. 2019). La inversió per a l'estudi, prevenció i regulació per al control dels mars no és en cap cas proporcional a la gravetat de la situació. El pressupost del 2021 per a l'Institut Espanyol d'Oceanografia (IEO) va estar de 100 milions d'Euros, pressupost que s'ha de repartir entre moltes activitats del IEO, a conseqüència d'això al final la inversió dirigida al control i estudi de l'estat de les costes Catalanes i de l'Estat Espanyol queda molt minvada.

La instrumentació oceanogràfica actual com els CTD, termòmetres d'inversió, ampolles Nansen i Niskin, així com termosalinografies, o altres sensors i eines utilitzades per a mesurar els paràmetres hidrogràfics i fisicoquímics dels mars i dels oceans són extremadament cars com es veurà en l'Apartat 1.4, on s'observa que instruments com els CTD tenen costos d'entre els 2000 i els 25.000 Euros, els més econòmics. De la comparativa entre cost de la instrumentació i els pressupostos dirigits a la investigació neix la necessitat de tenir aparells que comportin un cost menor, així ho han transmès diferents investigadores e investigadors com Langis (2015) que assenyala la viabilitat de la instrumentació LC i DIY en termes oceanogràfics, remarcant el baix cost en comparació amb la instrumentació convencional, així com també destaca la necessitat de tenir major recerca en aquest àmbit. Per a la confecció d'aquests nous aparells, la tecnologia que més viabilitat presenta són els microcontroladors de codi obert com els Arduino, ja que es basen en la tecnologia *Open Source*, la qual mitjançant plataformes digitals es pot compartir, i disposar d'informació. Això permet la creació de comunitats d'internautes que col·laboren compartint informació a plataformes com *GitHub*, *Hackaday*, on es resolen dubtes a fòrums. Una bona mostra de la creació d'una comunitat on s'intercanvien i es comparteixen coneixements en el camp de l'oceanografia és *Oceanography for Everyone* (OE), un projecte sense ànim de lucre que difon projectes com la confecció d'un CTD LC i DIY. En aquest projecte indiquen el material necessari i les passes a seguir per a poder construir aquest aparell oceanogràfic, amb un cost total de 436,45 Euros. Altres treballs similars com el de Auråen (2019), que va dissenyar un altre CTD LC i DIY, van tenir un cost total de 364,46 Euros. El que en comparació amb la instrumentació convencional suposa una diferència notable.



Imatge 2. CTD proposats per Oceanography for Everyone. Font: Oceanography for Everyone

La recerca pública, i universitària també està contribuint al desenvolupament de la sensorització oceanogràfica de baix cost, bona mostra d'això són els treballs de Paradis i Wood (2013) que van desenvolupar un CTD, que mitjançant microcontroladors de codi obert transmetien la localització per GPS i les dades a distància. També el treball dels professors de la University South Florida Broadbent, Fries i Stanislav (2007), que van utilitzar una cel·la de conductivitat i la van connectar a un microcontrolador, junt amb sensors de temperatura i de pressió. En aquest treball, l'instrument va mostrar una precisió per al sensor de conductivitat de $\pm 0,882$ mS/cm per a conductivitat baixes, de $\pm 0,0294$ m per al de pressió, mentre que la del sensor de temperatura era del $\pm 0,0012$ °C. Aquests resultats obtinguts a l'estudi avalen segons els investigadors, la fiabilitat que poden arribar a presentar aquests dispositius (DIYS).



Imatge 3.CTD desenvolupat amb la filosofia DIY. Font: Fries i Sanisaly (2007).

Més a més, seguint la filosofia DIY es troben diferents treballs on es desenvolupen sensors propis de conductivitat o de temperatura. El projecte realitzat per Shin et al. (2021) utilitza un endoll mascle per fabricar un conductímetre amb una precisió de ± 0.6 mS/cm, amb un cost total inferior als 40 \$. De similar manera es troba el projecte desenvolupat per Carminati i Luzzatto, (2017), el conegut com a *Conduino*, un sensor de conductivitat construït amb un carregador de mòbil, aquest producte avui dia es comercialitza pels seus creadors. Aquesta és una eina molt popular a la recerca universitària, ja que presenta una precisió del $\pm 1\%$, i un cost mínim, en relació amb els conductímetres convencionals.



Imatge 4. Conduino. Font: Carminati i Luzzatto (2017).

Amb els exemples exposats es pot concloure no només la possibilitat i la viabilitat de dissenyar i fabricar aparells oceanogràfics LC i DIY sinó també la necessitat que hi ha a la recerca de seguir investigant com poder construir cada vegada més dispositius que permetin estudiar els mars amb un pressupost mínim, com és habitual als projectes d'innovació i investigació. És per aquest motiu que es va voler utilitzar el treball de final de grau per a poder desenvolupar un prototip de sonda multiparamètrica de baix cost basada en la filosofia DIY per al control de la qualitat de l'aigua marina.

1.3. Impacte econòmic de la contaminació marítima

La costa, els mars, i els oceans són indispensables per a la vida del nostre planeta i també o són per a l'economia global. En els últims 40 anys el 90% del comerç mundial ha estat transportat per mar (Cánovas 2020), això es relaciona proporcionalment amb el creixement de la flota mercant mundial, que va registrar l'any 2020 un total de 121,4 milers de vaixells dedicats al transport de mercaderies, que sumen un arqueig total de 1398,2 milions de GT. Aquest increment del transport marítim es tradueix en un augment de la contaminació de l'aire de les zones costaneres, fent-se més notable als ports segons Viana et al. (2014). La degradació ambiental dels oceans comença a ser preocupant, els vaixells continuen sent responsables d'una part d'aquesta degradació tot i seguir una sèrie de regulacions de la OMI, aquestes no es compleixen (Walker et al. 2018). Per culpa de la pandèmia mundial esdevinguda per la COVID-19, el volum del transport marítim va disminuir, però això no es va traduir en una disminució de les emissions. Estudis com els de Mujal et al. (2022) indiquen com aquestes van augmentar al port de Barcelona a conseqüència de les restriccions d'entrada al port, que feien fondejar i romandre a l'espera a tots els vaixells, els quals seguien cremant combustible amb els motors auxiliars.

Les costes poden esdevenir una font molt important d'ingressos per molts països com és el cas de l'Estat Espanyol. El turisme actualment representa el 14% del PIB Nacional, de manera que la degradació d'aquestes afectaria directament al turisme i en conseqüència a l'economia nacional. Tot i la importància de la costa en el sector turístic i hotelier, les mesures per a la preservació, prevenció i manteniment del litoral són insuficients, això és degut en gran part a la manca d'inversió i diners per a la seva conservació. Tant és així que el pressupost destinat a realitzar aquestes feines ha disminuït un 85% entre el 2009 i el 2019 (Tecniberia 2019), on el pressupost era de 380 milions i fa tres anys era uns 57 milions, respectivament.

Un problema molt important als ports i les costes per on transita el transport marítim, són les problemàtiques relacionades amb les aigües de llast, com la importació d'espècies no autòctones o les masses d'aigua descarregades en zones sensibles. La mitigació d'aquests problemes suposa despeses econòmiques importants. Bona mostra d'això és la despesa de prop de 1600 milions d'Euros en 10 anys per solucionar la invasió del musclo zebra a la conca de l'Ebre o els problemes amb la medusa Ctenophora, que es va introduir en el mar Negre provocant la pèrdua de milions de dòlars per tal de restablir la biodiversitat marina (GEF-UNDP-IMO 2017). Remarcant també que la construcció de ports i espigons han portat a la rigidització de les costes, provocant un canvi significatiu del fons marí. Bon exemple de l'impacte ambiental de la construcció de ports són els de Barcelona i Tarragona. Per a la construcció del port de Barcelona i de l'Aeroport Josep Tarradellas Barcelona-El Prat es va reubicar la desembocadura del riu Llobregat, tenint això un impacte ambiental amb unes conseqüències econòmiques importants. Per altra banda la construcció del port de Tarragona va provocar la desaparició de llacunes naturals i de part de l'ecosistema que existia amb anterioritat. La recuperació i mitigació de l'impacte d'aquestes construccions són ara motiu d'estudi.

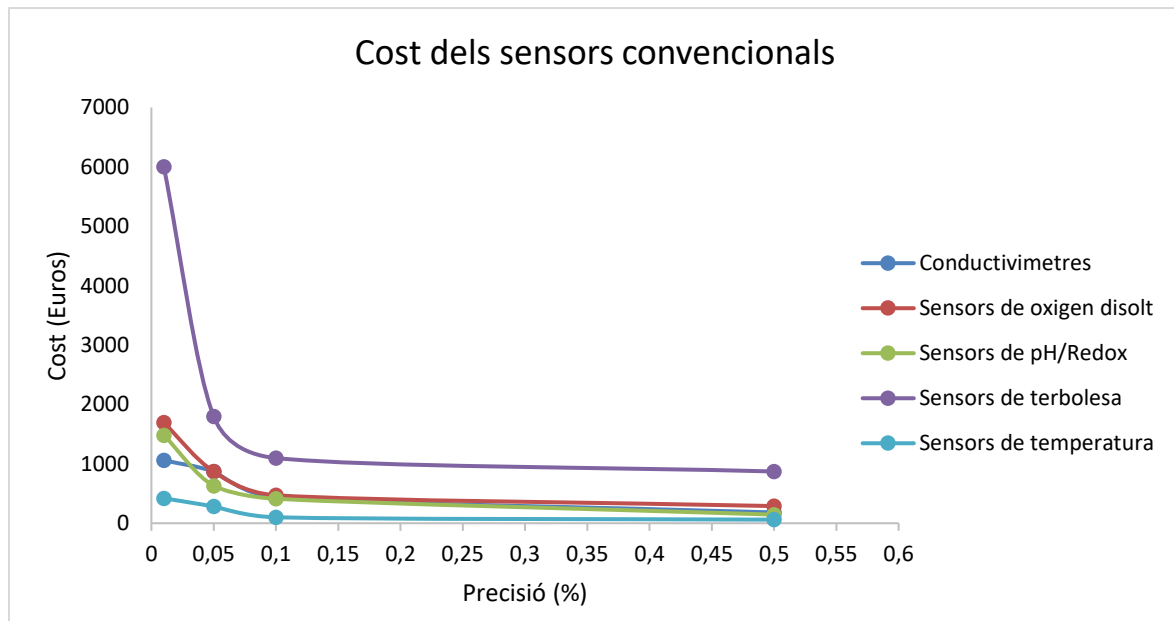
1.4. Cost de la sensorització oceanogràfica convencional

La instrumentació per a la sensorització i monitoratge oceanogràfic de la qualitat de l'aigua és molt variada, tant en les prestacions que aquesta pot oferir com en els costos d'adquisició. L'observació a llarg termini de la qualitat de l'aigua és molt important per al control dels mars i oceans, ja que permet recol·lectar dades per tal d'establir patrons, detectar problemàtiques, avaluar situacions de risc o realitzar models predictius. Són molts els diferents paràmetres que es poden mesurar com conductivitat, temperatura, clorofil·la a l'aigua, cianobacteris marins, la rodamina, l'oxigen dissolts, la terbolesa, i olis pesats, entre d'altres.

Aquest projecte es centrarà en la sensorització de l'oxigen dissolt, la conductivitat, el pH, la temperatura i la terbolesa, degut a que són els paràmetres fisicoquímics més rellevants, ja que la seva variació és indicatiu de problemàtiques molt greus. Els sensors i sondes convencionals, tenen preus molt elevats que van relacionats amb la precisió d'aquests, a la Gràfica 2 es pot observar els preus de les sondes multiparamètriques convencionals i a la Gràfica 1 els dels diferents tipus de sensors convencionals. Les sondes i sensors consultats per a l'estudi són instruments científics majoritàriament de laboratori, ja que la recerca dels diferents preus de les sondes de camp no era tasca fàcil a causa de la falta de cooperació de les diferents empreses distribuïdores.

Taula 1. Dispositius consultats. Font: Pròpia.

Conductímetres	Sensor de oxigen dissolt	Sensor de pH	Turbidímetre	Sensor de temperatura
PCE-PWT 10	PCE-DOM 10	Horiba pH-22 (3999960123)	Hanna HI93703	Extech RTD Temperature Probe
PCE-PHD 1-LF	PCE-PHD 1-O2	HANNA HI8424	YSI ProDSS turbidity sensor	Extech 850186
Hanna HI98192	Hanna HI98193	Hanna HI72911B	Global water WQ770-B	YSI ScienceLine Temperature Probes
Onset U24-002-C	Onset U26-001	Aquas int SMR04-3-1-005	Fitish Turbidity V6	Global Water WE700/WQ101

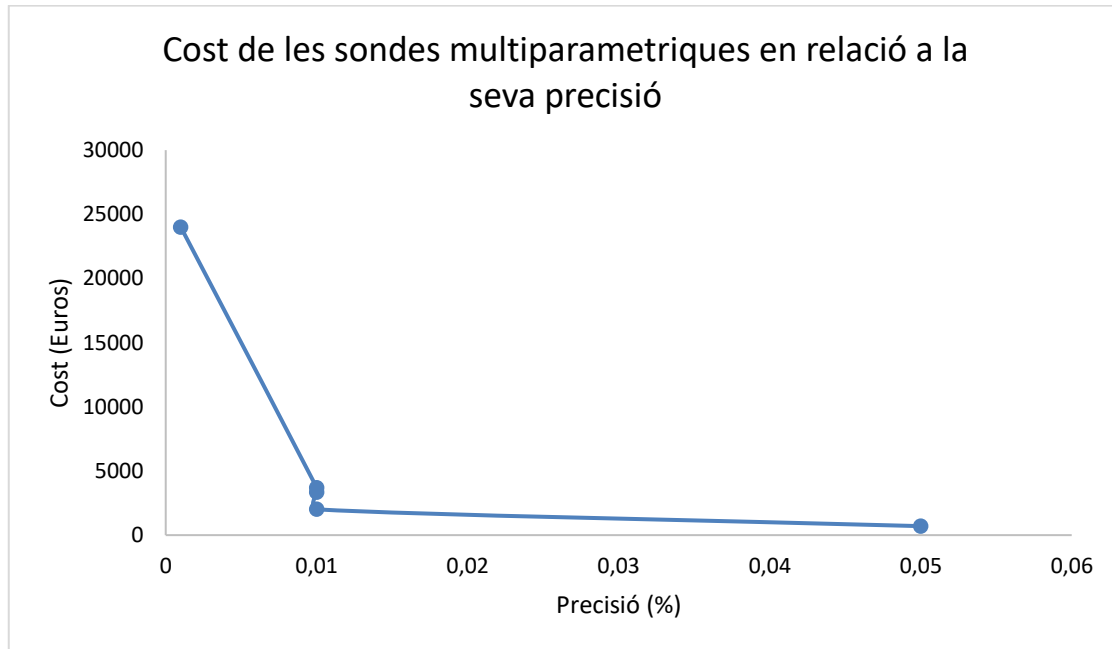


Gràfica 1. Cost dels sensors convencionals. Font: Pròpia.

A la Gràfica 1 es poden observar els preus de sensors convencionals de temperatura, oxigen dissolt, terbolesa, pH i conductivitat. Es van cercar únicament cinc tipus de sensors, per tal de representar els diferents preus que es troben en el mercat, els quals estan determinats principalment per la precisió de les sondes, així com també per les seves capacitats de treball. per a treballs relacionats amb l'oceanografia s'ha de tenir present que es treballarà a grans profunditats i, per tant, aquests sensors hauran de poder suportar altes pressions. Els sensors més cars són els de terbolesa, mentre que els més econòmics són els de temperatura, això és funció de la complexitat tecnològica de cadascuna de les sondes.

Taula 2. Dispositius multiparamètrics consultats. Font: Pròpia.

Tipus de sonda	Model	Cost (Euros)
CTD	LL-MINI-CTD-00-ABS-010	701,03
Multiparamètrica	Aquaread AP-2000	2009,81
Multiparamètrica	Aquaread AP-5000	3350,58
CTD's	Font de consulta	3700
CTD's	Font de consulta	24000



Gràfica 2. Cost de les sondes multiparamètriques. Font: Pròpia.

Per altra banda, la Gràfica 2 es poden trobar 5 sondes multiparamètriques convencionals, on els preus oscil·len molt depenent dels paràmetres de mesura, així com de la seva precisió. Existeixen sondes amb preus molt més elevats, que poden arribar a costar més de 100.000 d'Euros, però aquestes són per a treballs molt específics a grans profunditats, la majoria de sondes multiparamètriques i CTD's, oscil·len al voltant de 2000-30.000 Euros.

En l'Apartat 1.3 s'ha esmentat l'impacte econòmic de les diferents problemàtiques ambientals entorn l'aigua marina, de manera que la inversió en instrumentació per al seu control és de vital importància, ja que és una eina fonamental per prevenir i evitar les despeses per revertir aquestes situacions. Poder desenvolupar eines alternatives a la instrumentació convencional com es pretén fer en aquest treball de final de grau, pot ser un factor clau per aprofitar al màxim la mínima inversió en aquests tipus de control ambiental.

1.5. Propietats fisicoquímiques

L'aigua salada es diferenciarà en tres grans grups, l'aigua salobre, l'aigua de mar i la salmorra, aquesta última únicament es troba present en llacs salins submarins, en aquests espais la salinitat és entre 2 i 3 vegades la salinitat de les aigües del seu voltant. L'aigua salobre és aquella que té una salinitat compresa entre els 0,5 g/L i els 30 g/L, mentre que l'aigua de mar es considera que té un rang de salinitat que va dels 30 als 50 g/L. La composició en aquestes aigües serà diferent no tan sols entre aquests dos grups, sinó també depenent del seu entorn, és per això que per a entendre la composició de l'aigua marina i quins són aquells paràmetres que la caracteritzen es farà una generalització, i s'establiran conceptes generals per a poder entendre les seves característiques principals. L'aigua de mar està composta per un 96,5 % d'aigua i un 3,5 % de sals. L'aigua és una substància la qual la seva molècula està formada per dos àtoms d'hidrogen i un d'oxigen, aquesta presenta un enllaç covalent entre els àtoms el qual provoca un efecte en la geometria de la molècula que deriva en un augment de la constant dielèctrica de l'aigua, que provoca el poder dissolvent d'aquesta per a les substàncies ionitzades com són les sals. Les sals, que representen un 3,5 % de la composició de l'aigua marina no són més que compostos químics que uneixen cations amb anions mitjançant enllaços iònics (Stewart (1997) i Pilson (1998)).

A la Imatge 5 es pot observar la composició de l'aigua marina, a una salinitat i temperatura determinades. En aquesta es pot observar com tant el clorur com el sodi són alguns dels elements majoritaris, això no és d'estranyar, ja que tot i existir diverses sals a l'aigua marina com el clorur de potassi, clorur de magnesi o bromur de sodi (M.Pilson, 1998) la sal dissolta predominant és el clorur de sodi (NaCl).

	At salinity (PSS 1978): $S = 35.00\text{‰}$, $t = 20\text{ °C}$			
	$\text{mg kg}^{-1} S^{-1}$	g kg^{-1}	mmol kg^{-1}	mM
Na^+	308.1	10.782	469.00	480.61
K^+	11.40	0.399	10.21	10.46
Mg^{2+}	36.68	1.284	52.82	54.13
Ca^{2+}	11.76	0.4115	10.27	10.52
Sr^{2+}	0.223	0.0078	0.090	0.092
Cl	552.93	19.353	545.87	559.39
SO_4^{2-}	77.49	2.712	28.235	28.935
HCO_3^-	3.217	0.1126	1.845	1.891
CO_3^{2-}	0.317	0.0111	0.184	0.189
CO_2	0.017	0.0006	0.013	0.0133
Br	1.923	0.0673	0.842	0.863
B(OH)_3	0.591	0.0207	0.334	0.342
B(OH)_4^-	0.186	0.0065	0.082	0.0839
F^-	0.037	0.00130	0.068	0.070
Totals	1004.87	35.170	1119.87	1147.60
Alkalinity			2.300	2.37
Everything else	—	−0.03	—	—
Water	—	−964.80	−53.554	−54.880

Imatge 5. Elements majoritaris presents a l'aigua marina. Font: Pilson (1998)

L'aigua marina te presents diferents nutrients essencials per a la vida present al mar, els més importants serien el fòsfor, el nitrogen i el silici (Pilson, 1998). Aquests nutrients es troben en diferents composicions com el fosfat (PO_4), el nitrat d'amoni (NO_3NH_4) o l'àcid silícic (H_2SiO). El transport de nutrients de les corrents marines és essencial per a la vida de l'ecosistema marí, degut a que són la columna vertebral d'una gran part de la seva població.

Les propietats fisicoquímiques s'han d'entendre per separat, on les propietats físiques de l'aigua són aquelles que estan relacionades amb l'estat d'un sistema físic, i que no modifiquen la substància, mentre que les propietats químiques són aquelles que si modifiquen la composició de la substància. Els paràmetres físics més rellevants per a l'estudi de la qualitat de l'aigua marina són:

- La temperatura
- La densitat
- La terbolesa
- Els sòlids dissolts

Per altre banda els paràmetres químics més importants per a la mesura de la qualitat de l'aigua marina són:

- El pH
- La salinitat/ conductivitat elèctrica
- L'oxigen dissolt
- El Nitrogen
- El sulfat
- El fluorur

La propietat més important de la qualitat de l'aigua marina és la temperatura i la salinitat, la qual està relacionada amb la conductivitat elèctrica, aquesta propietat està relacionada directament amb la temperatura i la densitat de les masses d'aigües. Amb la salinitat, la temperatura i la pressió es pot calcular la densitat de les diferents masses d'aigua. Però d'aquest llistat de paràmetres els que es consideren més rellevants són el pH, l'oxigen dissolt, la terbolesa, la conductivitat i la temperatura. Fent aquesta consideració, seran aquests paràmetres els que es voldran controlar amb la sonda prototipada del projecte.

1.6. pH

El pH és un paràmetre (físicoquímic) que serveix per definir l'acidesa o basicitat d'un medi aquós. Aquest paràmetre és en si mateix un coeficient que pot estar compres entre 0 i 14, sent pH=0 una dissolució molt àcida i pH=14 una de molt bàsica. A totes les solucions aquoses es troben ions de hidroni (H_3O^+) e hidroxid (OH^-), i és per aquest motiu que es va decidir definir l'acidesa d'una substància segons la concentració de ions¹ d'hidrogen. Les concentracions d'aquests dos ions són inversament proporcional segons el valor on el producte iònic (K_w) de l'aigua (Pilson 1998), on:

$$K_w = [H_3O^+][OH^-] = [OH^-][H^+] \quad (1)$$

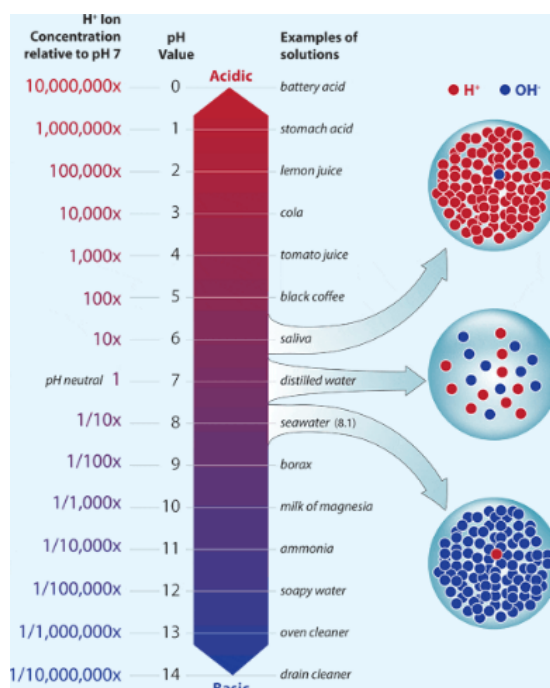
El pH es mesura en funció de la concentració de ions H^+ en una solució, per poder agrupar el màxim de solucions en un rang de 0 a 14, s'utilitza una escala logarítmica per al càlcul del pH, sent la fórmula (1) utilitzada per determinar el pH.

$$pH = -\log(H^+) \quad (2)$$

Seguint la propietats dels logaritmes es podria obtenir la concentració de H^+ com és visible amb la fórmula (2).

$$H^+ = 10^{-pH} \quad (3)$$

Al tractar-se d'una escala logarítmica un canvi unitari implica una variació de la concentració de ions H^+ 10 vegades superior. Les solucions de pH=7 són solucions neutres, mentre que les de pH=0 són solucions molt àcides i les de pH=14 molt alcalines².



Imatge 6. Escala logarítmica del pH. Font: whoi.edu

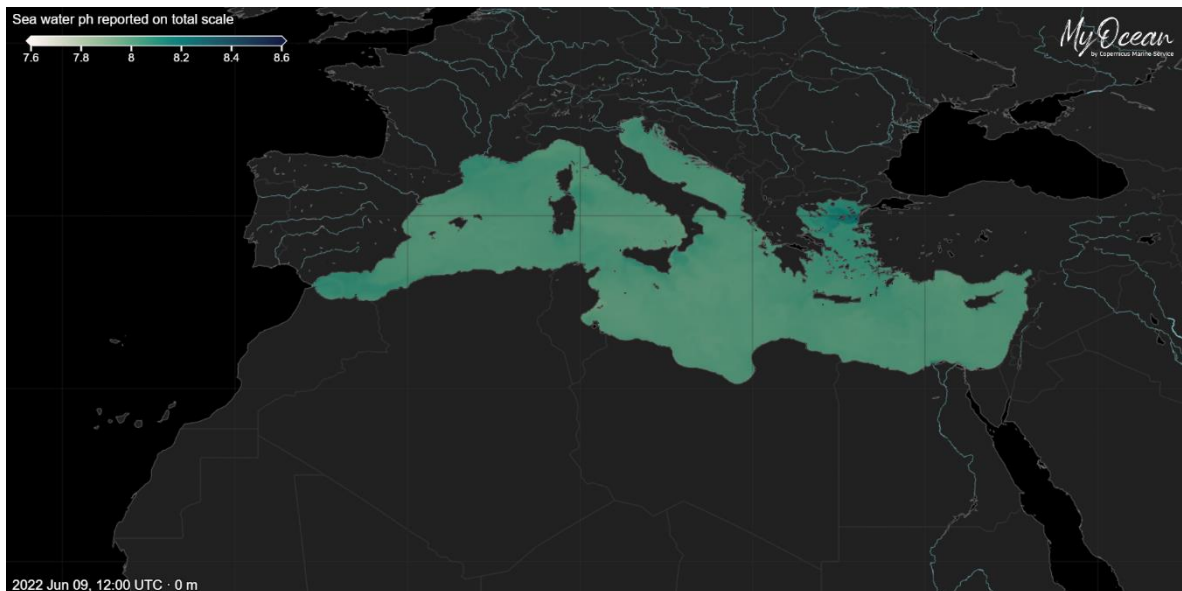
¹ Les concentració aquoses contenen ions de hidrogen, entenent que els ions són partícules carregades positivament, serà la concentració de tots aquests ions de Hidrogen els que determinaran l'acidesa d'una substància.

² L'alcalinitat a diferència del pH és la mesura de la capacitat d'una solució per a neutralitzar els àcids. Aquesta propietat indicaria la capacitat d'una solució de no variar el seu pH al afegir-hi àcids.

Quan més àcida és una solució major és la seva concentració de ions d'hidrogen, i quan més bàsica menor. Els principals factors que alteren el pH i que d'alguna forma estan relacionats amb la seva mesura són la temperatura, el CO₂, la vida a l'aigua i la composició de la solució mesurada.

La temperatura afecta al pH d'una solució, ja que a l'augmentar la temperatura les molècules tendeixen a separar-se, és a dir que es descomponen, pel que la quantitat de ions H⁺ augmenta, provocant directament una disminució del pH, de forma que a altes temperatures les solucions tindran un pH menor del que tindrien a la temperatura estàndard de mesura, que com marca la ISO 10523:2012 és de 25 °C. Per altra banda, estan els factors de la composició de l'aigua, que afecten directament a la seva concentració de ions. Es pot relacionar la salinitat amb el pH, així com també la interacció d'una substància amb l'aire present, degut a que la composició química es veu alterada, afegint ions d'hidrogen o bé generant més hidròxid.

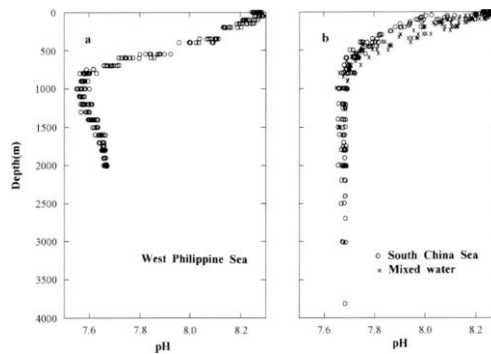
El pH de l' aigua del mar es troba en un rangs de entre pH 7,8-8,2 segons les dades descarregades de *My Ocean Pro*, el pH de la costa mediterrània està al voltant de 8 pH, aquesta concentració determina que l'aigua del mar és una substància tirant a bàsica, això es degut a les quantitats de sals i d'oxigen dissolt presents en l'aigua marina.



Imatge 7. Perfil del pH del mar Mediterrani. Font: Pròpi i de MyOcean Pro.

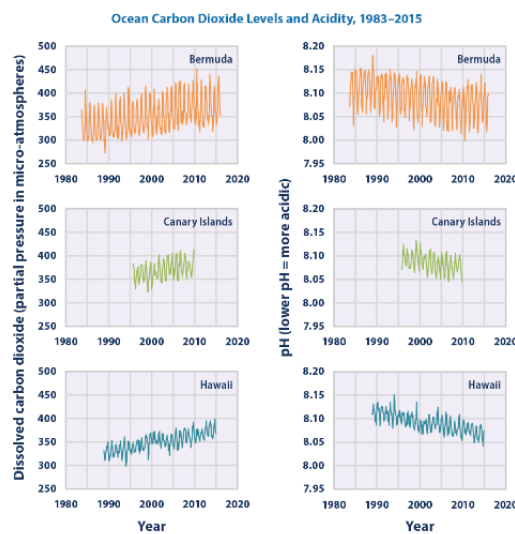
1.6.1. El pH de l'aigua marina i les seves problemàtiques

La mesura del pH serveix per a definir l'acidesa de l'aigua marina. El pH de l'aigua salada té un valor proper d'entre 7,8 i 8,2. El pH de l'aigua marina i costanera pot variar, per diferents motius com poden ser els estuaris i deltes, en aquestes aigües es troba que el rang del pH és d'entre 6,5 i 8. Les variacions naturals del pH a les aigües costaneres i oceàniques estan relacionades principalment amb els nivells de salinitat, tenint així un pH major a les aigües oceàniques que a les costaneres, ja que a major salinitat (conductivitat) es trobarà un pH més elevat. Caldrà remarcar que a partir de certs nivells de salinitat s'arriba a un punt de saturació on més salinitat no comporta una elevació del pH. Es troben variacions del pH segons la profunditat de les mostres d'aigua, com es pot visualitzar a la Imatge 8, això es pot relacionar directament amb les variacions de pressió, temperatura i de salinitat en funció de la fondària, on el perfil de variació és similar.



Imatge 8. Variació de la profunditat en funció de la profunditat. Font: Chen et al. (1996)

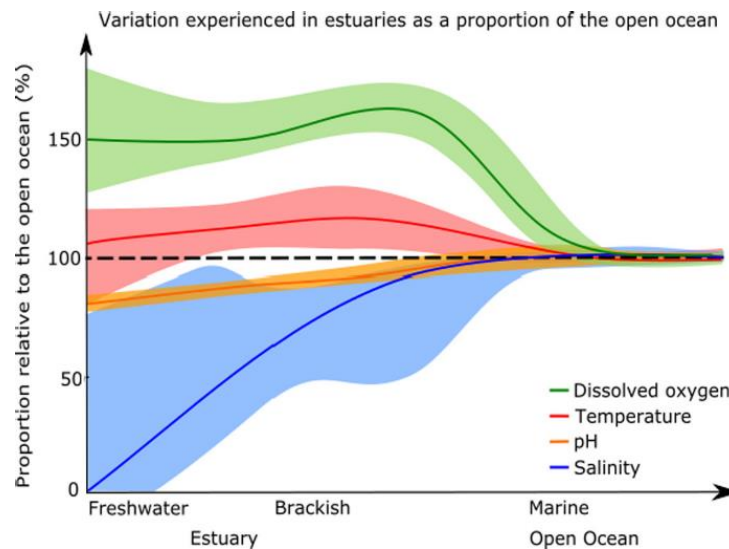
Les variacions del pH són degudes principalment a les variacions de carboni dissolt, l'alcalinitat, la concentració de ions d'hidrogen, i la temperatura. Els canvis d'aquests a les aigües esdevé un problema ambiental del més significatiu, degut a que tant la fauna com la flora marina està adaptada a uns certs nivells de pH per a poder sobreviure. És per això que l'acidificació de les aigües marines és un dels problemes més rellevants segons la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), i és que d'ençà que va començar la producció desmesurada per part del sistema capitalista actual el pH de l'aigua dels oceans ha disminuït en un 0,1 el seu valor, tractant-se d'una escala logarítmica com ho és la del pH, això significa que les aigües s'han acidificat prop d'un 30% (NOAA 2020).



Imatge 9. Increment del pH en funció del CO₂ dissolt a l'aigua marina. Font: EPA(E.E.UU)

Aquest increment de l'acidesa es degut principalment al canvi climàtic provocat per les emissions de CO₂. Els oceans absorbeix prop del 30 % del CO₂ present a l'atmosfera, aquests al ser absorbit per l'aigua provoca diferents reaccions químiques³ que fan augmentar la presència de ions d' hidrogen, provocant un increment del pH. Això significa que a majors nivells de CO₂ a l'atmosfera, major serà la quantitat que absorbiran les aigües provocant una major concentració de ions d'hidrogen.

Una de les altres causes de l'increment de l'acidesa de les aigües marines és el besament de les aigües tractades a les depuradores que s'aboquen prop de la costa, així com les aigües contaminades abocades per les indústries. Aquestes aigües vessades acostumen a tenir un rang de 7 pH, aquesta és més àcida que no pas l'aigua marina. La barreja d'aquestes aigües provoca una disminució del pH com es pot observar a la Imatge 10. L'evolució no és molt gran pel que fa als altres paràmetres, però cal recordar que aquest es mesura amb una escala logarítmica de manera que les petites variacions són molt significatives.



Imatge 10. Variació del pH amb la interacció del aigua desembocada als estuaris. Font: Lauchlan et al. (2020)

Tots aquests factors que alteren el pH de les aigües tenen un impacte directe en l'ecosistema marí. Estudis com els de Simpson et al. (2011) demostren que l'acidificació dels oceans pot provocar que diferents espècies animals com el peix pallaso no puguin detectar els seus depredadors, altres investigadors com Stiasny et al. (2016) assenyalen que aquesta acidificació també afecta a la vida de les larves de diferents espècies de peixos. En termes generals l'acidificació dels oceans comporta una disminució del carbonat, el qual és essencial per a la vida d'organismes com el plàncton, corals, o el creixement dels esquelets, closques i demés com assenyala CoastAdapt (2017), la qual és una plataforma de suport per a les decisions de mesures ambientals de la costa Australiana.

Tot i la negativitat de la disminució del pH de les aigües marines, hi ha organismes com les algues o altres plantes que es beneficien de l'excés del CO₂ que provoca part de l'acidificació, ja que aquesta substància és essencial per a la fotosíntesi. És per això que s'està investigant si el cultiu d'algues podria ajudar a disminuir l'acidificació actual, ja que aquestes consumirien el CO₂ que genera aquesta acidificació de l'aigua marina.

³ El diòxid de carboni, es absorbit per les aigües, dissolent-se en aquestes. LA combinació del CO₂ amb l'H₂O formen el conegut com a àcid carbònic(H₂CO₃), aquest és un àcid feble que acaba dissociant-se en ions hidrogen (H⁺) i ions bicarbonat (HCO₃⁻) (NOAA 2020).

1.7. Oxigen dissolt

Tant l'aigua salada com dolça té en la seva composició diferents gasos, com l'oxigen, el CO₂, el metà (CH₄), l'àcid sulfúric (H₂SO₄) o el nitrogen (N), sent els més abundants l'oxigen i el nitrogen. L'oxigen és un dels gasos amb més presència al planeta, i és a la vegada un dels elements principals que fan possible la vida tal com es coneix. L'oxigen dissolt (OD) a l'aigua junt amb la temperatura és una de les principals característiques per a determinar la seva qualitat segons molts autors. La mesura del OD es pot realitzar en unitat mg/L=ppm o en %, sent majoritàriament la primera opció la més utilitzada. L'oxigen dissolt (O₂) a l'aigua com el seu propi nom indica és la quantitat de gas oxigen que està dissolt en el medi aquós. Aquest és molt import degut a que l'oxigen és un dels precursors de la vida, del qual s'alimenten tot tipus d'organismes vius com plantes, animals, bacteris, entre d'altres.

La solubilitat de l'oxigen dissolt depèn de molts factors, però tots vindran a estar relacionats amb la llei de Henry (4), la qual relaciona la solubilitat amb la pressió parcial⁴ d'un líquid i amb la constant de solubilitat de cada gas.

$$C = K_h * P_p \quad (4)$$

- K_h: Constant de solubilitat dels gasos
- P_p: Pressió parcial

La solubilitat de l'oxigen, i dels gasos en general, depèn principalment de la temperatura, la salinitat i la pressió hidroestàtica. A l'aigua marina el OD és un paràmetre de vital importància, ja que està relacionat amb la salinitat del mar i la seva temperatura, variables que degut al canvi climàtic provocat per l'ésser humà i el sistema de consum actual es veuen alterades a les costes i als oceans. Com argumenta Wetzel (2001) un augment de la salinitat i de la temperatura a les aigües marines comporta un decreixement del OD, el que suposa un problema molt greu per als organismes vius presents a l'ecosistema marí. La disminució de la pressió és primordial per entendre els diferents valors de OD presentats a les aigües situades a diferents altituds, ja que la disminució de la pressió comporta una disminució de la pressió parcial (P_p). En relació a la temperatura, unes aigües amb baixa temperatura tindran valors de OD majors perquè com demostra Wetzel (2001) les temperatures baixes permeten emmagatzemar major quantitat de O₂.

La producció d'oxigen a les aigües costaneres i a l'oceà prové principalment de l'oxigen que absorbeixen les aigües de l'atmosfera, així com de la reaireació d'aquest i en una gran part també per la vegetació marina, la qual al realitzar la fotosíntesi consumeixen CO₂ per produir energia, d'aquest aprofitament energètic s'extreu com a subproducte l'O₂⁵, el qual es alliberat a l'aigua com a subproducte. Les onades, els seus trencaments, les corrents i els vents entre d'altres, són els precursors de la reaireació que adhereix l'oxigen als mars, així com la fotosíntesi, per tant, qualsevol dels factors que pugui alterar aquests fenòmens suposa un greu problema. Sarmiento (2005) assenyala al seu llibre *Ocean Biogeochemical Dynamics* que la meitat de l'oxigen a la terra és generat per el fitoplàncton, per la qual cosa la protecció d'aquest és fonamental per a la subsistència del planeta.

⁴ La pressió parcial es defineix com la pressió que exerceix un gas si aquest ocupa tot el volum de la solució.

⁵ Amb la fotosíntesi les plantes no només eliminen CO₂ i generen oxigen, sinó que també produeixen hidrats de carboni, els quals són fonamentals per a generar més plantes (vegetació).

1.7.1. L'oxigen dissolt de l'aigua marina i les seves problemàtiques

La manca d'oxigen a les aigües s'anomena hipòxia, i com ja s'ha esmentat en l'Apartat 1.7 l'oxigen al medi aquàtic és imprescindible per a la vida, tant pels animals com per a les plantes, com pels processos biològics i biogeoquímics dels mars i oceans. En l'actualitat la disminució de l'oxigen dissolt en l'aigua marina és un problema molt destacat segons la UNESCO (2018). Això està succeint des de la segona meitat del segle XX segons (Breitburg et al. 2018). Un dels principals factors que ha fet disminuir el OD a les aigües marines han estat l'excés de nutrients abocats a les aigües. L'excés de nutrients com el fòsfor o els nitrats provoquen la fertilització de les aigües, el que comporta el creixement de microorganismes com les microalgues, les quals proliferen i s'expandeixen, generant en les costes un consum excessiu d'oxigen, variant així l'ecosistema natural existent (Bennett et al. 2001).



Imatge 11. Eutrofització de l'aigua costanera. Font: projecteutrophication.weebly.com

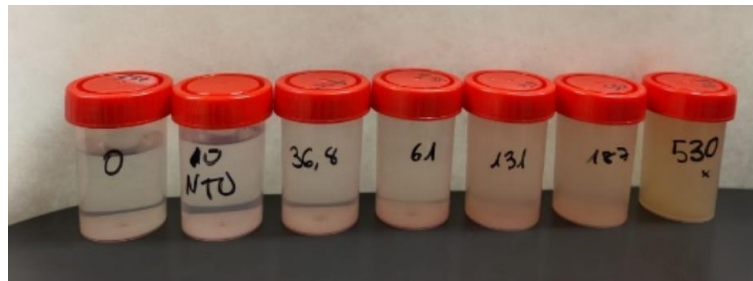
Aquest excés de nutrient és degut principalment al vessament d'aigües residuals, l'excés de reg i fertilitzants als camps de cultius o a la contaminació de les aigües deguda als purins, que poden arribar a contaminar les aigües subterrànies que comuniquen amb les aigües costaneres. A Catalunya la contaminació de les aigües potables és un gran problema i esdevé un repte pel futur⁶. L'eutrofització de les costes esdevé un greu problema, ja que el consum excessiu d'oxigen provoca la disminució d'aquest i pot provocar la mort i la desaparició de diferents espècies d'animals i vegetals, degut a que les espècies existents són aquelles que estan adaptades a un medi determinat, i a certs nivells de OD. Els investigadors Mishra et al. (2021) han observat la mort de diferents espècies de peixos per culpa del creixement excessiu de microalgues, relacionant la mort de diferents espècies amb les variacions de OD, pH, i salinitat. Un dels altres factors que provoca la hipòxia en les aigües costaneres és el canvi climàtic. Aquest està afectant greument al medi marí, ja que l'augment de la temperatura i salinitat de les aigües tant oceàniques com costaneres provoquen el decreixement del OD a les aigües.

⁶ En el marc de la gestió de la contaminació de les aigües soterrades per excés de reg i de fertilitzants, es va presentar un projecte conjunt amb altres estudiants al Recircula Challenge 2022, d'una sonda multiparamètrica LC i DIY per al control de la gestió de l'ús de fertilitzants (Vegeu Annex A9).

1.8. Terbolesa

La terbolesa és un dels paràmetres bio-físicoquímics que indica el que esdevé un indicador estètic per avaluar la claredat de l'aigua (Tosic et al. 2013). La terbolesa es basa en la dispersió mitjana de la radiació de la llum en un medi líquid, aquesta és causada per les partícules en suspensió que es troben a l'aigua. Entenent la dispersió de la llum com el canvi de direcció de les diferents ones de llum emeses degut a la presència de partícules no dissoltes, la mesura de la dispersió de la llum es podrà realitzar determinant l'atenuació d'una font d'emissió de llum o avaluant la intensitat de la radiació de la llum emesa (ISO 7027:1990).

Les partícules no dissoltes que provoquen la terbolesa podran ser d'origen orgànic e inorgànic, normalment la terbolesa és causada pel transport de sediments, per l'excés de nutrients originats pel creixement de la vegetació (Hope et al. 2020), per les algues i els seus processos biològics (F. Gohin 2011), el Fitoplàncton, i altres microorganismes. Aquestes causes de la terbolesa són d'origen natural, però l'activitat de l'ésser humà també afecta a la terbolesa, ja sigui pel dragatge (Schoellhamer 1996), la pesca d'arrossegament (Mengual et al. 2016), el basament de canonades o residus d'hidrocarburs.



Imatge 12. Mostres d'aigua tèrbola. Font: Pròpia.

Les unitats de mesura de la terbolesa estan estandarditzades per la ISO 7027-1:2016, on es defineixen dues unitats estandarditzades, els *Nephelometric Turbidity Unit* (NTU), i els *Formazin Nephelometric Unit* (FNU), aquestes dues unitats s'utilitzaran en relació amb el mètode de funcionament del sensor⁷. Actualment la majoria d'estudis utilitzen com a unitat de mesura els NTU⁸. Aquesta unitat deu el seu nom a l'instrument conegut com a nefelòmetre, instrument que serveix per mesurar la dispersió de les partícules en suspensió en un medi. Històricament, les unitats de la terbolesa eren els JTU, que devia el seu nom al turbidímetre d'espelma de Jackson, que va ser el primer instrument per mesurar la terbolesa. Aquest mètode de mesura s'ha deixat d'utilitzar als assajos convencionals degut a que no pot mesurar per sota de 25 NTU, a més que necessita d'una instrumentació que complica els assajos in situ.

Els valors mitjans de la terbolesa segons la consideració d'aquesta es poden veure a la Taula 3.

Taula 3. Rangs de terbolesa. Font: Pròpia.

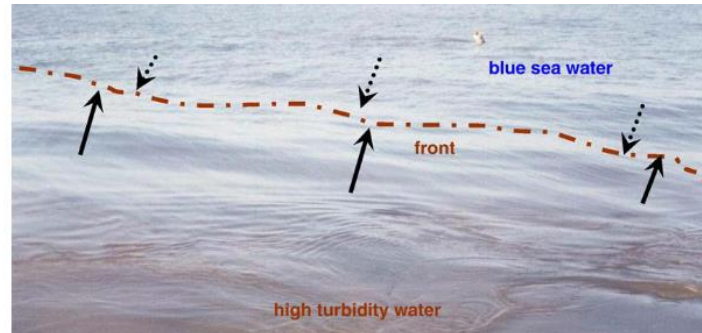
Qualitat	Terbolesa (NTU)
Aigua consumible	1 – 5
Riu	1-8
Aigües costanera	1-200
Aigües oceàniques	1-50

⁷ Els FNU s'utilitzen quan els sensors de terbolesa utilitzen una font de llum infraroja, mentre que els NTU s'utilitzen quan els sensors usen com a font de llum blanca.

⁸ Les organitzacions internacionals que estableixen els índexs de qualitat de l'aigua ofereixen aquests estàndards en NTU.

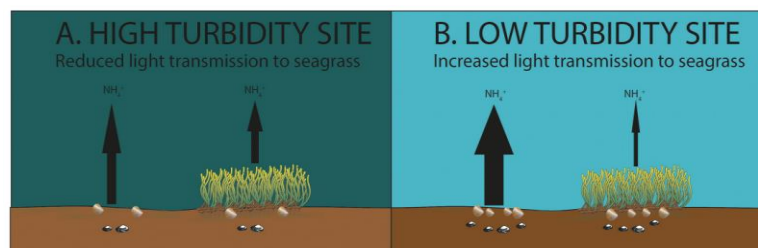
1.8.1. La terbolesa de l'aigua marina i les seves problemàtiques

La terbolesa és un paràmetre d'una gran importància en l'àmbit costaner, ja que aquesta és provocada per diversos factors ambientals naturals o provocats per l'ésser humà, per lo que serà de gran importància per controlar diferents fenòmens que succeeixen a la costa. En l'àmbit marí la terbolesa s'observa notablement en regions costaneres, i en els estuaris segons Shi et al. (2010). En aquestes localitzacions està demostrat que la terbolesa varia estacionalment, sent això objecte d'estudi en la actualitat, ja que una aigua costanera molt tèrbola és una aigua amb una gran quantitat de partícules no dissoltes, el qual és un greu problema.



Imatge 13. Diferents zones tèrboles de les aigües costaneres. Font: Shi et al. (2010).

Tenir una gran concentració de partícules no dissoltes a l'aigua costanera és tradueix en el fet que aquestes absorbiran la llum que els hi arriba, no permetent una correcta transmissió de la llum al medi marí, més l'absorció de la llum per part de les partícules, el qual comportarà un augment de la temperatura de les aigües superficials segons Rajwa et al. (2015), la qual cosa afecta de manera directa a la concentració d'oxigen dissolt de l'aigua. Que la llum del sol no penetri correctament a les aigües costaneres representa un greu problema per a l'ecosistema, ja que aquesta llum és necessària per a diversos processos biològics de la flora i fauna marina. És per aquest motiu que es pot relacionar la terbolesa amb diferents problemàtiques, com la influència d'aquesta en la productivitat i la diversitat en la zona bènica (Bigham et al. 2020) o les alteracions i dificultats per realitzar la fotosíntesi per part de la flora així com a la irregular distribució de l'herba marina (Iverson et al. 1986).



Imatge 14. Efecte de la terbolesa en la flora marina. Font: Bulmer et al. (2018)

La falta de penetració de la llum solar pot afectar també a la supervivència dels ous segons Fiksen et al. (2022), així com també a la conducta dels animals com van demostrar Chivers et al. (2013), els quals destaquen que l'augment de la terbolesa dificulta les capacitats d'alguns peixos (d'aigua dolça sobretot) de conèixer i distingir depredadors, així com també poden acabar amb les brànquies obturades. La mesura de la terbolesa es pot utilitzar com una mesura indirecta per al control de la biomassa i la productivitat del fitoplàncton als estuaris com assenyala Cloern (1987), també pot fer servir per mesurar el canvi del fons marí. Això és així per culpa de les conegudes com a corrents tèrboles, originades pel transport de sediments o fangs que s'ubiquen a la plataforma continental, això sumat a les corrents oceàniques poden erosionar grans territoris i fins i tot crear canyons submarins.

1.9. Salinitat

La salinitat és pot definir primàriament com a la quantitat total de sòlids dissolts en un kilogram d'aigua de mar, quan el carbonat ha sigut oxidat, i el bromur i el iode han estat reemplaçats per clor (Pilson 1998). Per a determinar la salinitat es pot fer mitjançant l'anàlisi o bé de Clor present en una solució d'aigua de mar o bé segons la conductivitat de la solució, essent aquesta molt més simple de implementar. Es per aquest motiu que la mesura de la salinitat està íntimament lligada amb la de la conductivitat, així ho va definir la UNESCO al 1978, que va establir la fórmula (5) per a poder determinar la salinitat en funció de la conductivitat (UNESCO 1978).

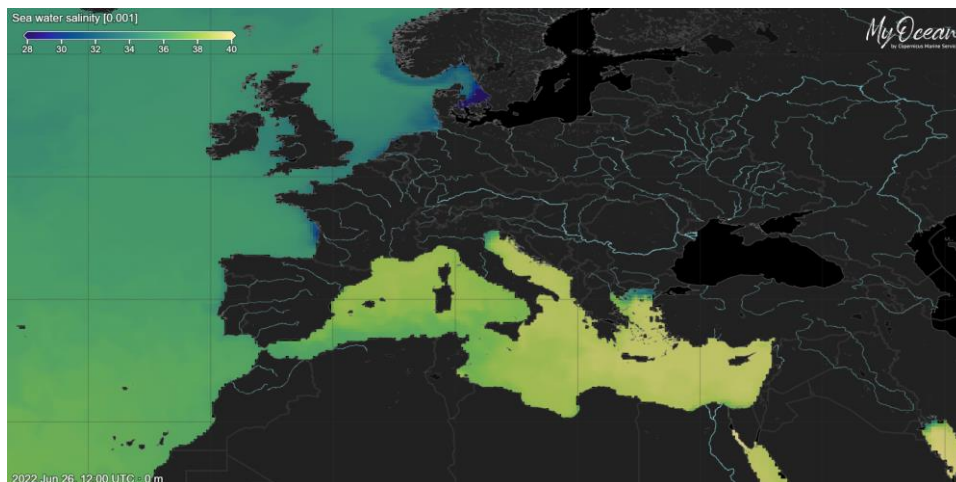
$$S = a_0 + a_1 R_t^{\frac{1}{2}} + a_2 R_t + a_3 R_t^{\frac{3}{2}} + a_4 R_t^2 + a_5 R_t^{\frac{5}{2}} + \frac{t-15}{1+k(t-15)} (b_0 + b_1 R_t^{\frac{1}{2}} + b_2 R_t + b_3 R_t^{\frac{3}{2}} + b_4 R_t^2 + b_5 R_t^{\frac{5}{2}}) \quad (5)$$

- A, b i k: Coeficients constants
- t: temperatura °C
- R_t: Ratí de conductivitat

La conductivitat d'una substància es defineix com la capacitat que té aquesta de deixar passar un corrent elèctric. L'aigua de mar té una gran quantitat de sals dissoltes, aquestes són conductores de l'electricitat, essent el NaCl el més predominant i és per això que s'estableix aquesta relació entre la salinitat i la conductivitat que té una precisió del 0,003 mS/cm respecte a la salinitat, aquest error és degut a les variacions constants del diòxid de silici (SiO₂).

Les unitats de mesura de la conductivitat elèctrica són els S/m, que deriven de 1/Ohm*cm, la majoria d'anàlisis oceanogràfics de la conductivitat s'expressen en mS/cm, tot i que també és comú utilitzar g/L. Tot i això, la salinitat suposada s'acostuma a expressar en unitats adimensionals de PSU (*Practical Salinity Units*), aquesta unitat va ser establerta per la UNESCO, quan es va definir l'escala pràctica de salinitat de la qual deriva la fórmula (5). Aquestes unitats per expressar la salinitat no són acceptades per moltes organitzacions com diu Pawlowicz, R. (2013) "*Normally incorrect and strongly discouraged*". Es farà una generalització, i s'assumirà que PSU ≈ g/L. La mesura de la conductivitat necessària per a determinar la salinitat és realitza mitjançant els conductímetres, que són aparells electrònics que mesuren la variació del corrent elèctric generat al transmetre a la solució un voltatge altern, que es veu alterat a l'entrar en contacte amb la substància d'anàlisi.

La distribució de la salinitat varia segons els mars, oceans així com també varia en funció de la profunditat com s'ha esmentat anteriorment. A la Imatge 15 es pot observar la distribució de la salinitat al mar mediterrani, en unitats de PSU ≈ g/L.



Imatge 15. Distribució de la salinitat en PSU. Font: MyOcean Viewer i Pròpia.

1.9.1. Variació de la conductivitat en funció de la temperatura

Com ja s'ha esmentat amb anterioritat la conductivitat varia amb la temperatura, això és degut principalment a què amb l'augment de la temperatura comporta una major mobilitat dels ions Cl^+ de la solució (UNESCO, 1981), provocant l'augment de ions a l'aigua deguda a la dissociació de les molècules, així que a més temperatura major mobilitat dels ions Cl^+ , i, per tant, major nombre de ions, el que provoca l'augment de la conductivitat. És per aquest motiu que és molt important la temperatura en la mesura de la conductivitat. Per intentar pal·liar l'efecte que té la temperatura a les mesures s'utilitzen diferents mètodes per a compensar aquests efectes. La temperatura per a la correcta mesura de la conductivitat de l'aigua és de 25 °C, segon la normativa ISO 7888:1986, per tant, les compensacions de temperatura seran respecte els 25 °C, per realitzar-les cal esmentar que existeixen la compensació de temperatura lineal i la no lineal. Per poder-les fer cal determinar un coeficient de variació, la principal diferència entre el mètode lineal i no lineal és que un assumeix que el coeficient roman constant per a totes les temperatures, el que no és cert. Tot i saber això normalment s'assumeix la incertesa del mètode lineal, ja que la complexitat que requereix elaborar un mètode per a la compensació no lineal podria ser objecte d'un altre estudi.

Els mètodes lineals estableixen coeficients de compensació segons els rangs de temperatura, tot i molts cops es generalitza i es diu que la conductivitat s'incrementa o disminueix un 2% per cada grau unitari °C de temperatura (Hayashi 2004). La fórmula proposada per a la compensació lineal és la fórmula (6).

$$EC_{t0} = EC_t / [1 - c(t - t_0)] \quad (6)$$

- EC_t : Conductivitat a la temperatura ambient
- t : Temperatura de referència $t=25$ °C
- t_0 : Temperatura ambient
- c : Coeficient de compensació

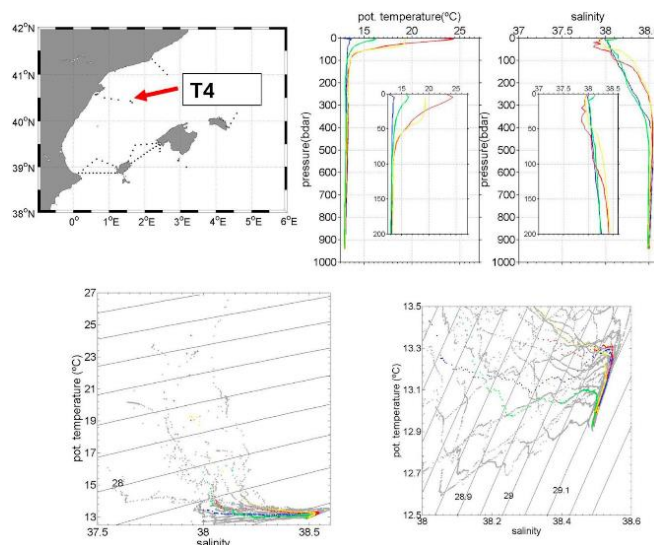
Per tal que el sensor de conductivitat adquirit per al projecte tingui en consideració els canvis de la conductivitat segons la temperatura, el coeficient escollit per al sensor del prototip a desenvolupar ha estat de $c=0,0187$, amb aquest l'error màxim en la mesura de la conductivitat segons (M. Hayashi, 2004) l'error màxim és del 2,4%. Aquest mètode proposat és coherent per a temperatures de treball d'entre els 0-30 °C, puix que la relació conductivitat-temperatura segueix una certa linealitat, que en altres rangs no ho faria.

1.9.2. La salinitat de l'aigua marina i les seves problemàtiques

Com ja s'ha comentat amb anterioritat la salinitat és un paràmetre de vital importància en els processos tan químics, físics o biològics del medi marí. La importància de la salinitat recau en el fet que aquest afecta a la circulació termohalina, i la variació d'aquesta esdevé un factor de risc per a tot l'ecosistema marí que avui dia és imprescindible per pal·liar les greus agressions rebudes per part de l'ésser humà, i és que un dels majors problemes actuals en l'oceanografia química i física són deguts a l'augment de la salinitat a nivell global, i en especial en determinades zones costaneres com els estuaris. Aquest augment suposa un greu problema per a la subsistència d'espècies i per a l'ecosistema marí. La salinitat és un factor essencial en la reproducció, de larves, la distribució geografia i en el comportament de les espècies marines (Cuesta i Spivak 2009). Lin et al. (2001) van assenyalar l'impacte de les variacions de temperatura i salinitat a llarg termini al mar de Boahi, confluït que aquestes variacions afectarien tant a la subsistència d'espècies animals, com a la producció total de la biomassa.

La majoria de les problemàtiques relacionades amb la salinitat deriven del canvi climàtic, i és que Turner et al. (2021) assenyalen que l'escalfament terrestre i dels oceans que s'observa des del 1950 ha provocat el canvi en les corrents oceàniques (Wood et al. 2003). Per altra banda, els diferents models predictius realitzats per Durack et al. (2012) assenyalen que per culpa de l'escalfament global provocat pel canvi climàtic a les zones humides augmentaran les precipitacions i a les zones més seques es reduiran, el que provocarà un canvi en la salinitat de les aigües segons la seva ubicació canviant així el perfil salí i molt possiblement afectant les corrents marines derivades de les diferències de densitats entre les estratificacions de l'aigua marina. En aquesta línia, Olmedo et al. (2022) han observat mitjançant dades de satèl·lits, l'increment de les estratificacions a causa de les variacions en la salinitat de les aigües superficials. Això podria ser un greu problema per a zones on les estratificacions de l'aigua són molt importants per als seus ecosistemes com els estuaris, ja que com assenyalen Cloern et al. (2017) el gradient de salinitat dels estuaris té un impacte directe en la variabilitat del seu ecosistema.

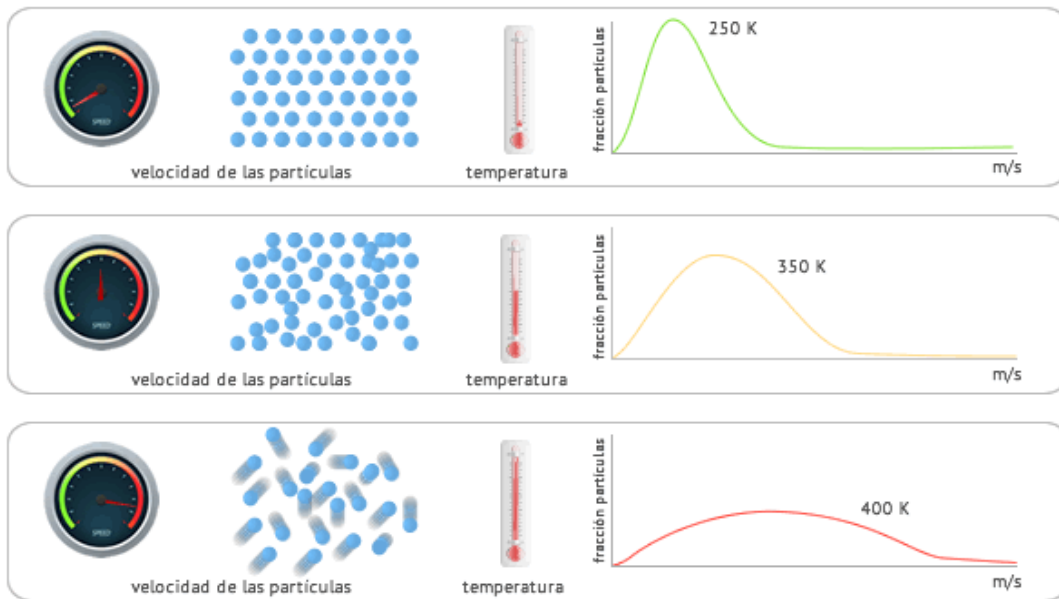
La densitat de l'aigua del mar es pot relacionar directament amb la salinitat i la temperatura de l'aigua. Aquesta diferència de densitats que es troben al mar a mesura que augmenta la profunditat s'anomenen estratificacions, i és que a mesura que augmenta la profunditat la salinitat varia (Vegeu la Imatge 16), formant així masses d'aigua que per diferència de densitats generen les corrents oceàniques.



Imatge 16. Distribució de la salinitat en funció de la profunditat. Font: Vargas et al. (2017).

1.10. Temperatura

La temperatura és una variable física de la matèria, la qual determina la calor o fred d'un cos o substància. La temperatura està relacionada amb la quantitat d'energia tèrmica que contenen els cossos, aquesta energia tèrmica està derivada del moviment de les partícules el qual es tradueix en energia cinètica, per la qual cosa es pot generalitzar dient que la temperatura d'un cos està determinada per l'energia cinètica de les seves partícules, com més moviment tenen les partícules major serà la temperatura del cos i viceversa.



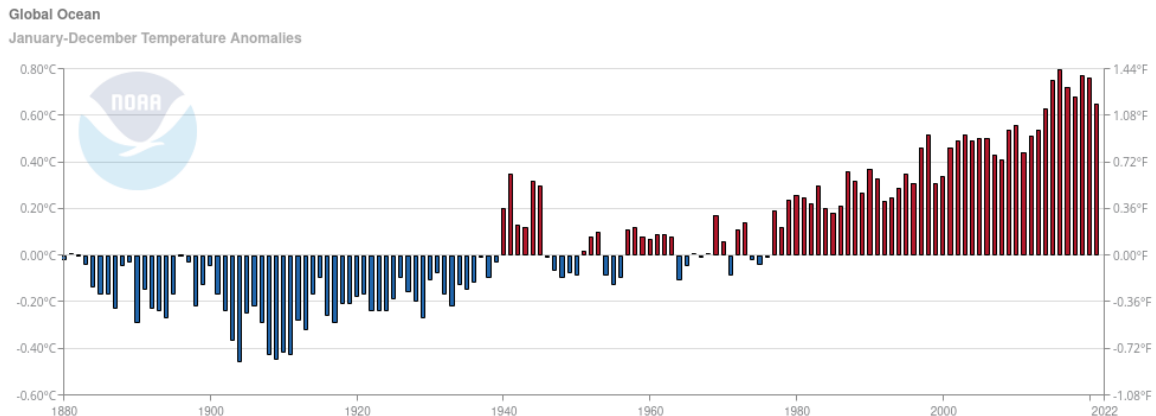
Imatge 17. Representació de la temperatura en funció del moviment de les seves partícules. Font: Fisicalab.com

La temperatura d'un cos pot variar per conducció, convecció o radiació. En el cas dels oceans les variacions més importants de la temperatura en les masses d'aigua venen determinades per la radiació solar, però són molts els factors que poden alterar la temperatura d'un cos, essent la pressió i el volum els valors que alteren majoritàriament la temperatura de gasos líquids i sòlids. Per a la mesura de la temperatura es fa ús dels termòmetres els quals es poden basar en les variacions de bases de dilatació, de propietats elèctriques o de la radiació tèrmica. Són cinc les unitats conegudes per a determinar la temperatura, però les tres principals són els Graus Celsius, els Grau Kelvin i els Graus Farheein. Per al Sistema Internacional d'Unitats les unitats a utilitzar són els Grau Kelvin, però majoritàriament s'utilitzen els graus Celsius com a unitat indicativa, però si s'han de fer operacions i càlculs aquests s'han de realitzar en graus Kelvin.

1.10.1. La temperatura de l'aigua marina i les seves problemàtiques

La temperatura en el medi marí és molt important, ja que aquesta influeix en molts paràmetres com el pH, la salinitat o l'OD, entre d'altres. A més l'increment o decreixement de la temperatura influeix directament en la densitat de les diferents columnes d'aigua que formen les corrents oceàniques, així com també suposa un problema molt rellevant per a les diferents espècies vegetals i animals que habiten el medi marí.

Des de la fi de la primera revolució industrial al 1860 les emissions de CO₂ a l'atmosfera no han fet més que incrementar, provocant l'escalfament global i el deteriorament de la capa de Ozó, la qual ofereix protecció al planeta terra davant la radiació solar, així com dels de rajos ultraviolats (UV), nocius per a l'esser humà com els UV B i C. Aquest escalfament global al qual s'està assistint des de finals del segle XIX ha provocat que mars i oceans absorbeixin aquesta calor sobrant. La temperatura global de mars i oceans s'ha incrementat en els últims cent anys en 0,13 °C, i és que els investigadors e investigadores assenyalen que mars i oceans han absorbit prop del 93% del calor addicional emmagatzemat en el terra, el mar, el aire i del gel fos entre el 1971 i 2010 segons les Nacions Unides (2017).



Imatge 18. Anomalies en la temperatura de la zona superficial de les aigües marines: Font: noaa.gov

L'augment de la temperatura a les aigües costaneres i oceàniques té un impacte negatiu en la reproducció de moltes espècies marines, investigacions com les de Pankhurst et al. (2011) assenyalen que la temperatura és un dels paràmetres més importants per a la subsistència i reproducció dels peixos, altres com Volkoff et al. (2020) destaquen els efectes de la temperatura de les aigües en la digestió de diferents espècies de peixos, de forma que un increment en aquestes aigües pot provocar la mort de les espècies. Però sense cap dubte són les espècies corals les més afectades per l'increment de la temperatura del seu hàbitat, així ho assenjala l'IPCC (2021), que remarca l'efecte que té l'estrès tèrmic en els corals, provocant el conegut com a *Coral Bleaching*, és a dir el emblanquiment del coral, que és produït pel fet que els corals no poden mantenir les microalgues dels seus teixits, ja que la temperatura és crucial per aquestes espècies, provocant així la despigmentació del coral (Goreau et al. 2008).

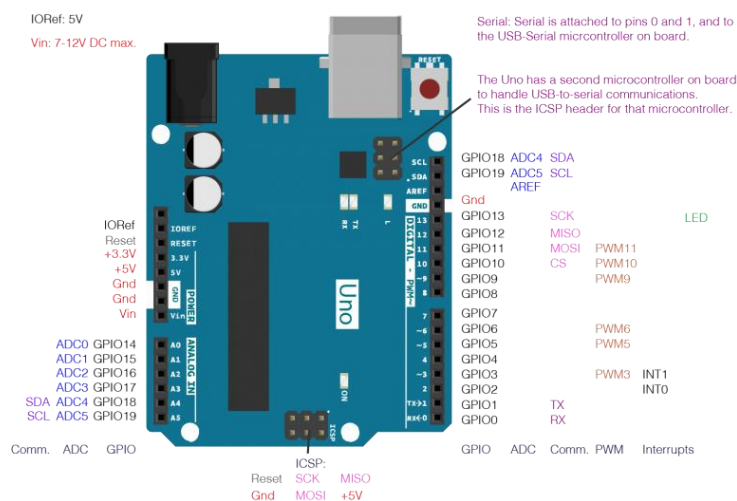
La distribució de la temperatura en els mars i oceans disminueix a mesura que augmenta la profunditat de les aigües així com també augmenta la pressió. Segons les estratificacions es troben diferents temperatures, ja que aquestes són derivades de la salinitat, la pressió i temperatura de les diferents masses d'aigua. En els primers 200 m de profunditat la temperatura es manté regularment estable, mentre que als 1000 m de profunditat, on comença la zona coneguda com a Termoclina el perfil canvia radicalment, disminuït mínimament fins arriba al fons marí.

Capítol 2. Mètodes

2.1. Tecnologia Arduino e instrumentació de baix cost

Són molts els tipus de sensors que existeixen per poder a mesurar un mateix paràmetre, en la instrumentació convencional els diferents sensors acostumen a tenir la seva pròpia base electrònica, o poden estar connectades a *dataloggers*, en el cas d'aquest projecte LC i DIY, s'utilitza un microcontrolador de codi obert com l'Arduino Uno, per tal de controlar els sensors de baix cost. Generalment, s'utilitza el nom Arduino⁹ per a designar a un tipus de placa impresa basada en un microcontrolador amb hardware i software lliure, la qual és compatible amb el software de programació Arduino IDE.

Aquests microcontroladors disposen d'interfícies d'entrada i de sortida, aquestes interfícies estan compostes per ports analògics i digitals als quals s'hi poden connectar diferents perifèrics com sensors, pantalles LCD i d'altres.



Imatge 19. Parts i elements de un microcontrolador Arduino. Font: aprendiendoarduino.wordpress.com

Els microcontroladors únicament interpreten dos valors, el 0 i l'1, i és per això que els ports analògics requereixen un convertidor ADC. Aquest convertidor té una resolució de 10 bits per la qual cosa pot retornar 1024 nombres enters, mentre que els ports digitals tenen suficient amb la lectura binària de zeros i uns. Els microcontroladors tipus Uno, estan compostats de 6 entrades analògiques i 14 digitals i poden subministrar un voltatge de treball de 3,3 i 5 V, així com disposen també de tres pins de terra. Són molts els tipus de microcontroladors comercialitzats actualment per a projectes LC i DIY, on cadascun ofereix unes prestacions o d'altres, majoritàriament en funció dels pins analògics i digitals, així com de la seva mida. Els diferents perifèrics que es connecten en aquests microcontroladors com els sensors LC estudiats en el projecte, van connectats a ports analògics i digitals. El que aquests sensors enregistren són variacions d'algun principi físic, això depèn del tipus de sensor, però majoritàriament són les variacions de voltatge les que s'escalen per tal d'establir lectures en valors i unitats estàndards del paràmetre mesurat. Els diferents sensors realitzaran variacions del voltatge de lectura a causa d'algun canvi físic de la propietat mesurada. Pel que fa als sensors analògics els valors aniran entre el 0 i el 1023, mentre que les sondes digitals enregistren 0 i 1, en 8 bits.

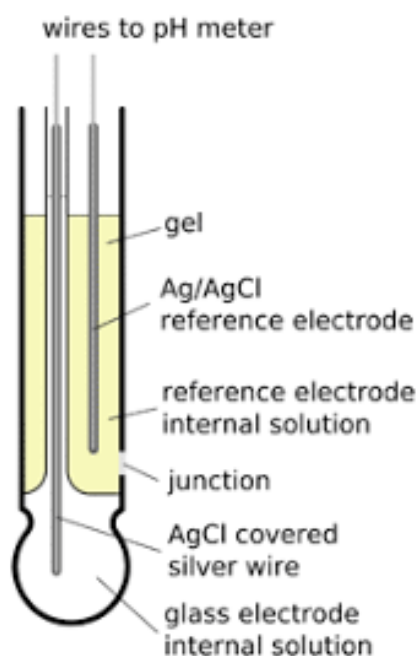
⁹ Arduino és el nom de una marca molt popular que comercialitza amb microcontroladors de hardware i software oberts. S'utilitza el nom d'aquesta marca per a designar aquest tipus de dispositius, degut a la seva popularitat

2.2. Sensors de qualitat de l'aigua

2.2.1. Sensors de pH

Els sensors de pH serveixen per a determinar l'acidesa d'una substància, ho fan utilitzant una escala logarítmica que va de 0 a 14, com ja s'ha esmentat amb anterioritat. Tots els sensors de pH tenen una forma constructiva i un funcionament molt similar, la precisió dels diferents sensors dependrà principalment de la qualitat constructiva i dels materials emprats per a la seva confecció.

La determinació del pH és molt difícil de mesurar directament, però es pot fer utilitzant l'efecte del potencial elèctric d'un elèctrode de vidre, ja que aquest és bastant proporcional al pH (Pilson 1998). Les sondes de pH acostumen a ser de vidre on dins d'aquest s'ubiquen dos elèctrodes, un elèctrode de referència i un altre elèctrode intern encarregat de la mesura. A la punta de la superfície de l'embolcall de vidre s'hi troba l'anomenada Glass Membrane (GM). El líquid que està en contacte amb l'elèctrode de referència es troba habitualment en un espai estancament diferenciat, de l'elèctrode de mesura. Aquest líquid és essencial, ja que està en contacte constant amb l'elèctrode de referència proporcionant un nombre de ions de H^+ constant dins la membrana de vidre. A la Imatge 20 es pot observar la composició d'una sonda de pH convencional.



Imatge 20. Parts de una sonda convencional de pH. Font: ph-meter.info

El funcionament del sensor de pH es basa, en el fet que a l'entrar en contacte el sensor amb qualsevol substància líquida, els ions de H^+ de la substància s'intercanvien amb els ions carregats positivament de la membrana de vidre, generant així un potencial electroquímic en l'elèctrode de l'interior del sensor. És per això que es pot asseverar que els sensors de pH es basen en la diferència de potencial entre les dues membranes, generada per la quantitat de ions d'hidrogen, que estan inversament relacionats amb els OH^- . La diferència de potencial entre els dos elèctrodes es tradueix a unitats de pH, la sensibilitat de la GM en la interacció dels ions fa possible el seu funcionament. Actualment, s'estan generant diferents sensors amb materials polimèrics com a substituents dels vidres emprats, però aquests presenten una menor precisió.

Sensor de pH ASHTA

El sensor de pH escollit per al projecte va estar el sensor de la marca ASHTA. Aquest té un aspecte convencional, pel que fa al seu estil constructiu, es pot apreciar tant l'elèctrode de referència com l'elèctrode intern a la Imatge 21. En el projecte primerament es va escollir el sensor de la marca GAOHOU el qual a causa d'un problema de caire electrònic pel que fa a la placa transformadora del voltatge no va donar els resultats esperats, és per això que es va adquirir darrerament el sensor que finalment va ser utilitzat. Però per tal de poder fer la comparació entre les diferents instrumentacions es va comprar un altre placa transformadora de voltatge de pH per poder realitzar els calibratges i observar la precisió que presentaven cadascuna d'elles.



Imatge 21. Sensor de pH ASHTA. Font: Pròpia.

Taula 4. Especificacions dels sensors de pH. Font: Pròpia

Especificacions	ASHTA Sensor de pH	GAOHOU Sensor de pH
Voltatge d'alimentació	5,0V	0,2~5.0V
Voltatge de sortida	0~3.2V	0~3,2
Precisió	±0,1 pH	±0,1 pH
Temperatura de treball	0~80°C	-10~50 °C
Rang de treball	0~14 pH	0~14 pH
Cost (Euros)	49,01	30,99

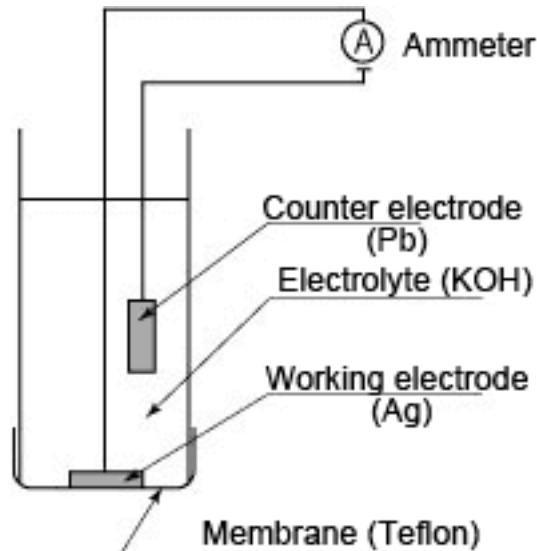
Per poder establir quin dels dos sensors utilitzar es van realitzar els calibratges al laboratori i es va observar quin presentava valors de lectura més estables al llarg d'un període de 3 minuts, sent la sonda de la marca ASHTA l'escollida per a utilitzar al projecte.



Imatge 22. Placa convertidora del sensor de pH. Font: Pròpia.

2.2.2. Sensors d'oxigen dissolt

El sensor d'oxigen dissolt serveix per a poder determinar la quantitat de gas oxigen dissolt present a l'aigua, la majoria de sensors acostumen a representar aquesta mesura en ppm o el que és igual, en mg/L, però existeixen diferents sensors de OD que expressen aquest en %, el qual representa total l'oxigen dissolt present, que no és el mateix que l'oxigen dissolt en una solució. Els sensors de OD convencionalment utilitzen un elèctrode tipus Clarck per a determinar la quantitat de mg/L de OD present a les solucions, aquest sistema també és conegut com el mètode del elèctrode de membrana. La disposició d'aquest tipus de elèctrode pel que fa a la constitució dels sensors de OD, es la que es pot observar a la Imatge 23.



Imatge 23. Parts de una sonda convencional de oxigen dissolt que utilitza el mètode de cel·les galvàniques. Font: instrumentationtools.com

Per a la mesura del OD mitjançant un elèctrode de membrana, existeixen dos mètodes diferenciats, el de cel·les galvàniques i el de polarografia. Els dos mètodes presenten una construcció similar on tenen un elèctrode dividit en dues parts, on una part representa l'elèctrode de treball i l'altre representa l'elèctrode de mesura, aquest últim es troba submergit en un electròlit, on aquest elèctrode està en contacte amb una membrana.

La diferència entre els dos mètodes, és que el primer es basa en el fet que un cop submergit el sensor a l'aigua, l'oxigen present travessa la membrana reduint-se en l'elèctrode de treball, generant així un corrent que és mesurat per la part de l'elèctrode que és d'un material diferent, el que permet mesurar aquest corrent de reducció, aquest corrent enregistrat és proporcional a la concentració d'oxigen dissolt a l'aigua, mentre que el segon mètode, el de polarografia utilitza elèctrodes de plata, clorur de plata i or al igual que el mètode per cel·les galvàniques, i també es produeix una reducció en l'elèctrode, però en aquest cas es genera el que es coneix com a una corrent limitant polarogràfica que és la que s'estableix com proporcional al oxigen.

Sensor d'oxigen dissolt Atlas Scientific Mini Lab Grade

El sensor d'oxigen dissolt utilitzat per al projecte va estar el Atlas Scientific Mini Lab Grade, aquest sensor de OD és del tipus elèctrode de membrana per cel·les galvàniques, i segons les especificacions aquesta únicament funciona per a establir els valors de OD en %. Més endavant s'explicarà quines generalitzacions es van fer per poder enregistrar les lectures en mg/L. A banda d'aquest sensor es van considerar dos sensors més, de les marques DFRobot i Atlas Scientific. Les característiques de cadascun dels sensors es troben a la Taula 5.

Taula 5. Especificacions dels sensors de oxigen dissolt. Font: Pròpia.

Especificacions	Atlas Scientific Mini Lab Grade	DFRobot Analog Dissolved Oxygen Sensor	Atlas Scientific Dissolved Oxygen Kit
Voltatge d'alimentació	3,3~5,0V	3.3~5,0V	3.3~5,0V
Voltatge de sortida	0~0,42V	0~3 V	0~0,42V
Precisió	±0,2 mg/L	±0,1 mg/L	±0,05 mg/L
Temperatura de treball	1~50°C	0~40 °C	1~50°C
Rang de treball	1 ~50 mg/l	0 ~20 mg/l	0,01 ~100 mg/l 0,1~400 % Saturació
Cost (Euros)	125,46	147.85	290,71

Dels tres sensors el que millors prestacions presentava era el model Dissolved Oxygen Kit de Atlas Scientific, però el cost d'aquest sensor era molt elevat. Per tal de reduir costos, i poder demostrar com viable és realitzar una sonda multiparamètrica LC es va decidir optar pel sensor més econòmic, el Mini Lab Grade de Atlas Scientific, que tot i mesurar el OD en %, es va assumir que podria ser calibrat de tal manera, que es poguessin obtenir valors de OD en mg/L.

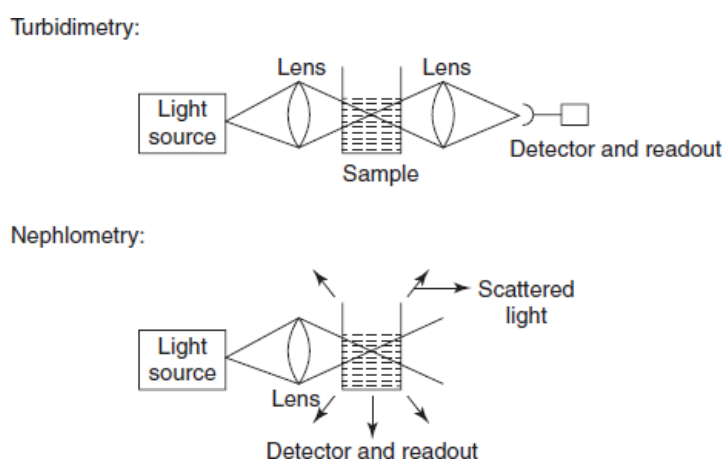


Imatge 24. Sensor de OD Atlas Scientific Mini Lab Grade. Font: Pròpia.

2.2.3. Sensor de terbolesa

La terbolesa és el paràmetre que mesura la claredat de l'aigua, la mesura d'aquest paràmetre és realitzada en Unitats Nefelomètriques (NTU), ja que la mesura més precisa per a determinar la claredat de l'aigua es pren amb un Nefelòmetre. Per a poder determinar la terbolesa els instruments poden utilitzar diferents sistemes, dividint-se en dues classes d'instruments per a la seva mesura, els nefelòmetres i els turbidímetres. Únicament aquests sistemes estan reconeguts per la ISO 7027.

El nefelòmetre basa el seu funcionament en la dispersió de la radiació de la llum que travessa un medi des de l'emissor d'aquesta fins a un receptor (Lawler 2016). Si al medi on s'ha enviat la llum existeix matèria no dissolta la llum es dispersa per totes les direccions, i com a conseqüència la intensitat de la llum que rep el receptor és menor. Amb aquest mètode es mesura la radiació dispersa per les partícules en un angle diferent del de la direcció de la radiació incident.



Imatge 25. Diferències entre els turbidímetres i els nefelòmetres. Font: ee2-nitk.vlabs.ac.in.

Per altra banda, els turbidímetres a diferència dels nefelòmetres mesuren la disminució de la intensitat de la llum detectada després de travessar el medi líquid (Lawler 2016). Aquests presenten un major rang d'actuació però una menor resolució per a valors baixos de terbolesa. Els turbidímetres acostumen a ser molt més econòmics que els nefelòmetres, ja que el seu ús està molt més estès. A causa de la simplicitat del mètode utilitzat pels turbidímetres, existeixen referents de turbidímetres basats en tecnologia DIY com el de l'article An Affordable Open-Source Turbidimeter de Kelly et al. (2014).



Imatge 26. Projecte de turbidímetre DIY. Font: Kelly et al (2014).

Cal destacar també un altre tipus de mesura de la terbolesa a l'àmbit marí, i és que mitjançant l'ús de satèl·lits es pot determinar el coeficient difús d'atenuació (generalment el K_d490), aquest indica la terbolesa amb l'atenuació de la llum sobre un volum d'aigua. Una altra eina molt utilitzada en sortides de camp són els discs de Secchi, però aquest donen mesures més orientatives, i no són monitoritzables.

Sensor de terbolesa DFRobot Turbidity sensor

El sensor adquirit per al projecte va estar la de DFRobot Turbidity sensor, aquest és un sensor de terbolesa del tipus turbidímetre. Són pocs els turbidímetres disponibles al mercat que utilitzin la tecnologia Arduino. A l'inici del projecte es va adquirir un altre sensor de baix cost de terbolesa el HALJIA, a la Taula 6 es poden observar les prestacions dels diferents sensors i els seus costos.

Taula 6. Especificacions dels sensors de terbolesa. Font: Pròpia.

Especificacions	DFRobot Turbidity sensor	HALJIA
Voltatge d'alimentació	5 V	5 V
Voltatge de sortida	0-4,5 V	3,3-5 V
Precisió	10~50°C = 0.3 NTU	1 NTU
Temperatura de treball	5-90	5~90 °C
Cost (Euros)	8,66	15,62

Inicialment, es van realitzar les primeres proves amb el sensor de la marca HALJIA, però aquest enregistra molt poques variacions en els registres del voltatge en el seu calibratge, donant diferents problemes pel fet que les variacions eren de magnitud unitària per a solucions amb una diferència de 10 i 20 NTU, de manera que es va descartar el seu ús. És per això que es va adquirir posteriorment el de la marca DFRobot. Aquest sensor té un cost molt baix la qual cosa el fa molt accessible, té un rang de mesura de 0 a 3000 NTU, el que suposa un ampli rang d'actuació del sensor. Per als calibratges es van deixar de banda els valors més alts de terbolesa, ja que per a l'àmbit marí la terbolesa si no hi ha fenòmens externs al medi que ho l'alterin es troba entre el 0,1 i els 200 NTU. El rang de sortida del sensor és molt elevat la qual cosa permet establir un voltatge molt específic per als calibratges més concrets.

El sensor de DFRobot presentava unes característiques constructives que feien que fos difícil sensoritzar la terbolesa en un medi que no fos un laboratori, per la qual cosa es va decidir construir un nou encapsulat perquè el sensor fos completament estanc. Per fer-ho primerament es va extreure el "caputxó" del sensor i es va adherir el sensor a un segellat de compressió mitjançant silicona i cola de contacte resistent a la humitat. També es va adherir més cablejat al cable de connexió del sensor amb la placa convertidora, degut a que la llargària inicial no era suficient per a permetre la sensorització fora del laboratori.



Imatge 27. Procés de ensiliconat del sellegat de compressió amb el sensor de terbolesa. Font: Pròpia.

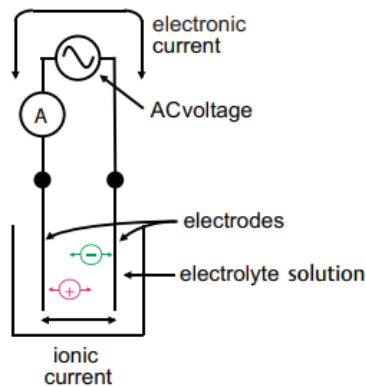


Imatge 28. Forma final del sensor de terbolesa DFRobot Turbidity sensor. Font Pròpia.

2.2.4. Sensor de conductivitat

Els sensors de conductivitat són aquelles que mesuren la capacitat que té una substància de conduir/transmetre un corrent elèctric, en el cas d'aquest estudi, la capacitat que té l'aigua salada. Per fer-ho existeixen dos mètodes que poden utilitzar els diferents sensors i que defineixen el disseny i construcció de les mateixos. Un és el mètode inductiu i l'altre el mètode de contacte, el mètode més precís és el mètode inductiu ja que permet una major precisió en solucions àcides així com també en aquelles que presenten sòlids dissolts. No obstant en aquest estudi es parlarà del mètode de treball dels sensors que utilitzen el mètode de contacte degut a que la sonda DFRobot EC Meter K=10 utilitza aquest mètode, degut a que constructivament és més fàcil de elaborar.

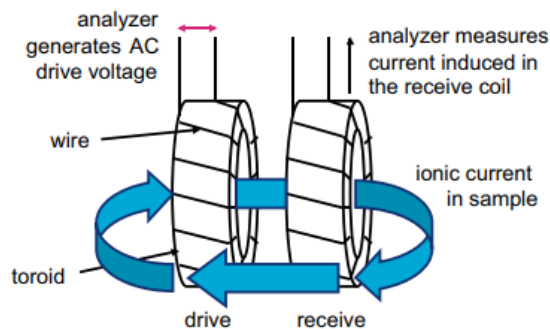
La majoria dels sensors de contacte estan constituïts per dos elèctrodes de titani o d'acer inoxidable. Un d'aquests dos filaments aplica un voltatge altern, el qual al transmetre's a l'aigua provoca que els ions es moguin generant una corrent iònica, que és captada per l'altre filament. La mesura d'aquesta corrent es fa utilitzant la llei d'Ohm on $R=V/T$, i s'assumeix que la conductivitat és equivalent a la resistència (Emerson 2010).



Imatge 29. Part de un sensor convencional de conductivitat. Font: Emerson Process Management. (2010)

A la Imatge 29 es poden visualitzar els dos elèctrodes, és per aquests per on passa un voltatge altern que es transmet, generant el corrent iònic que depèn de l'àrea de contacte del flux amb l'elèctrode. Tot i que el mètode de contacte és el més utilitzat per a rangs petits de conductivitat aquests sensors poden arribar a mesurar amb una alta precisió fins als 70 mS/cm, un rang més que acceptable per a la mesura de la conductivitat de l'aigua del mar.

A diferència del mètode de contacte el mètode inductiu és més precís i no utilitza com elèctrodes dos filaments sinó que utilitza dos elèctrodes embobinats donant un aspecte toroidal (Emerson 2010). El funcionament és molt similar al primer mètode, ja que s'indueix un voltatge al fluid que envolta la bobina, generant una corrent iònica que induïx una corrent elèctrica que és rebuda per l'altre bobina, que mesura aquest corrent. Aquest corrent a diferència del corrent analitzat al mètode de contacte és directament proporcional a la conductància de la solució. Aquest mètode s'usa per a mesurar amb major precisió solucions aquoses amb alts rangs de conductivitat, i acostumen a tenir un cost molt més elevat que la resta de tipus de sondes.



Imatge 30. Sensor de conductivitat inductiu. Font: Opetek.com

Sensor de conductivitat DFRobot EC Meter $K=10$

El sensor escollit per a mesurar la conductivitat ha estat el DFRobot EC Meter $K=10$ que utilitza el mètode de contacte per tal de poder determinar la conductivitat de les solucions. Aquest és l'únic que ofereix un rang de mesura adient per a la salinitat marítima, ja que la mitjana ponderada volumètricament és a l'oceà és de $33,1 \pm 2,3$ mS/cm segons Tyler et al. (2017). Es van valorar altres sensors com l'Atlas Scientific o emprar sensors de TDS¹⁰ que eren molt més econòmic, però en el cas del primer tenia un preu molt més elevat oferint propietats molt similars, mentre que en l'altre cas tot i que molts cops els sòlids dissolts estan relacionats amb la conductivitat la mesura a les aigües marines podria ser confosa degut a l'ambient.

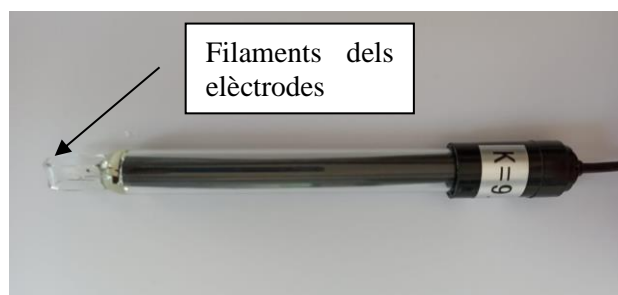
A la Taula 7 es pot observar les especificacions dels sensors preferides per els fabricants dels tres sensors que es van estudiar adquirir per al projecte, que són el DFRobot EC Meter $K=10$, el Atlas Scientific Conductivity $K=10$ i el CQ Robot TDS.

Taula 7. Especificacions del sensor de conductivitat. Font: Pròpia.

Especificacions	DFRobot EC Meter K=10	Atlas Scientific Conductivity K=10	CQ Robot TDS
Voltatge d'alimentació	3,0~5,0 V	3,0~5,0 V	3,0~5,0 V
Voltatge de sortida	0~3,2 V	0~3,9 V	0~2,3V
Precisió	$\pm 5\%$ psu	$\pm 2\%$ psu	± 10 psu
Temperatura de treball	0~40°C	0~110 °C	0~40°C
Rang de treball	10~100ms/cm	10 micro~1 S/cm	0~1000 ppm
Cost (Euros)	69,9	224,95	13,99

Tot i les diferències entre els sensors, cal destacar com l'Atlas té una major precisió així com un rang de treball més ampli que qualsevol dels altres, tot i això, només hi ha una diferència del 3% respecte al sensor escollit per al projecte, i del 8% del sensor de TDS pel que fa a la seva precisió. Les prestacions del sensor escollit únicament tenen un 3% menys de precisió i un rang de temperatures de treball menors amb una diferència de preus de 155 \$ respecte al sensor d'Atlas.

A la Imatge 31 es troba la sonda del projecte i es poden observar els dos filaments encarregats de subministrar el voltatge i mesurar la corrent. Aquesta sonda té una connexió BNC que es connecta a una placa de conversió de senyal, que serà la que permeti la connexió amb el microcontrolador, i la responsable de transmetre el voltatge enregistrat pel sensor. Aquest voltatge enregistrat es convertirà en una mesura real mitjançant una fórmula determinada al calibratge. El voltatge de treball d'aquesta sonda és d'entre els 0-3200 mV, així que aquests seran els intervals de voltatges mínim i màxim d'enregistrament del sensor.



Imatge 31. Sensor de conductivitat DFRobot $K=10$. Font: Pròpia.

¹⁰ Els TDS són el Total de Sòlids Dissolts a una substància líquida, aquest paràmetre mesura totes les sals inorgàniques dissoltes a una solució.

2.2.5. Sensor de temperatura

La temperatura és una magnitud física variable que determina el gradient tèrmic de la matèria. Aquesta es pot expressar en diferents unitats. La unitat de mesura internacional els Kelvins, però majoritàriament aquesta s'expressa en graus Celsius. Els sensors de temperatura presenten diferents formes de funcionar, es diferenciaren principalment tres tipus de sensors, tot i que la base del seu funcionament és molt similar entre els tres, ells són els termoparells, els termoresistents i els termistors (Kester et al. 1999).

Els primers funcionen mitjançant la generació d'un corrent elèctric entre dos filaments units, però de materials diferents, el seu funcionament es basa en el fet que passa una corrent en la unió dels dos filaments, quan aquesta unió s'escalfa o es refreda es produeix una tensió que és directament proporcional a la temperatura, per tant, no és una mesura absoluta de la temperatura, sinó que representa la diferència de temperatura entre els dos filaments de materials diferents. Aquests tipus de sensors presenten una precisió més que acceptables i són els tipus de sensor de temperatura més empleats.

Els sensors termoresistents són aquells que utilitzen una resistència elèctrica per a la mesura de la temperatura. Els sensors envien un corrent elèctric i quan es produeix una variació òhmica de la resistència elèctrica a causa de la temperatura, aquesta s'enregistra i determina directament la temperatura, aquest efecte es pot visualitzar amb la fórmula (7).

$$R(t) = R_0 (1 + at) \quad (7)$$

Els termistors són aquells que es defineixen com a resistius, ja que per determinar la temperatura s'utilitza la variació de la resistivitat que tenen els semiconductors segons les diferents temperatures. Aquests tipus de sistema presenten diferents problemàtiques pel fet que a l'utilitzar la variació de la resistivitat existeix una no linealitat derivada del material del semiconductor. Els rangs de mesura d'aquest tipus de sensors hauran de correspondre a la zona lineal de la resistivitat del semiconductor empleat per l'instrument de treball.



Imatge 32. Termistor i termoresistor, respectivament. Font: Pròpia.

Sensor de temperatura AZDelivery DS18B20

Els sensor utilitzat en aquest projecte ha estat el AZDelivery DS18B20, aquest sensor és del tipus termistor. Aquest és un sensor digital, és a dir es connecta a un port digital del microcontrolador, i fent us de una llibreria per a convertir la senyal en la lectura de la temperatura.

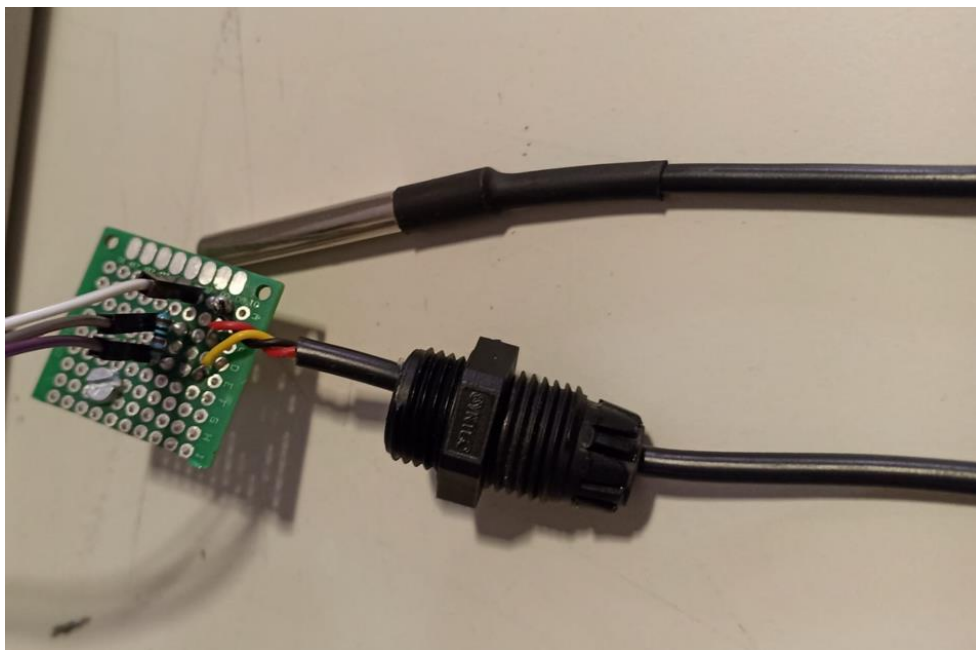
Aquest sensor està encapsulat en un acer inoxidable per tal de poder submergir-se correctament dins d'un medi aquàtic. En el seu interior es troba la instal·lació del semiconductor empleat per a determinar la temperatura i està controlat per un transistor de 8 pines, més concretament el DS18B20Z de Dallas.

Aquest presenta una resolució d'acord amb el nombre de bit de treball que van de entre 9 i 12 bits, la resolució es de 9 bits de 0,5 °C i la de 12 bits de 0,0625 °C, el nombre de bit de treball es pot configurar al codi implementat per al seu funcionament. A la Taula 8 es trobaran les principals característiques que presenta aquest sensor.

Taula 8. Especificacions del sensor de temperatura. Font: Pròpia.

Especificacions	AZDelivery DS18B20
Voltatge d'alimentació	3,0~5,5V
Voltatge de sortida	0~3,2V
Precisió	-10~85 C° = +- 0,5 C° -55~125 C° = +- 2 C°
Temperatura de treball	-55~125 C°
Rang de treball	-55~125 C°
Cost (Euros)	8,9

La precisió d'aquesta sonda dependrà dels rangs de temperatura als que treballi el sensor, per als rangs de temperatura del prototip que es planteja construir en aquest projecte, la precisió serà d'un $\pm 0,5\%$, que no està molt lluny de la majoria de sensors convencionals. El sensor de temperatura del projecte, requeria una resistència entre el pin digital i el pin d'alimentació. Per fer això es van soldar els tres pins del sensor de temperatura a una placa PCB presoldada junt amb la resistència.



Imatge 33. Connexió del sensor de temperatura.

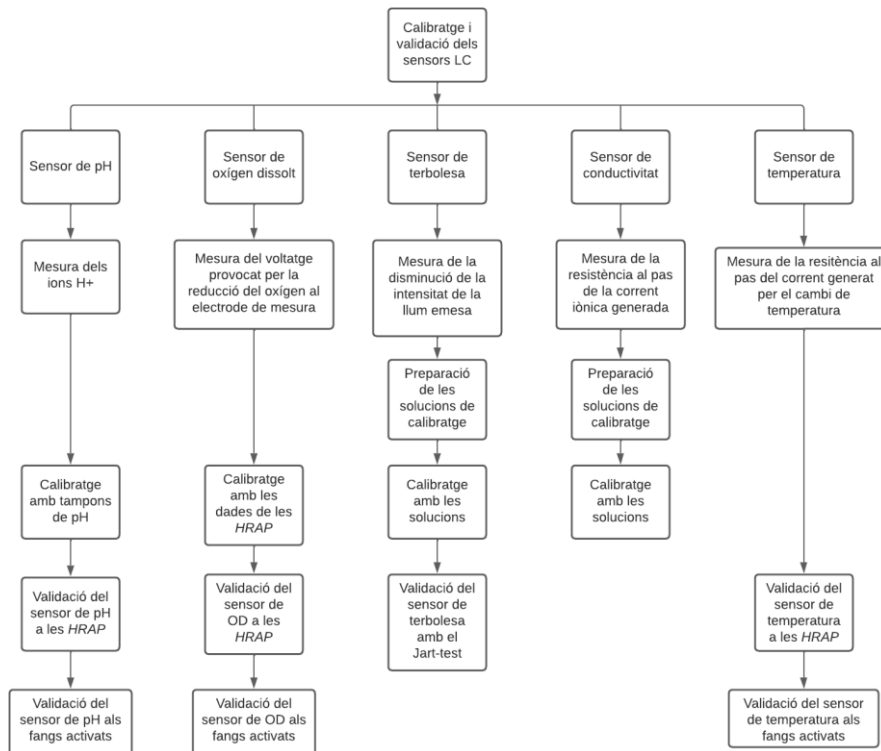
2.3. Validació i calibratge de les sondes

Alguns dels sensors escollits per al projecte requerien ser calibrats i validats amb solucions concretes, essent això essencial per adequar els sensors i poder tenir les mesures el més precises possible. Els sensors a calibrar són tots aquells sensors analògics, ja que tot i que alguns d'aquests disposaven de llibreries i rectes de calibratges pròpies es va preferir dur a terme un calibratge més acurat. Els sensors a calibrar van ser els de:

- Conductivitat
- Terbolesa
- pH
- Oxigen dissolt

Aquests sensors són connectats als ports analògics, cadascun d'ells interactua d'una manera diferent amb el medi i el paràmetre que mesuren, però tots d'igual manera per cada variació del paràmetre que mesuren llegeixen un voltatge associat que pot anar de 0 a 5 V, sempre en funció dels rangs de treball del sensor. El calibratge d'aquests es basarà en una correlació entre el voltatge enregistrat i un valor concret dels paràmetres de mesura. Aquesta relació s'extraurà de les diferents fórmules estimades mitjançant un ajust lineal entre el voltatge enregistrat pel sensor i el valor real mesurat amb un sensor convencional. Pel calibratge dels sensors de conductivitat i terbolesa es van preparar diferents solucions al laboratori, a diferència dels sensors de pH que van ser calibrats amb una solució de pH industrial, i del sensor d'oxigen dissolt que es va calibrar amb les dades enregistrades en un sistema biològic de tractament d'aigües residuals.

Per contra, la validació dels sensors es va realitzar a diferents sistemes biològics de tractament d'aigües residuals, on els paràmetres de la qualitat de l'aigua variaven establint així un paral·lelisme amb l'aigua marina, ja que els diferents paràmetres d'aquesta varien, no tan sols al llarg de mesos o anys, sinó també diàriament. Amb aquestes validacions es pretenia observar si els sensors escollits per a elaborar el prototip eren capaços d'enregistrar les variacions amb una precisió acceptable, o si únicament servien per a realitzar mesures puntuals.



Imatge 34. Esquema de la validació i calibratge dels sensors. Font: Pròpia.

2.3.1. Mètrica dels errors estudiats per a l'estudi de la viabilitat de la sensorització de baix cost

Per a realitzar la comparativa entre les dades obtingudes per els sensors convencionals i els sensors LC es van utilitzar diferents mètodes estadístics per al càlcul de l'error entre les diferents mesures, per tal de poder determinar la precisió i per tant la viabilitat de l'ús de sensors de baix cost.

Arrel del error quadràtic (RMSE/AEQ)

El càlcul d'aquest error serveix per calcular la diferència entre els valors reals i els valors estimats, elevant-los al quadrat i fent la seva mitjana calculant l'arrel quadrada. Aquest error té unitats, per lo que serveix com a càlcul per establir la precisió del sensor en valors unitaris, ja que mesura la quantitat d'error entre els valors reals i els estimats.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (8)$$

Error absolut mitja (MAE/EAM)

El MAE es la suma de les diferències quadràtiques dels valors reals i els valors estimats, aquest sempre serà menor o igual al RMSE, i serveix per poder determinar la variació de l'error en un conjunt de mesures tal que el RMSE, però aquest penalitza molt menys les prediccions de l'error. Quan menor sigui la diferència entre el RMSE i MAE menor serà la diferència entre els valors reals i els valors estimats.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i| \quad (9)$$

Error quadràtic mig (MSE/EQM)

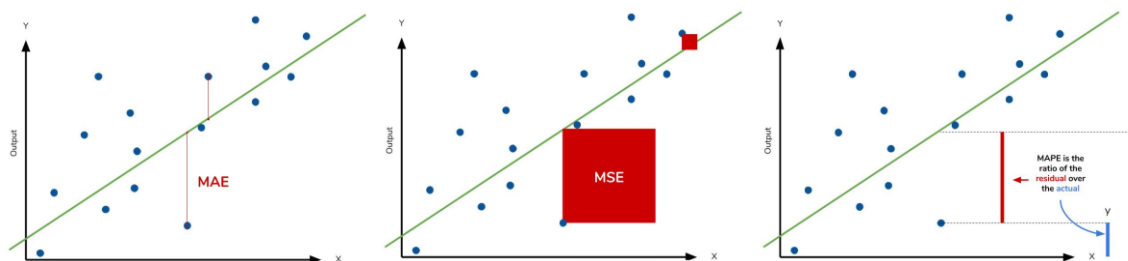
El MSE és la mitjana de diferència entre els valors reals i els estimats al quadrat, per lo que aquest error es una funció de risc, el que significa que indica la probabilitat de que succeeixi l'error estimat inicialment.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2 \quad (10)$$

Error absolut mig percentual (MAPE/EAMP)

Aquest error es la mitjana del quocient en valor absolut entre la diferència entre els valors reals i els estimats. Permet la mesura el rendiment dels valors predits, indicant la exactitud de les mesures previstes com un percentatge de l'error, donant una idea de la mitjana d'error del sensor en %.

$$MAPE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\hat{y}_i - y_i|}{\hat{y}_i} \right) * 100 \quad (11)$$

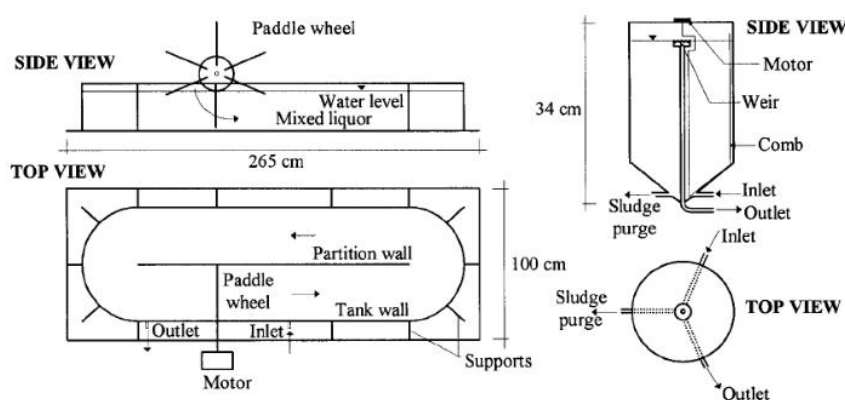


Imatge 35. Representació dels errors estudiats. Font: Pròpia.

2.3.2. Validació dels sensors de pH, OD i temperatura a les llacunes algals de tractament d'aigües residuals

Un dels objectius del dispositiu construït és poder recollir dades en continu a les costes, és per aquest motiu que es va voler comparar la instrumentació de baix cost escollida per al treball amb instrumentació convencional en un medi on els paràmetres de la qualitat de l'aigua variessin al llarg del dia, podent així observar la precisió dels sensors del projecte, i observar si aquests són capaços de mostrar les variacions coherents del medi estudiat.

El medi escollit per provar els sensors en continu van ser unes llacunes utilitzades per al tractament d'aigües residuals mitjançant algues, les conegudes com a High Rate Algal Ponds (HRAP), que estan ubicades a l'edifici C1 del Campus Nord, i que són utilitzades pel grup de recerca d'Enginyeria i Microbiologia del Medi Ambient (GEMMA) de la UPC.



Imatge 36. HRAP instal·lades a la UPC. Font: Garcia et al. (2000).

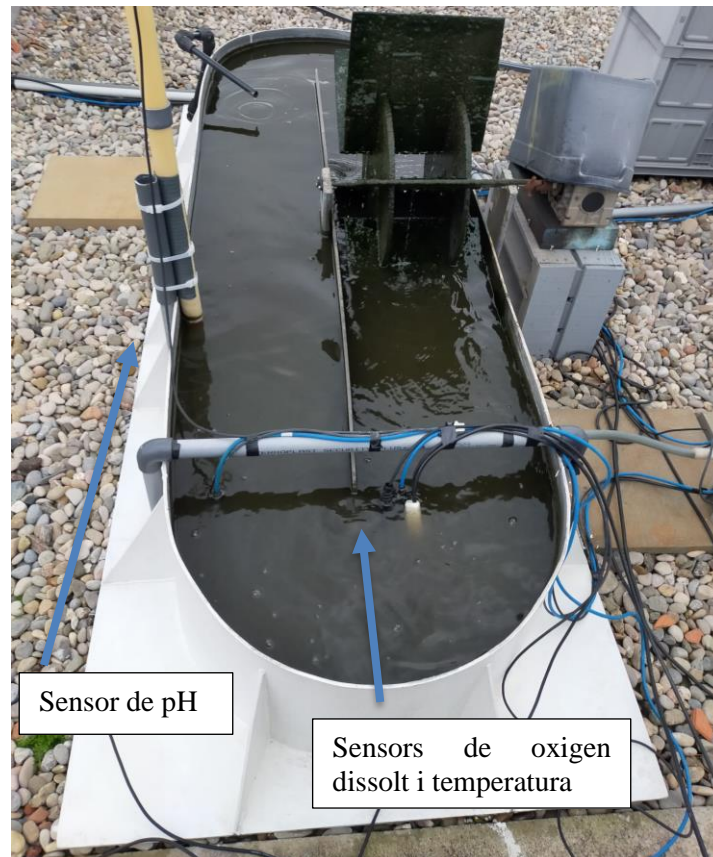
Les HRAP són un sistema de tractament d'aigües residuals de baix cost, on es donen les condicions climàtiques (temperatura, radiació solar...) perquè puguin créixer microalgues aprofitant els nutrients presents en les aigües grises i negres. La fotosíntesi d'aquestes algues provoca un alliberament d'oxigen, que ajuda a oxidar i eliminar la matèria orgànica present en aquestes aigües, transformant així les aigües negres en aigües "netes", sent això un subproducte del sistema.

En aquest sistema de tractament d'aigües residuals es poden observar variacions al llarg del dia dels paràmetres d'estudi del projecte. Els paràmetres observats en continu a les llacunes van estar el pH, l'oxigen dissolt, i la temperatura. Tant la terbolesa com la conductivitat no van ser sensoritzades en aquest medi degut a que no es disposava de sondes de terbolesa que mesuressin en continu, i a que la conductivitat d'aquestes aigües oscil·la entre els 800 i 1000 ppm \approx 1,5 mS/cm, el qual està molt lluny de ser un rang assumible per a l'aigua marina, a més de que el sensor DFRobot EC Meter K=10 té un rang de mesura de entre 10 i 100 mS/cm.

La instrumentació convencional utilitzada va ser instal·lada a les llacunes i connectada al *datalogger* Campbell Cr1000x per tal de poder recollir les dades. A la Taula 9 es pot observar els aparells utilitzats per comparar dades.

Taula 9. Sondes convencionals utilitzades per a la validació del calibratge dels sensors. Font: Pròpia.

Paràmetres	Sondes convencional	Precisió
pH	Crison Instruments pH 53 33	\pm 2%
Oxigen dissolt	Campbell Scientific CS511	\pm 2%
Temperatura	Campbell Scientific T107	\pm 0,2%



Imatge 37. Llacuna “platja” amb les sondes convencionals instal·lades. Font: Pròpia.



Imatge 38. Sensors de temperatura, oxigen dissolt i conductivitat instal·lats a la HRAP. Font: Pròpia.

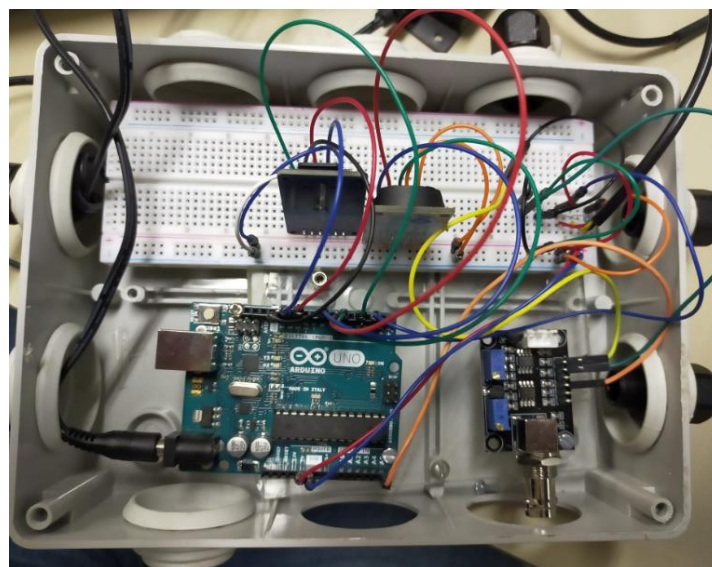
Per tal de comparar dades es va decidir anar sensoritzant un a un els tres sensors del projecte, ja que a una primera prova inicial es va detectar que existien interferències entre els sensors de conductivitat, pH i oxigen dissolt. Els sensors d'oxigen dissolt i de conductivitat induïen una corrent que feia que el sensor de pH no funcionés correctament, i es va decidir fer les validacions sensor per sensor, mentre es trobava una solució a aquest problema.



Imatge 39. Primera prova conjunta dels sensors. Font: Pròpia.

Després de consultar diferents fonts es va contactar amb l'empresa DFRobot per a preguntar com es podia solucionar aquest problema, i van acabar responent que feia falta adquirir els diferents aïlladors de corrent de cadascuna de les sondes, i per això es van adquirir els respectius aïlladors de corrent dels sensors d'oxigen dissolt i de conductivitat, que tot i ser de diferents marques tenien la mateixa funció, que era no generar interferències a les lectures del sensor de pH.

Les proves dels tres sensors es van fer individualment, instal·lant cadascun dels sensors a la caixa passa-cables de la Imatge 40, per a aquestes proves es va alimentar l'Arduino amb la bateria de 12 V JIAN YA NA DC12680. Els dies i períodes de lectura de les proves de cadascun dels sensors poden observar a la Taula 10.



Imatge 40. Caixa passa-cables per a les proves individuals, a la Imatge el sensor de pH. Font: Pròpia.

Taula 10. Data i hores de les proves realitzades. Font: Pròpia.

Sondes	Dias	Hora d'inici i finalització
Temperatura	2022-03-18	12:45:00
	2022-03-21	09:30:00
pH	2022-05-02	11:45:00
	2022-05-03	07:30:00
Oxigen dissolt	2022-05-06	12:45:00
	2022-05-09	12:45:00

La recollida de dades dels sensors convencionals es feia amb el Software PC400 DE Campbell Scientific. Les dades recollides estaven en format .dat, mentre que les dades recollides amb el mòdul SD de l'Arduino estaven en format .CSV, aquestes es transformaven amb el Microsoft Excel a un format .xlsx.



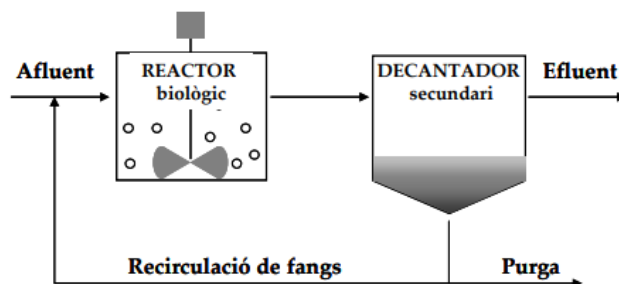
Imatge 41. Recollida de dades del sensor de pH amb el *datalogger*. Font: Pròpia.



Imatge 42. Recollida de dades del sensor de temperatura i del de oxigen dissolt. Font: Pròpia.

2.3.3. Validació del sensors de pH, OD i temperatura als fangs activats

Un dels mètodes principals per a la depuració de les aigües residuals és el tractament d'aquestes mitjançant sistema dels fangs activats (FA). Aquest sistema es basa en el fet que l'afluent d'aigües residuals entra a un reactor que aireja l'afluent mitjançant unes pales que mantenen el flux en circulació. En aquest reactor es troba una barreja de biomassa que al trobar-se en condicions òptimes d'operació permet l'oxidació bacteriana dels residus orgànics de l'aigua gràcies a l'aireació. Aquest flux passa després a un decantador secundari on mitjançant la diferència de densitats es depura finalment l'aigua que es pretén tractar.



Imatge 43. Esquema del sistema de tractament per fangs activats. Font: Fiter et al (2006).



Imatge 44. Sistema de fangs activats del laboratori del GEMMA. Font: Pròpia.

Alguns dels paràmetres més rellevants per a determinar el correcte funcionament de la planta són el pH, la temperatura i l'oxigen dissolt, és per aquest motiu que es va triar aquest sistema per a realitzar diferents mesures puntuals espaiades en el temps, per tal de comparar les dades obtingudes amb els sensors de baix cost respecte de les dades dels sensors convencionals. L'objectiu final d'aquestes proves era poder determinar si els sensors de baix cost eren igual de precisos realitzant mesures puntuals o en continu durant un llarg període de temps. Les diferents mesures es van prendre al reactor biològic amb la instrumentació que apareix a la Taula 11.

Taula 11. Sensors convencionals utilitzats per a les mesura del pH i l'oxigen dissolt. Font: Pròpia.

Paràmetre de mesura	Sensor	Rang	Resolució
OD	Lovibond SensoDirect 150	0-20 mg/L	±0,01
pH	Crisón meter 506	0-14	±0,01
Temperatura	Campbell 107	-35-+50 °C	±0,01

Es van anar registrant dades puntuals amb els sensors de baix cost, mitjançant el codi del Annex A7, els sensor s'instal·laven al reactor biològic i es deixava passar un temps prudencial fins que les dades s'estabilitzaven i llavors s'observa els valors obtinguts.

2.3.4. Validació del sensor de terbolesa amb el Jart-test

Per tal de validar el sensor de terbolesa i la recta de calibratge establerta es va realitzar una pràctica de coagulació i floculació que realitza el professor Jaume Puigagut a l'assignatura de Tecnologia ambiental del grau en Enginyeria Civil, ja que no es disposava de sensors de terbolesa que poguessin mesurar en continu, sinó únicament uns turbidímetres que mesuraven solucions instantàniament, els quals són utilitzats en aquesta pràctica. Aquesta pràctica comunament anomenada Jart-Test consisteix en determinar la dosi òptima de coagulants per a l'eliminació de la matèria en suspensió (MES) de l'aigua residual. Per a determinar la dosi exacta de coagulant necessària s'observa els nivells de terbolesa de les diferents solucions. S'observa la terbolesa perquè aquesta és una mesura directa de la transparència de l'aigua de manera que si hi ha grans quantitats de MES caldria seguir introduint coagulant a les mostres per tal de poder eliminar tota aquesta matèria sobrant. La pràctica bàsicament consisteix en anar introduint a una mostra d'aigua residual una dosi de coagulant fins a obtenir la quantitat òptima per a tenir uns rangs de terbolesa acceptable.



Imatge 45. Floculador de pràctiques de la UPC. Font: Pròpia.

Per a realitzar la pràctica es van omplir 6 vasos de precipitat de 400 ml amb aigua residual, ubicant aquests al dispositiu Jart-Test que es pot observar a la Imatge 45. Aquests 6 vasos es van mantenir inicialment a una agitació de 200 rpm, afegint a cada vas les dosis de coagulant especificades a la Taula 12. Concentracions i dosis de coagulant per al Jart-test. Font: Pròpia., mantenint l'agitació durant 1 minut. Com a coagulant es va utilitzar u

Taula 12. Concentracions i dosis de coagulant per al Jart-test. Font: Pròpia.

Mostres	Dosis de coagulant (ml)
Concentració inicial d'aigua residual	0
1	0,5
2	1
3	2
4	3
5	5
6	8

Després d'aquest minut es va baixar l'agitació a un 30-50 rpm i es va mantenir aquesta velocitat durant 15 minuts. Després d'això es va deixar reposar les mostres un temps prudencial de 10 minuts per després pipetejar 50 ml de les mostres per tal d'observar la seva terbolesa amb el turbidímetre.

Capítol 3. Resultats i discussió

3.1. Descripció del prototip

3.1.1. Alimentació del sistema

El microcontrolador tipus UNO disposa de dues sortides d'alimentació convencionals, una a 5 V i l'altre a 3,3 V, també existeix la possibilitat d'alimentar els circuits utilitzant els pins digitals, però no és el cas del prototip confeccionat. Per poder subministrar aquests voltatges d'alimentació el microcontrolador necessita estar alimentat correctament. L'Arduino Uno pot treballar emprant voltatges d'entre +7 i -12 V. Per fer-ho la forma convencional per a projectes d'una certa complexitat s'utilitza el port femella Jack DC, així com també es podria fer ús del port USB.

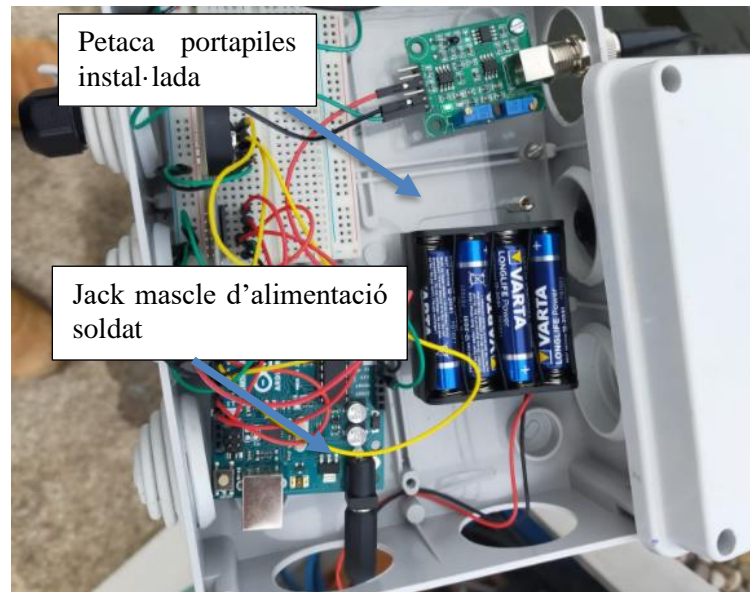


Imatge 46. Ports d'alimentació de un microcontrolador tipus Arduino. Font: practicasconarduino.com

Aquests ports tenen limitadors de voltatge per tal d'evitar problemes derivats de sobretensions com curtcircuits i altres. Tot i això, alimentar aquestes plaques a més de 12 V seria una font de problemes importants i s'hauria de fer ús de relés i altres dispositius electrònics per tal d'evitar un excés de corrent que acabes inutilitzant el microcontrolador.

Al llarg del projecte es van anar trobant diferents problemes amb l'alimentació, ja que a l'hora d'instal·lar els diferents sensors individualment per a realitzar les proves de monitoratge (Vegeu Apartat 2.3) van sorgir diferents problemes. A les primeres proves per a poder observar la precisió dels instruments adquirits es va alimentar l'aparell amb una font d'alimentació de 12 V amb un carregador amb connector jack mascle, que es connectava a una regleta instal·lada directament amb la xarxa. El primer problema es va detectar quan després de realitzar les primeres mesures amb el sensor de pH, es van observar la incoherència de les dades registrades, el que no era lògic, ja que el sensor estava calibrat correctament i l'error era de l'ordre de magnitud de ± 10 pH. Aquest problema el presentava únicament els sensors de pH, el de conductivitat i el d'oxigen dissolt, mentre que els de terbolesa i temperatura eren capaços d'enregistrar dades coherents.

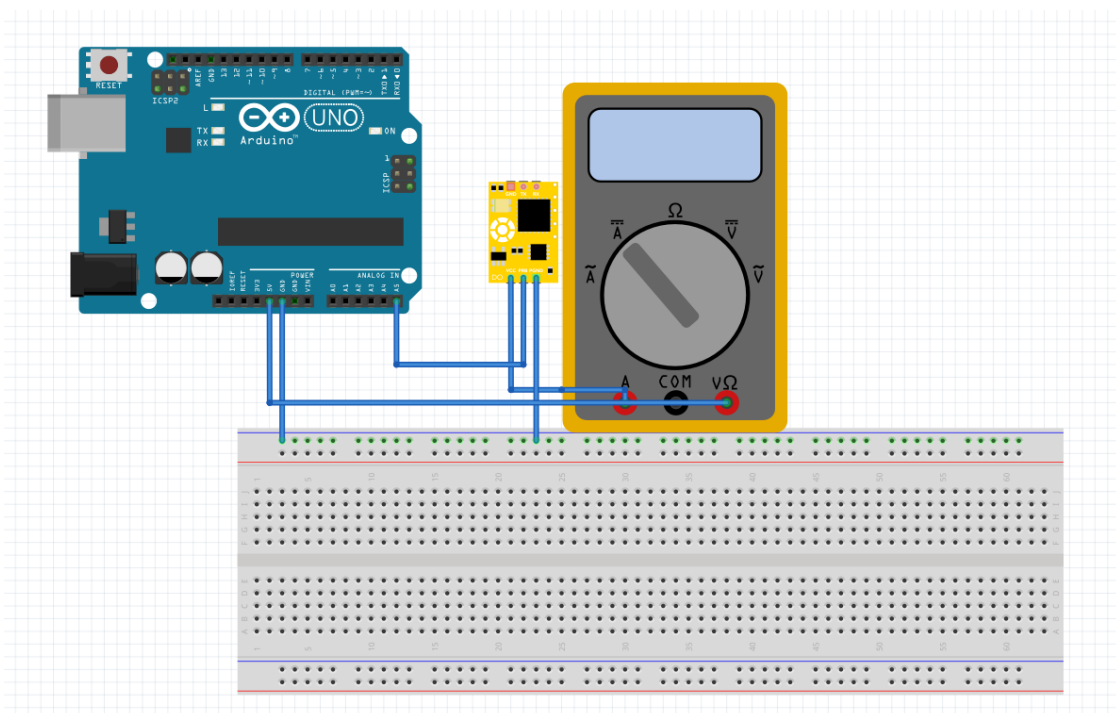
Es van provar diferents fonts d'alimentació de 5 i 9 V i totes elles eren incapaces d'alimentar el projecte i obtenir dades coherents, per la qual cosa es va decidir utilitzar piles de liti de 9 V, però aquestes seguien sense subministrar el voltatge necessari als sensors. Per tot això, finalment es va decidir provar d'utilitzar 8 piles AAA de 1,5 V connectades en sèrie, per tal de tenir 12 V d'alimentació. Aquestes es van ubicar a una petaca portapiles, a la qual se li va soldar els dos cables de sortida a un Jack mascle d'alimentació com es pot observar a la Imatge 47. Amb l'ajuda d'un voltímetre es va comprovar que el subministrament de 5 V era correcte i que la lectura del voltatge per part del sensor fossin coherents, ja que podrien existir diferents problemes.



Imatge 47. Petaca portapiles instal·lada per a la validació dels sensors. Font: Pròpia.

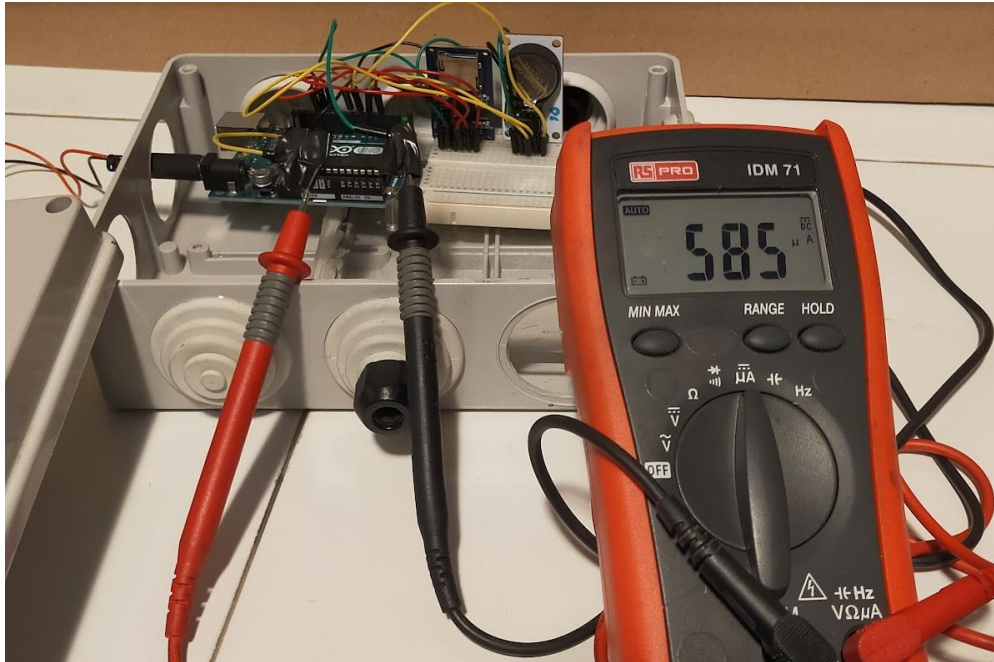
Aquests sistemes d'alimentació es van descartar, ja que es volia construir un dispositiu capaç d'observar les dades en continu i a llarg termini, i tant les piles com les bateries estudiades fins al moment no serien capaces de fer-ho.

Per tal de poder determinar una bateria que subministres l'autonomia suficient per al prototip del projecte es van mesurar els consums dels diferents components de la sonda multiparamètrica. Per fer-ho es va utilitzar un multímetre, connectat en sèrie entre la sortida de 5 V de la placa i l'entrada d'aquesta a la protoboard com es mostra a la Imatge 48. Es va mesurar individualment cadascun dels elements connectats al microcontrolador Arduino, per tal de tenir mesures el més reals possibles i evitar interferències de qualsevol classe.



Imatge 48. Connexió del multímetre per a poder determinar el consum dels elements del projecte. Font: Pròpia.

Per poder connectar el multímetre amb les fonts es van col·locar els seus borns junt amb els dels cables que connectaven el dispositiu unint-los amb cinta adhesiva per tal de tenir un contacte constant, això es pot veure a la Imatge 49.



Imatge 49. Mesura del consum del mòdul SD. Font: Pròpia.

Per corroborar que el mètode utilitzat era el correcte es va comparar els resultats del consum del sensor de OD, amb el valor especificat a la fitxa tècnica del sensor. El resultat de la mesura mitjançant el mètode especificat era de $251,3 \mu\text{A} = 0,251 \text{ mA}$, mentre que el consum segons el fabricant era de $0,30 \text{ mA}$. Tot i existir un error del $2,43 \%$ entre les dues dades, es pot considerar que el mètode empleat és correcte per a realitzar els càlculs.

Taula 13. Consum dels dispositius electrònics del prototip. Font: Pròpia.

Dispositiu	Consum (mA)	Potència necessària (W)	Potència consumida (W*h)
Arduino UNO	46	0,23	5,520
Tarjeta SD	0,585	0,00292	0,070
Rellotge Arduino	0,0198	0,000099	0,002
Sensor de pH	0,6	0,003	0,072
Sensor de OD	0,789	0,00394	0,094
Sensor de Temperatura	0,251	0,00125	0,030
Sensor de conductivitat	0,0021	0,000010	0,0002
Sensor de terbolesa	0,331	0,00165	0,039
Total	48,577	0,244	5,863

Els diferents consums en mA es poden observar en la Taula 13, on també es pot observar la potència d'aquests, la qual es va obtenir amb la fórmula (12). En aquesta taula també es troba el consum diari de cadascun dels components, calculat amb la fórmula (13), per fer-ho es determina que el temps d'autonomia del dispositiu es vol que sigui diari, és a dir 24 h.

$$P = V * I \quad (12)$$

$$Pa = P * Autonomia \quad (13)$$

Per tant, la potència que hauria de tenir una bateria hauria de ser com a mínim de 0,244 W i 5,863 W*h, i una capacitat de 1165,869 mAh. Finalment, la bateria escollida per alimentar el prototip a construir i els sensors per a les validacions va estar la bateria JIAN YA NA DC12680. Aquesta bateria és recarregable, té una tensió de subministrament de 12 V i presenta una capacitat de 6800 mAh, per tant, compleix sobradament les necessitats del prototip i dels sensors. Aquesta alimenta el microcontrolador amb un connector mascle tipus Jack.



Imatge 50. Bateria JIAN YA NA DC12680. Font: amazon.com.

3.1.2. Plaques solars per a l'alimentació del prototip

Actualment, a nivell mundial s'està vivint una de les majors crisis energètiques de la història. Els diferents conflictes bèl·lics dels últims temps junt amb la ineficàcia de les institucions i la manca d'un servei públic de subministrament d'energia que sigui capaç de garantir preus assequibles a la indústria i a la ciutadania han provocat un increment del preu de la llum, que va arribar fins a més del 469,84 % al mes de desembre del 202, això sumat al desastre climàtic que provoca la generació de tota aquesta electricitat necessària per abastir els consums energètics actuals, és més que necessari trobar alternatives energèticament renovables per tal de no tan sols trobar independència energètica sinó també per reduir les emissions derivades del consum elèctric de la xarxa de subministrament.

Per tal de fer el projecte energèticament autònom i obtenir totes les avantatges que això suposava a nivell ambiental i d'autonomia es va decidir implementar al projecte unes plaques solars que permetessin alimentar el prototip a construir. Per poder realitzar això s'havia d'aconseguir subministrar 5 V al port Jack. Per poder determinar la potència de les plaques solars es necessitava calcular l'anomenada potència fotovoltaica, que es calcula amb la fórmula (14). Les dades per a poder calcular aquesta potència es van determinar a l'Apartat 3.1.1 on es va calcular el consum total dels sensors (mAh), la potència consumida (W) i la potència necessària (W*h).

$$\text{Potència Fotovoltaica} = \frac{C_d}{HS_m} \text{ (W)} \quad (14)$$

- C_d = Consum diari
- HS_m = Hora Solar mínima¹¹

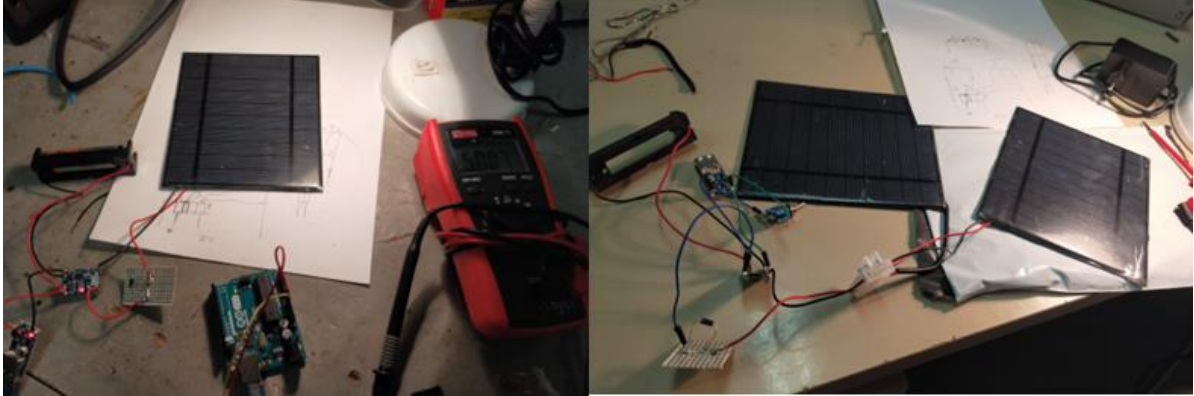
A la potència consumida diària caldria afegir un marge del 20%, quedant $C_d=7,035$ Wh. Finalment, la potència fotovoltaica necessària per alimentar el projecte és d'1,998 W. Es van cercar diferents plaques solars que complissin amb aquest requisit i va ser la ALLPAWERS DIY l'escollida degut a que té una potència de 2,5 W i una tensió màxima de sortida de 5,5 V. Es va corroborar que la placa adquirida fos capaç de generar aquest 5,5 V que asseguraven les seves especificacions. A la Imatge 51 es pot observar com la placa adquirida generava 5,341 V de tensió de sortida i, per tant, es podia assumir que la placa funcionava correctament.



Imatge 51. Tensió de sortida de la placa solar ALLPAWERS DIY mesurada amb un multímetre. Font: Pròpia.

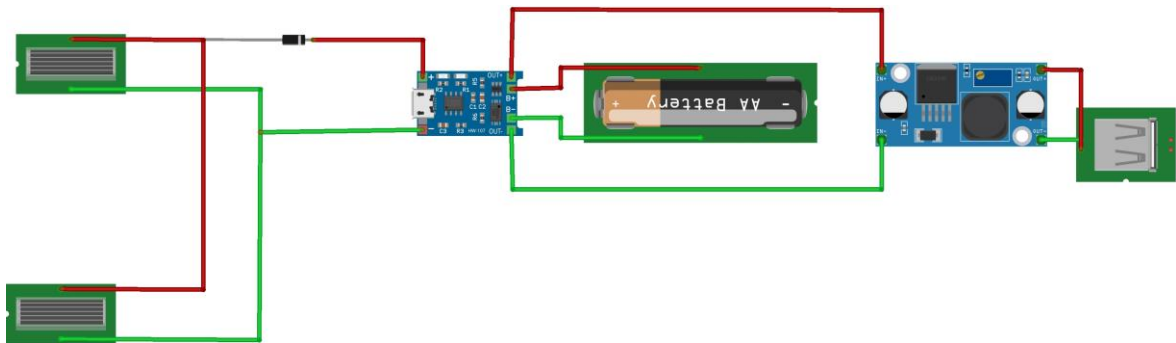
¹¹ Es va considerar l'hora solar mínima de Barcelona

Per tal d'assegurar els requeriments energètics de la sonda es va instal·lar una altra placa amb les mateixes característiques. Aquestes dues plaques estan connectades en paral·lel per tal que si una no reves la quantitat de llum solar necessària per a fer funcionar el sistema d'alimentació l'altre pugues encarregar-se d'això, juntes tenen una tensió de sortida de 5 V. Es va haver de corroborar que la tensió fos la corresponent, això es pot observar a la Imatge 52.



Imatge 52. Primer muntatge de les plaques solar en paral·lel. Font: Pròpia.

La tensió generada als borns de sortida de les plaques solar era en corrent continu (DC) i aquesta s'havia de regular d'alguna manera per tal de carregar la pila de liti escollida de 3,7 V. Per això les sortides de terra i d'alimentació van connectades al mòdul TP4056 el qual permet controlar la càrrega de la pila. La bateria carregada en aquest projecte és una pila de liti AA. Per tal de poder seguir carregant la bateria i a la vegada fer que la tensió d'alimentació d'aquest circuit provingués de les plaques solar es va soldar un díode a la sortida del pol positiu de les plaques connectades en paral·lel, evitant així esgotar la bateria i seguir carregant-la. El mòdul TP4056 disposa també de dues sortides de terra i d'alimentació a 3,7 V, que van connectades a un convertidor elevador¹² de tensions contínues (DC). Aquest és capaç de rebre qualsevol voltatge compres entre 0,9 i 5 V i donar 5 V de sortida, sempre en corrent continu. A la Imatge 53 es pot observar l'esquema del muntatge del sistema d'alimentació per plaques solar del prototip a desenvolupar.



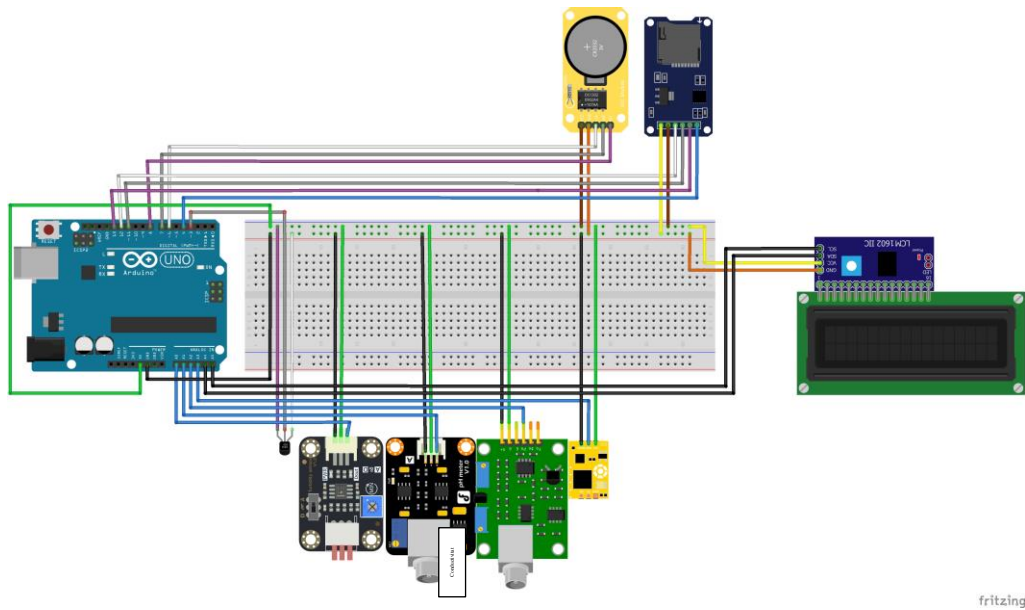
fritzing

Imatge 53. Esquema del sistema d'alimentació per plaques solar. Font: Pròpia.

¹² Aquesta classe de dispositius són coneguts com a boosters.

3.1.3. Arquitectura electrònica del prototip

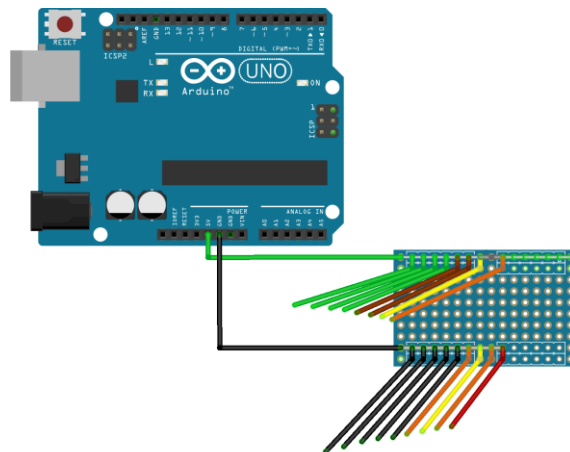
El prototip de la sonda multiparamètrica consta de sensors de pH, terbolesa, oxigen dissolt, conductivitat i de temperatura, tots ells connectats a una placa Arduino Uno, les dades obtingudes pel sensor són enregistrades amb un mòdul d'enregistrament de dades SD, i per tal de conèixer la data i l'hora exacte de les dades es fa ús d'un altre mòdul del tipus rellotge RTC. El sensor també consta alhora d'una pantalla LCD connectada al microcontrolador, per tal de poder visualitzar les dades a l'instant. És a la Imatge 54 on es pot visualitzar l'esquema de les diferents connexions del dispositiu.



fritzing

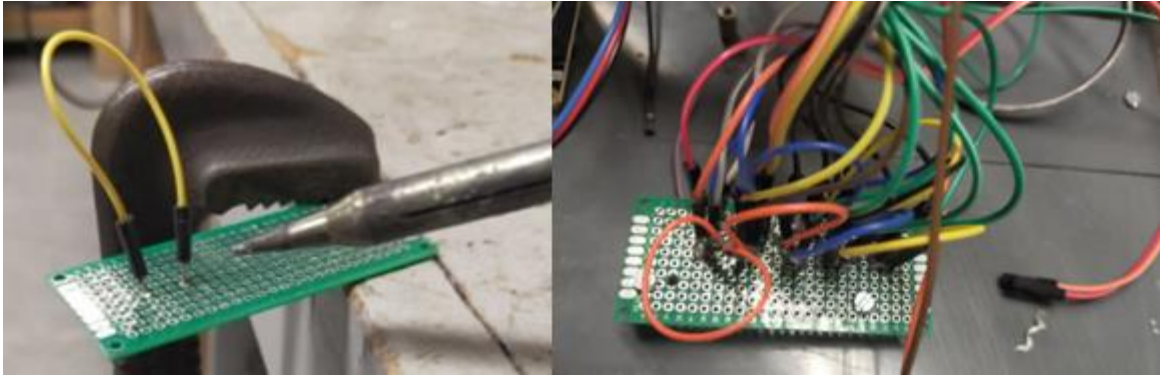
Imatge 54. Esquema de les connexions del prototip de sonda multiparamètrica. Font: Pròpia.

A l'esquema es visualitzen les connexions del circuit a una protoboard, però es va voler substituir les connexions de la protoboard per connexions soldades, per tal de tenir major estabilitat en les connexions. Per fer-ho es van soldar 18 cables, establint dues línies de 9 cables cadascuna, una de connexions a terra i l'altre d'alimentació a 5 V (Vegeu l'esquema del circuit a la Imatge 55). Es va seguir un codi de colors per als cables dels sensors on es va establir que les connexions d'alimentació es realitzaven amb cables de color verd i les de terra amb cables de color negre. Els diferents cables es van soldar amb estany a una placa PCB presoldada. A la imatge es pot observar el procés i el resultat final de la soldadura.



fritzing

Imatge 55. Esquema de les connexions soldades de la placa PCB. Font: Pròpia.

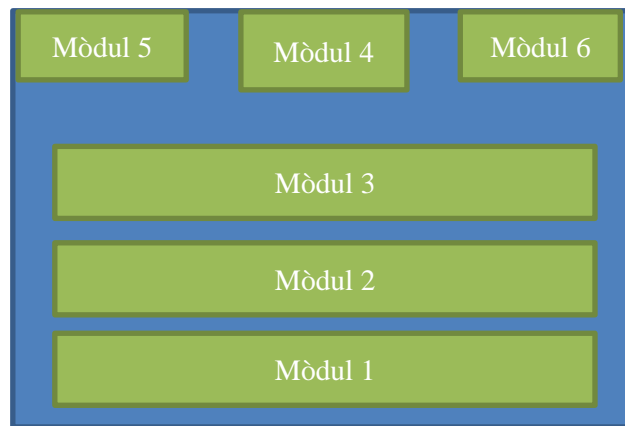


Imatge 56. Procés de soldatge de la placa de connexions PCD i el resultat final. Font: Pròpia.

Els diferents cables que estableixen les connexions amb els circuits dels sensor no es van soldar a cap placa, per lo que els connexions van directes dels dispositius al microcontrolador.

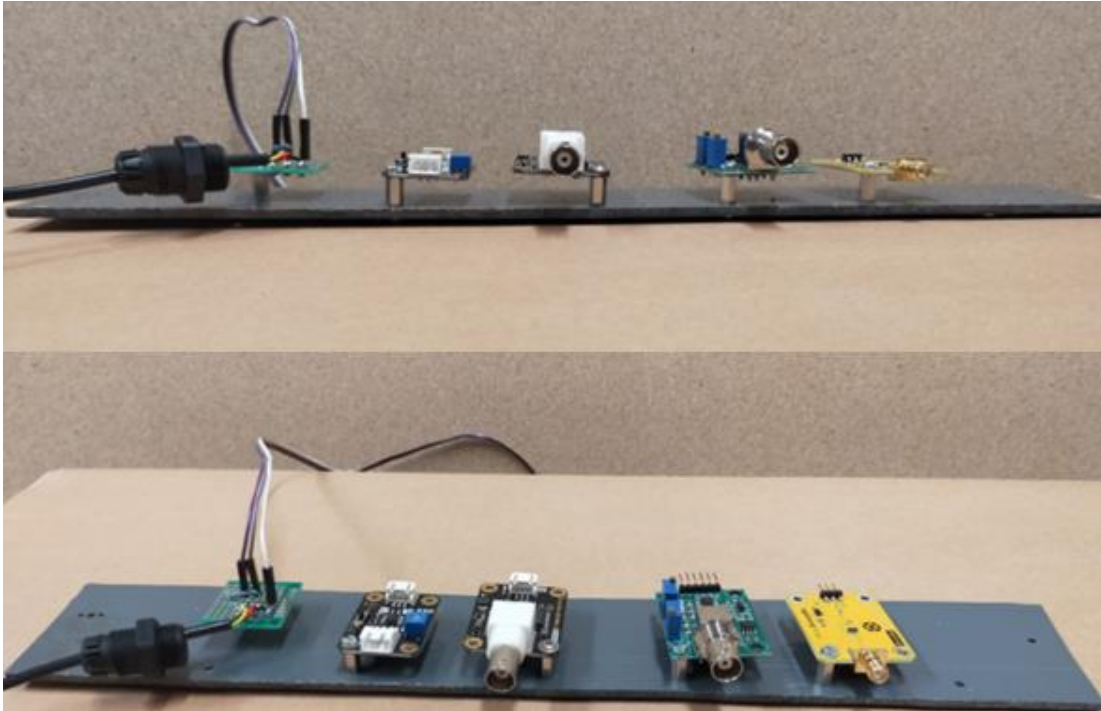
3.1.4. Muntatge del prototip

La sonda prototipada està conformada per una caixa rectangular de PVC on dins s'ubiquen els diferents components electrònics i sensors que permeten el seu correcte funcionament. En aquesta caixa es troben col·locats els diferents segellats de compressió que ofereixen l'estanquitat a la sonda. Pel que fa a l'electrònica, la sonda consta d'un mòdul d'enregistrament de dades per a una targeta SD, un mòdul d'un rellotge per poder obtenir l'hora d'enregistrament de les dades, així com també una pantalla LCD per a visualitzar-les. Aquests dispositius estan conjuntament connectats amb les plaques convertidores dels sensors i els aïlladors de corrent a una placa Arduino Uno, que és alimentada o bé per una pila de liti recarregable i les plaques solar de 2,5 W o bé per una bateria de liti recarregable. La sonda té una estructura modular, per la qual cosa es poden extreure els diferents components d'aquesta per tal de permetre les reparacions, modificacions o altres feines.

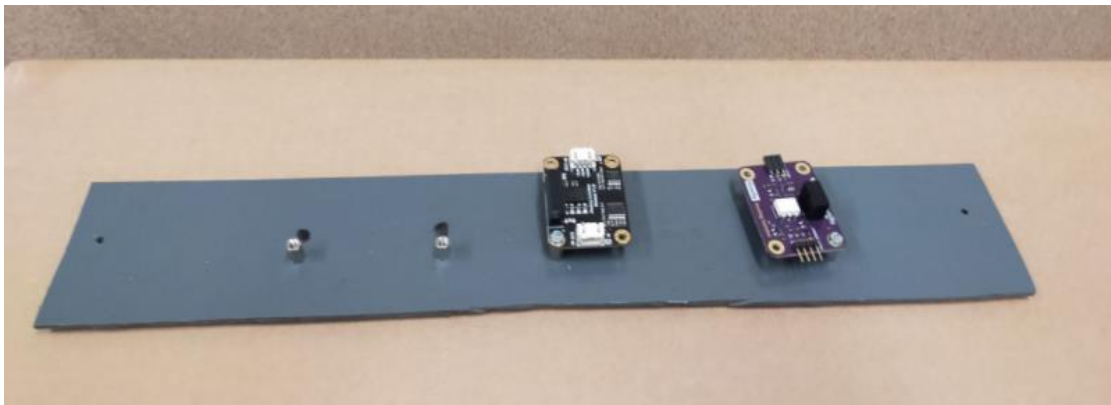


- Mòdul 1: Plaques convertidores de voltatge dels sensors
- Mòdul 2: Aïlladors de corrent
- Mòdul 3: Placa de connexions i Arduino UNO
- Mòdul 4: Sistema d'alimentació de les plaques solars
- Mòdul 5: Mòdul de targeta SD i del rellotge
- Mòdul 6: Bateria de liti recarregable

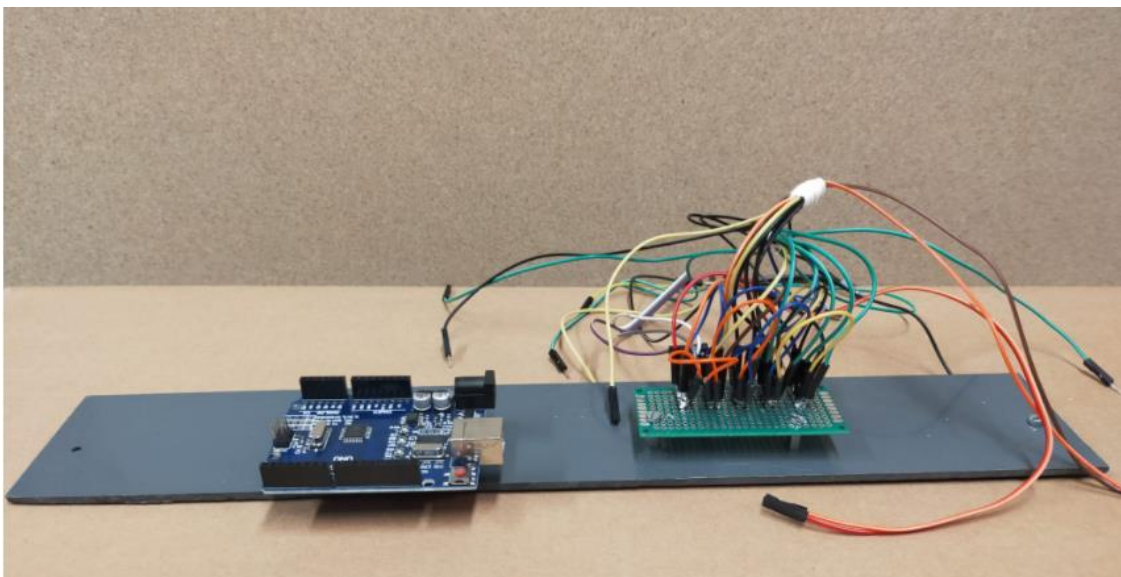
Els components electrònics de la sonda es van acoblar en els sis llistons de PVC reutilitzat que formen els diferents mòduls, els quals van establir la construcció modular. Els 5 sensors i les seves plaques convertidores es van instal·lar al primer i al segon mòdul, els aïlladors de corrent dels diferents sensors. Al tercer mòdul es troben el microcontrolador del projecte, l'Arduino Uno i la placa connexions PCB. Tots els elements adherits als mòduls estan cargolats amb columnes hexagonals de doble pas, per tal que els components no estiguin en contacte amb el plàstic.



Imatge 57. Mòdul 1. Font: Pròpia.

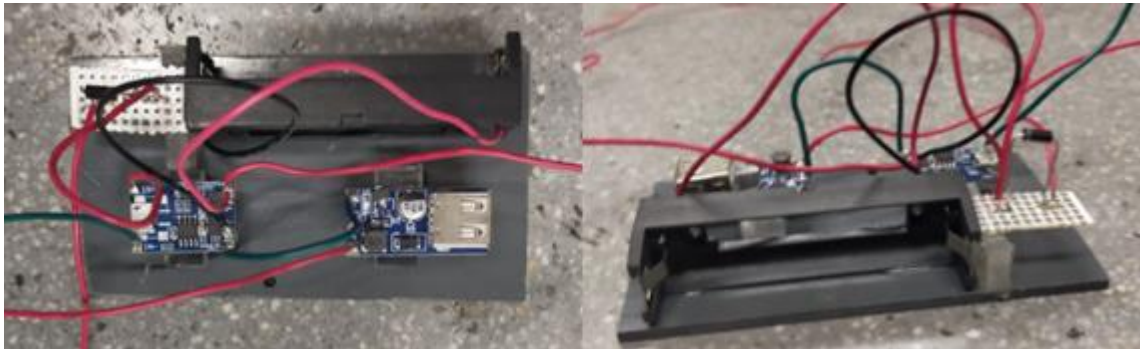


Imatge 58. Mòdul 2 Font: Pròpia.

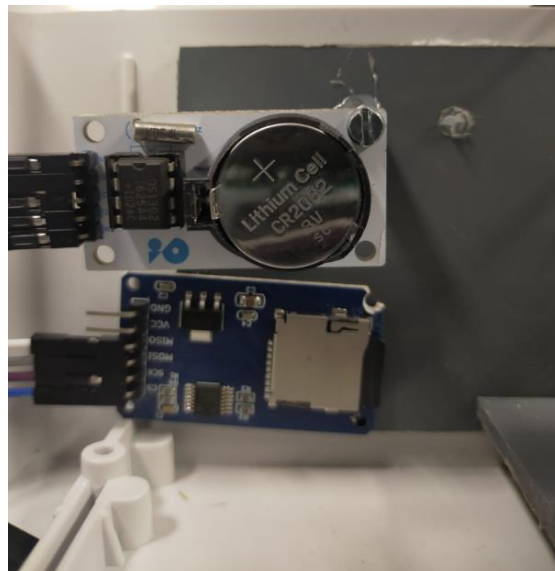


Imatge 59. Mòdul 3. Font: Pròpia.

En el quart mòdul s'ubica el sistema d'alimentació per a les plaques solars que consta del convertidor elevador de senyal, el mòdul de carrega de les plaques solars i la pila recarregable d'alimentació, al cinquè els mòduls targeta SD i de rellotge i al sisè la bateria de liti recarregable i al sisè.



Imatge 60. Mòdul 4. Font: Pròpia.



Imatge 61. Mòdul 5. Font: Pròpia.



Imatge 62. Mòdul 6. Font: Pròpia.

Els diferents mòduls es van instal·lar a una caixa de PVC estanca de 380x300x120 mm. Un cop es va adquirir la caixa es va procedir a determinar la disposició dels elements dins aquesta. Decidint realitzar una construcció modular, per tal de poder extreure els diferents components del sensor en qualsevol circumstància, per a facilitar la reparació, substitució o qualsevol causa que ho justifiqués. Per a poder instal·lar els diferents sensors i per poder donar sortida als elèctrodes es va foradar la caixa amb un trepant i es van instal·lar els sellegats de compressió per tal de poder passar el cablejat dels sensors i poder tenir una certa estanquitat.



Imatge 63. Perforació de la caixa per a les obertures dels sellegats de compressió. Font: Pròpia.

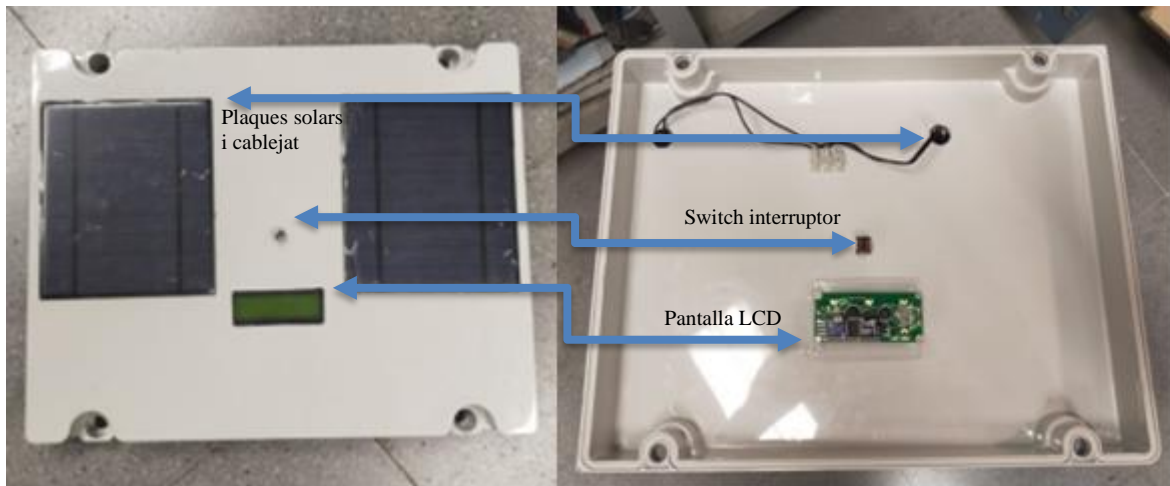


Imatge 64. Sellegats de compressió col·locats a la caixa del sensor. Font: Pròpia.

Seguidament amb una dremel es va realitzar l'obertura per a la pantalla LCD de 2X16, que permetia visualitzar les dades enregistrades pel sensor a l'instant. Posteriorment, es van fer les diferents obertures per a la passada de cables de les plaques solar així com la instal·lació d'aquestes, les quals van ser adherides a la part superior de la caixa amb cola industrial no sensible a la humitat i amb silicona.



Imatge 65. Realització de les obertures per al cablejat de les plaques solars. Font: Pròpia.



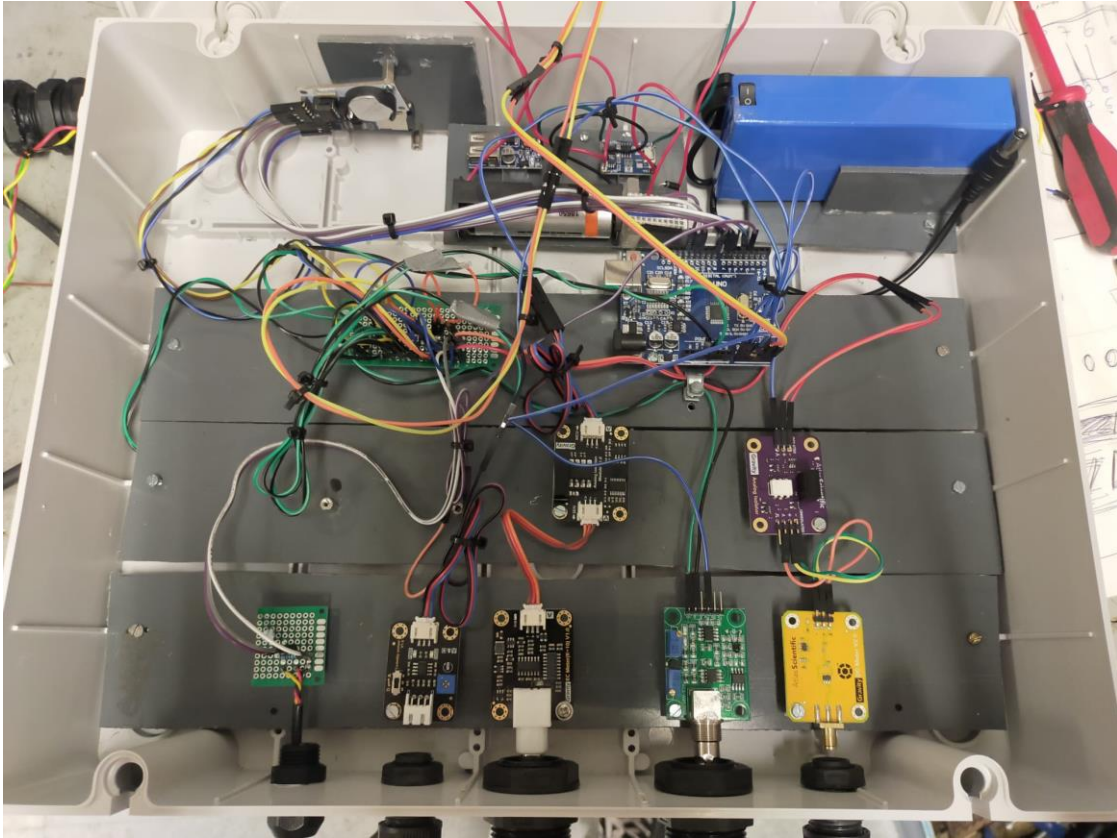
Imatge 66. Disposició final dels elements de la tapa del sensor. Font: Pròpia.

Un cop es van adherir les plaques solars a la tapa de la caixa, es va instal·lar la pantalla LCD, la qual està protegida per una placa de metacrilat, que assegura l'estanquitat i la protecció de la pantalla. Finalment, es van instal·lar els sis mòduls del dispositiu a la base de la caixa, i es van realitzar les diferents connexions necessàries per al degut funcionament de la sonda multiparamètrica. Tots els mòduls van ser cargolats a la caixa, així com ho estaven els diferents components electrònics, per tal de permetre la correcta extracció de qualsevol d'aquests.

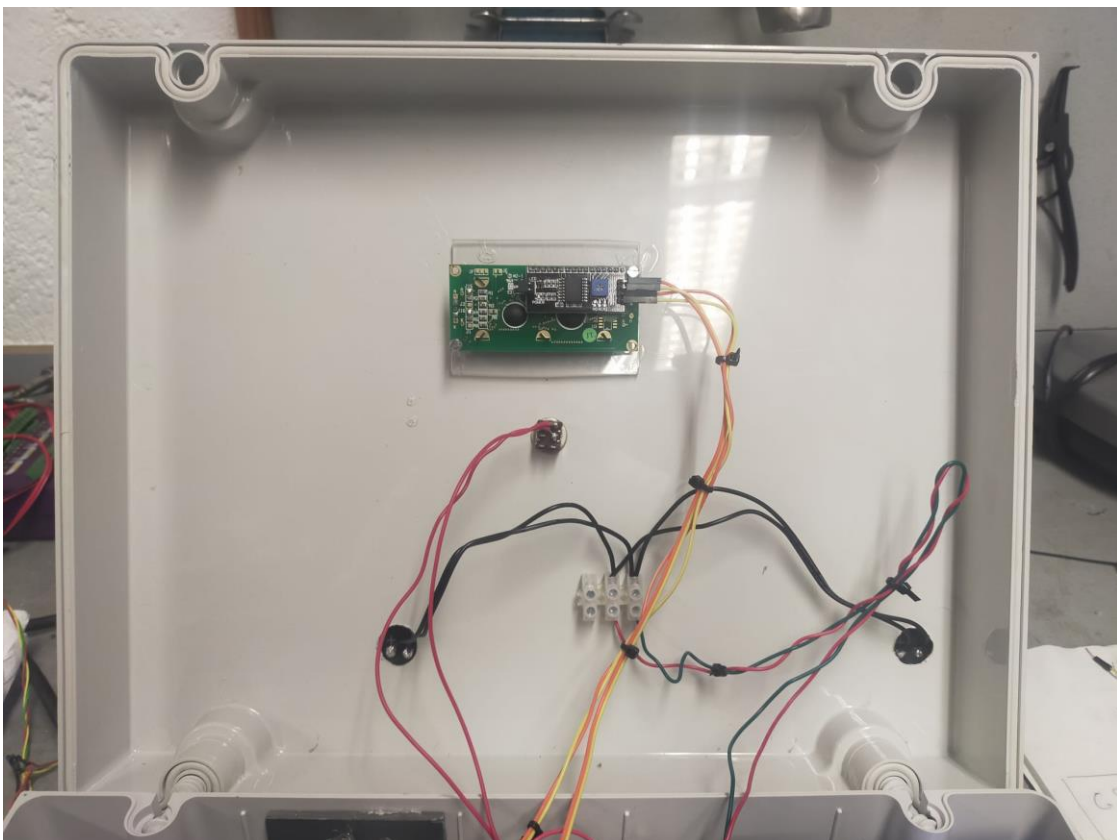


Imatge 67. Primer muntatge dels mòduls i components del sensor. Font: Pròpia.

Com es pot observar a la Imatge 67 el cablejat és caòtic i qualsevol intent d'entendre les connexions és impossible, és per això que es va decidir distribuir el cablejat ordenadament i agrupar en diferents grups el cablejat per tal d'evitar problemes de desconexions a causa del moviment d'aquest cables. Per unir-los entre si i distribuir-los coherentment es va utilitzar brides de plàstic i alguna metàl·lica per tal de tenir tot el cablejat més organitzar, com es pot veure a les Imatge 68 i Imatge 69.



Imatge 68. Base de la caixa passa-cables amb el cablejat unit per brides de plàstic. Font: Pròpia.



Imatge 69. Tapa de la caixa passa-cables amb el cablejat unit per brides de plàstic. Font: Pròpia.

3.1.1. Valoració econòmica del projecte

El prototip dissenyat ha presentat un cost total de 391,77 d'Euros. Una de les màximes d'aquest projecte es poder obtenir les millors de les tecnologies de baix cost als preus més assequibles. El pressupost inicial del projecte era de 2000 \$, aquest deriva d'una Beca d'Aprenentatge que tenia com a objectiu desenvolupar una sonda multiparamètrica per a determinar la qualitat de l'aigua a països en vies de desenvolupament, però per tal de poder elaborar un TFG amb relació a l'enginyeria de sistemes i tecnologies navals, es va decidir reformular la proposta, i desenvolupar una sonda que permetés el monitoratge i mesura de la qualitat de l'aigua marina.

A la Taula 14 apareix el preu de cadascun dels elements requerits per a la realització del projecte. Els components més cars de la sonda confeccionada han estat el sensor de conductivitat de DFRobot i el sensor d'oxigen dissolt de Atlas Scientific, mentre que el sensor de temperatura i el de terbolesa tenien cost molt assequible.

Taula 14. Desglossament del cost total del projecte. Font: Pròpia

Components	Cost (Euros)
Arduino UNO	22,99
AZDelivery DS18B20 Sensor de temperatura	2,8
ASHTA Sensor de pH	49,01
DFRobot EC Meter (K=109)	69,9
Atlas Scientific Mini Lab Grade Dissolved Oxygen Probe	125,46
Mòdul de rellotge DS1302	5,99
Adaptador de targeta micro SD	4,46
Pantalla LCD I2C	9,99
Adaptador I2C LCD1602/LCD20X4	5,02
Plaques solars ALLPOWERS DIY	15,99
Aihasd mòdul carregadorTP4056 i convertidor elevador (booster converter)	6,99
JIAN YA NA DC126800	31,96
Placa PCB 100x80	7,56
Cables mascle-femella/mascle-mascle	9,2
Sellegats de compressió x 6	5,46
Caixa de PVC	18,99
Total	391,77

El cost habitual de les sondes multiparamètriques pot oscil·lar entre els 2000 i els 3000 Euros com es va esmentar a l'Apartat 1.4, i, per tant, en comparació amb la resta de sensors i sondes convencionals hi ha una diferència molt més que considerable. Seran els resultats obtinguts amb la sensorització els que determinaran la viabilitat del prototip confeccionat i els que indicaran quina correlació hi ha entre el cost del projecte y la seva precisió a l'hora de prendre mesures, tant en continu com puntuals.

3.2. Calibratge dels sensors

3.2.1. Calibratge del sensor de *pH* ASHTA

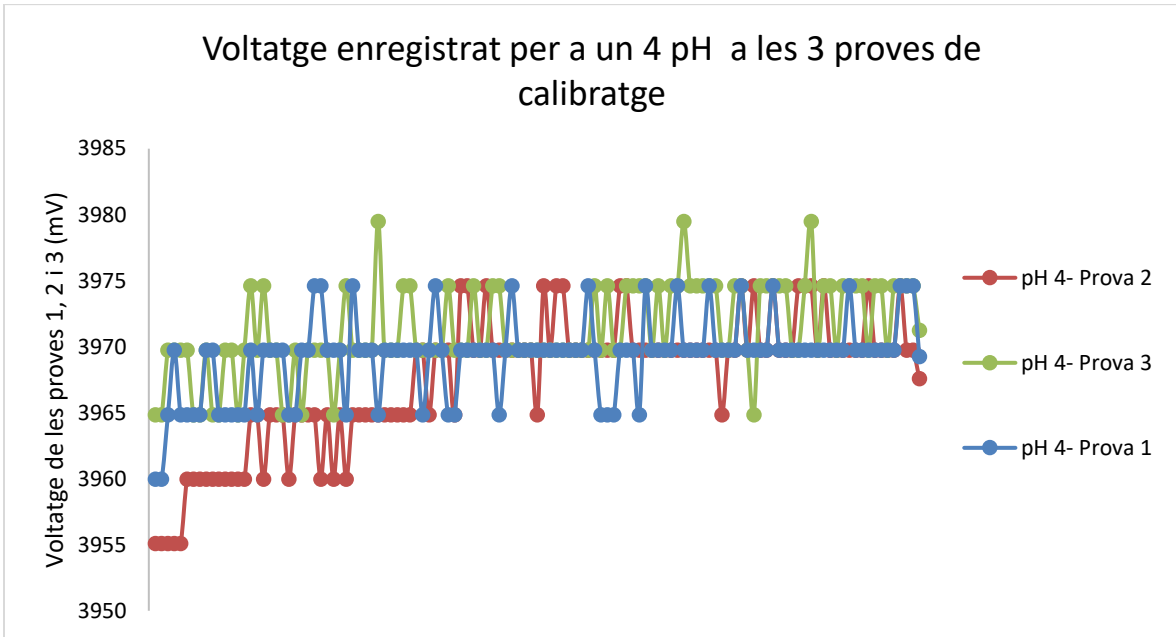
Pe al calibratge del sensor de pH es van utilitzar dos tampons de pH 4 i 7, tal com indica la normativa ISO 10523:2012 sobre el calibratge de les sondes de pH, tot i que aquest sensor no és un sensor convencional, la forma de calibrar-lo és idèntica.

El calibratge es va dur a terme al laboratori, i es va utilitzar el codi de calibratge del Annex A1, on el sensor enregistra un voltatge cada segon durant tres minuts, per a cada un dels dos tampons (Vegeu Imatge 70). Aquest procés es va repetir 3 vegades per tal de poder comparar i observar si existien variacions en les diferents lectures.

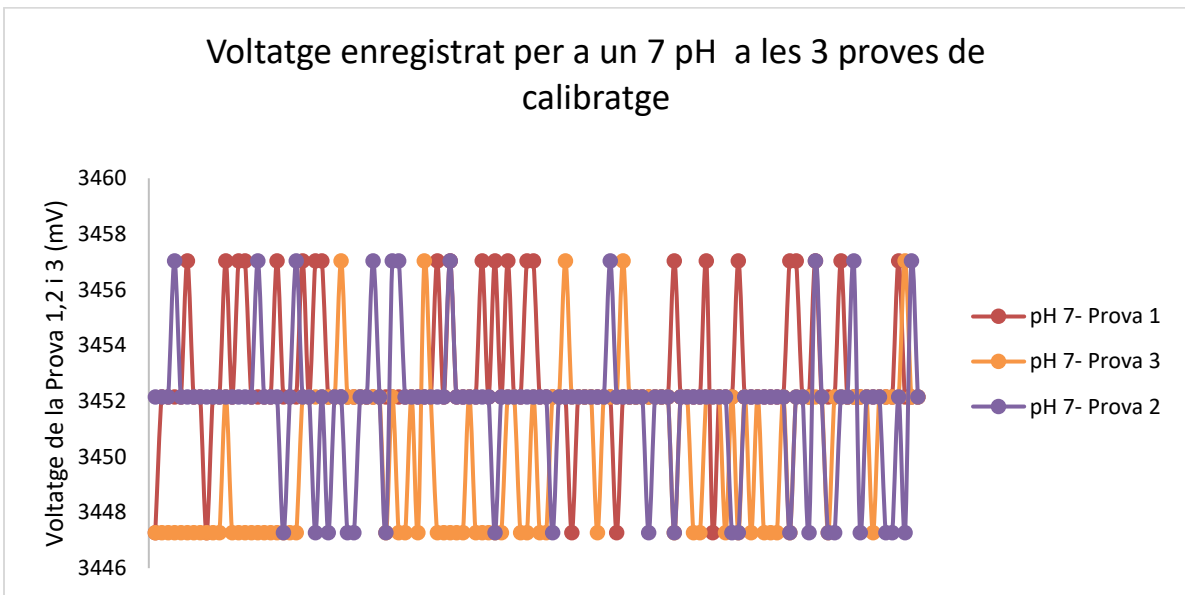


Imatge 70. Sensor de pH mesurant enregistrant el voltatge en mV del tampó. Font: Pròpia.

Per a iniciar les proves primerament s'introduïa el sensor a les mostres i s'esperava un temps prudencial fins que les mesures de voltatge s'estabilitzaven el millor possible. En els tres processos inicialment els voltatges enregistrats presentaven variacions, no és fins passat un minut que la lectura s'estabilitzava notablement. Per aquest motiu es van utilitzar les dades dels darrers dos minuts, on únicament es van agafar les últimes 82 dades enregistrades, ja que com es pot observar a les Gràfica 3 i Gràfica 4, encara existien outliers en el registre de dades. També es pot observar que els voltatges enregistrats tot i que ja no presentaven una desviació tan destacada van variant entre tres valors de voltatges diferents. Finalment, es van comparar les tres mitjanes resultants de cada una de les tres lectures dels tampons de 4 i 7 pH, i es va escollir que les mitjanes a emprar dels resultats obtinguts serien, per a les de 4 pH els valors de la primera prova i per a les de 7 pH els valors de la segona prova, ja que presentaven menys quantitat de outliers en les seves lectures.



Gràfica 3. Comparativa del voltatge enregistrat en les 3 proves de calibratge (pH 4). Font: Pròpia.

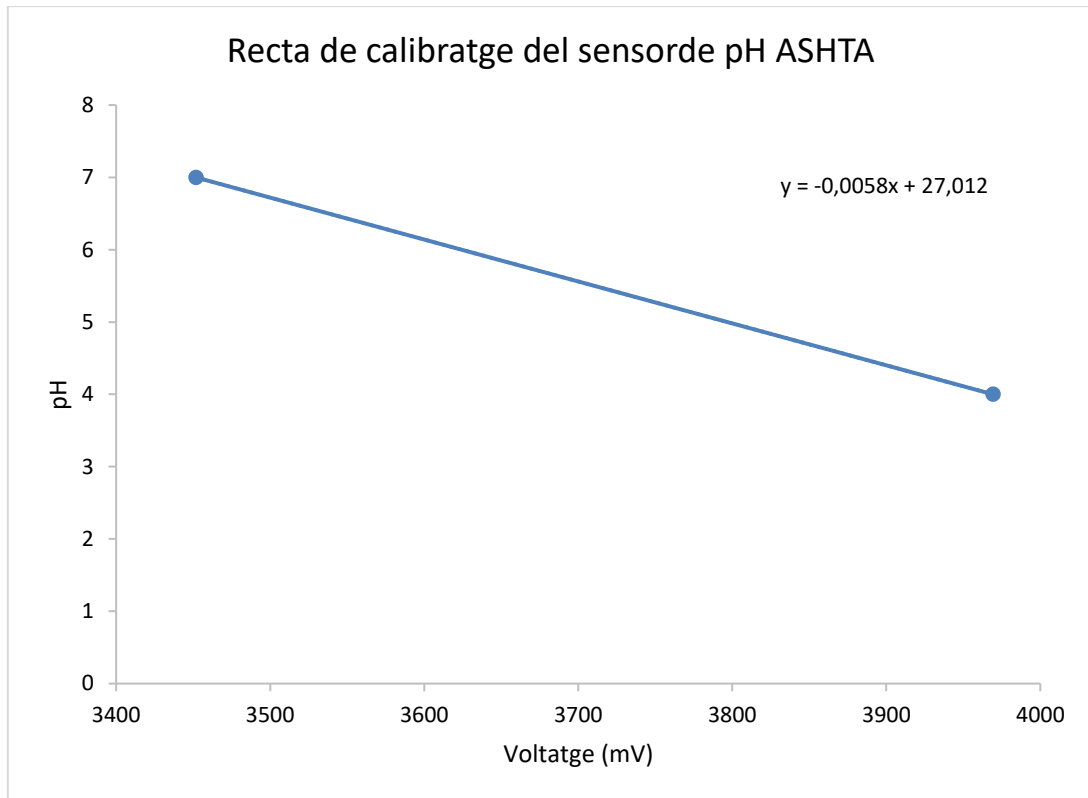


Gràfica 4. Comparativa del voltatge enregistrat en les 3 proves de calibratge (pH 7). Font: Pròpia.

Per a poder acabar el calibratge d'aquest sensor, calia establir una correlació entre el voltatge enregistrat per a cadascun dels dos valors de pH utilitzats, que en aquest eren 4 i 7 pH. A la Gràfica 5 es pot observar la fórmula de la recta de calibratge, la qual estableix la relació entre mV i pH, gràcies a l'ajust lineal d'aquestes dues dades.

Taula 15. Voltatge mitja de les diferents solucions de calibratge de pH. Font: Pròpia.

pH	Voltatge mitja enregistrat (mV)
4	3969,24
7	3451,784



Gràfica 5. Ajust lineal entre el voltatge enregistrat per el sensor de pH i els valors reals de les solucions. Font: Pròpia.

$$pH = 0,0058 * Voltatge(mV) + 27,012 \quad (15)$$

3.2.2. Calibratge del sensor de oxigen dissolt Atlas Scientific Mini Lab Grade Oxygen Probe

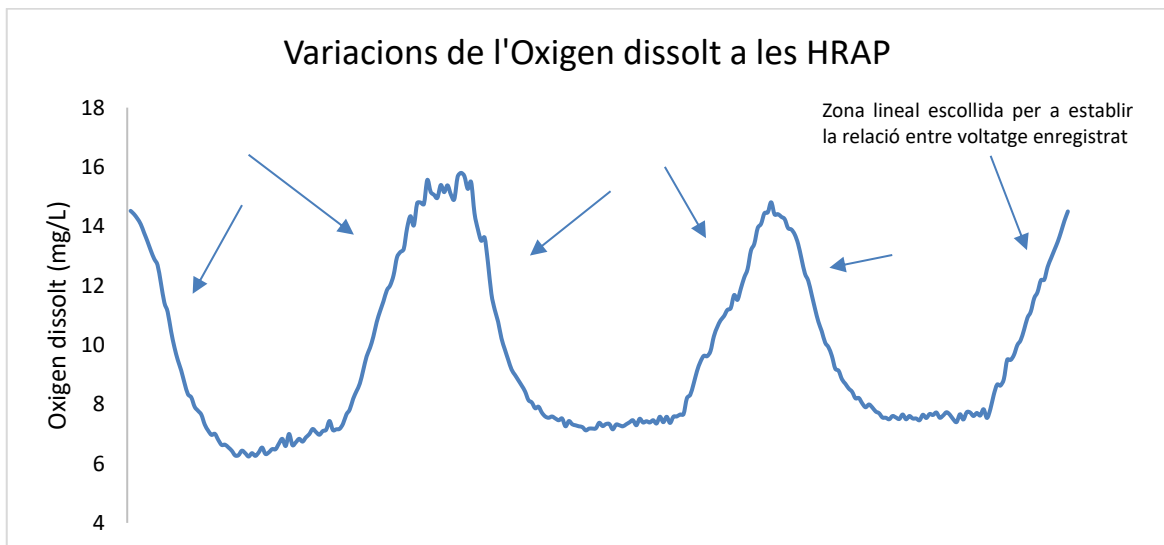
Els sensors convencionals de OD s'acostumen a calibrar a l'aire a un punt segons la Norma ISO 5813, però a causa de la naturalesa de la sensorització de baix cost es va decidir que calia establir una relació entre voltatge i OD en mg/L amb més punts de mesura. Per obtenir solucions amb diferents valors d'oxigen dissolt d'una forma eficient es va decidir fer ús de sistemes biològics de tractament d'aigües residuals, més específicament les HRAP, ja que en aquests sistemes varien diferents paràmetres de la qualitat de les aigües tractades, com pH, temperatura, OD i d'altres. Aquests sistemes estan instal·lats en el que es coneix com a llacunes, on el OD varia al llarg del dia, per la qual cosa deixant el sensor de OD instal·lat a les llacunes es podien enregistrar voltatges en un medi que variava el seu oxigen dissolt.

Una de les característiques principals dels sensors d'oxigen dissolt és que l'elèctrode d'aquestes ha d'estar submergit en una solució específica segons cada sensor, i s'ha d'assegurar una correcta estanquitat del sensor, ja que aquest líquid és molt volàtil i cristal·litza amb facilitat, és per això que es va recobrir el caputxó del sensor amb cinta adhesiva. Una altra característica és que no poden existir "bombolles" d'aire dins el caputxó ja que variarien les correctes lectures del sensor.



Imatge 71. Sensor de oxigen dissolt sense "bombolles" i la solució per a l'elèctrode. Font: Pròpia.

Pel calibratge es va utilitzar el codi dels Annex A2, en aquest s'enregistraven la lectura del voltatge del sensor cada 15 minuts. Per a poder establir una relació entre el voltatge enregistrat i les variacions de OD de les llacunes es van observar les dades enregistrades amb el sensor convencional Campbell CS511 que estava connectat al *datalogger* Campbell CR1000x. A les dades enregistrades pel sensor convencional es van visualitzar zones que tenien un creixement lineal ascendent i descendent. Són aquestes les zones d'interès per a establir una relació entre el voltatge enregistrat i les variacions de OD de l'aigua tractada de les llacunes.



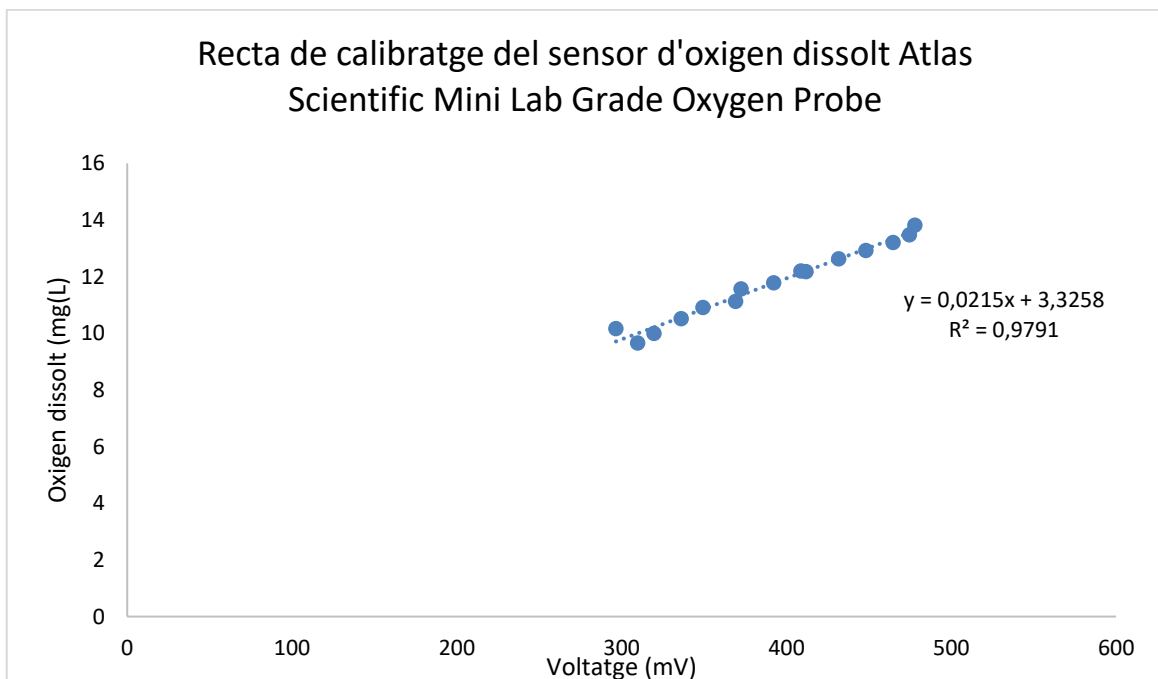
Gràfica 6. Variacions del OD en les HRAP. Font: Pròpia.

Es van enregistrar dades cada 15 minuts durant un cap de setmana (Vegeu Apartat 2.3.2), i es van escollir les següents dades per a establir una relació entre voltatge i valors de OD mitjançant l'ajust lineal de les dades que van ser enregistrades i que es poden visualitzar a la Taula 16.

Taula 16. Dades per a realitzar la recta de calibratge. Font: Pròpia.

OD (mg/L)	Voltatge enregistat(mV)
9,66	309,698783
9,99	319,588669
10,16	296,525779
10,51	336,085323
10,91	349,298859
11,12	369,078631
11,57	372,361749
11,78	392,182053
12,18	411,961825
12,2	408,678707
12,63	431,741597
12,92	448,238251
13,2	464,734905
13,48	474,624791
13,82	477,948441

De l'ajust lineal entre el voltatge enregistat i els valors de oxigen dissolt s'extreu una recta de regressió que proporciona la fórmula (16), la qual queda definida com la recta de calibratge d'aquest sensor.



Gràfica 7. Ajust lineal entre el voltatge enregistat per el sensor de OD i els valors reals de HRAP. Font: Pròpia.

$$OD = 0,0215 * Voltatge + 3,3258 \quad (16)$$

3.2.3. Calibratge del sensor de terbolesa DFRobot Turbidity sensor

Per al calibratge del sensor de terbolesa es van preparar un total de 7 solucions. Aquestes es van fer a partir d'una solució inicial d'aigua desionitzada i caolit¹³. Per preparar les diferents solucions es va partir d'una concentració inicial de 0,1 g/mL, en un volum total de 100 mL d'aigua desionitzada. Per a preparar les solucions es va anar diluint la concentració inicial. Per fer-ho, es necessitava saber les diferents solucions finals a preparar per tal de poder determinar el volum alíquota.

$$C_i/C_f = V_t/V_{aliquota} \quad (17)$$

- V_t : Volum total
- C_i : Concentració inicial

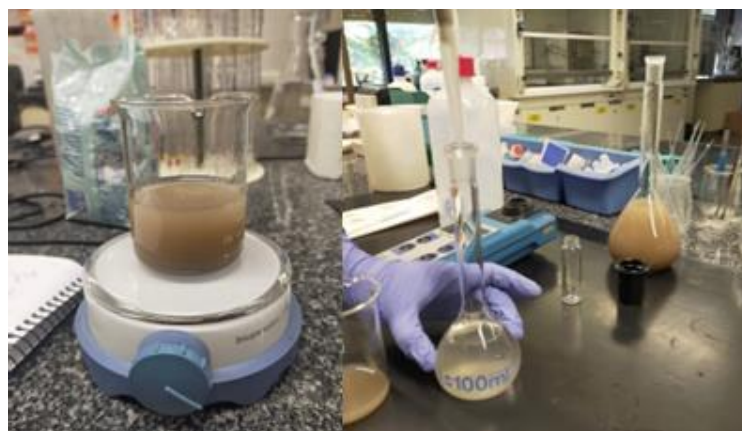
Taula 17. Volum alíquota per a la preparació de les concentracions finals de terbolesa. Font: Pròpia.

Concentració final (g/mL)	Volum alíquota (mL)	NTU
0	0	0
0,02	20	10
0,04	40	36,8
0,06	60	61
0,08	80	131
0,1	10	187

Amb la fórmula (17) i a partir de les dades constants V_t i C_i , i definint les diferents concentracions finals (C_f) s'obté el Volum alíquota (V_a) que indica la quantitat de concentració inicial a barrejar amb aigua desionitzada fins a obtenir solucions de 100 ml. A la Taula 17 es poden observar les concentracions finals esperades, així com el volum alíquota corresponent i la seva corresponent terbolesa en unitats de NTU.

El material utilitzat per a preparar les diferents solucions es pot visualitzar a la Imatge 72 i va ser el següent:

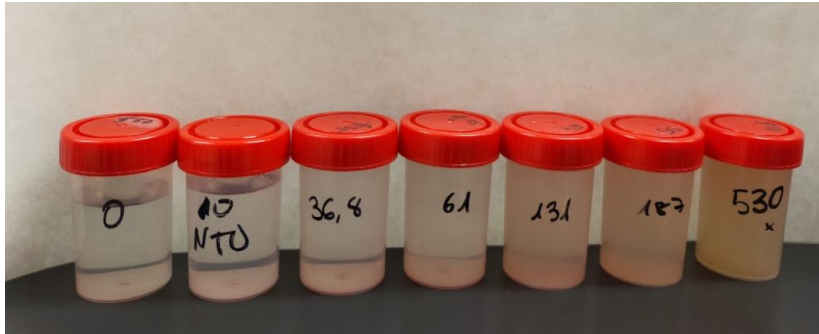
- 1 matràs aforat
- 1 vas de precipitat
- Un matràs aforat amb la concentració inicial



Imatge 72. Realització de les solucions partint d'una concentració inicial. Font: Pròpia.

¹³ Argila refractària formada per descomposició del feldespat, i constituïda gairebé exclusivament per caolinita.

Els valors de la terbolesa de les concentracions es van obtenir amb un turbidímetre convencional, el HANNA HI93703. Les diferents solucions elaborades al matràs aforat es guardaven en tamps esterilitzats, com es pot visualitzar a la Imatge 73.



Imatge 73. Tamps esterilitzats amb les diferents solucions de turbiditat. Font: Pròpia.

El sensor de turbiditat de DFRobot és un sensor analògic, per tant, no té cap llibreria associada al seu funcionament, i és per aquest motiu que calia determinar una recta de calibratge. Es van enregistrar els valors del voltatge durant un període de 3 minuts. Observat les es va poder confirmar que aquest sensor obtenia lectures constants dels 3 minuts, per la qual cosa que no va ser necessari realitzar calcular la mitjana del voltatge enregistrat al llarg dels 3 minuts de lectura.

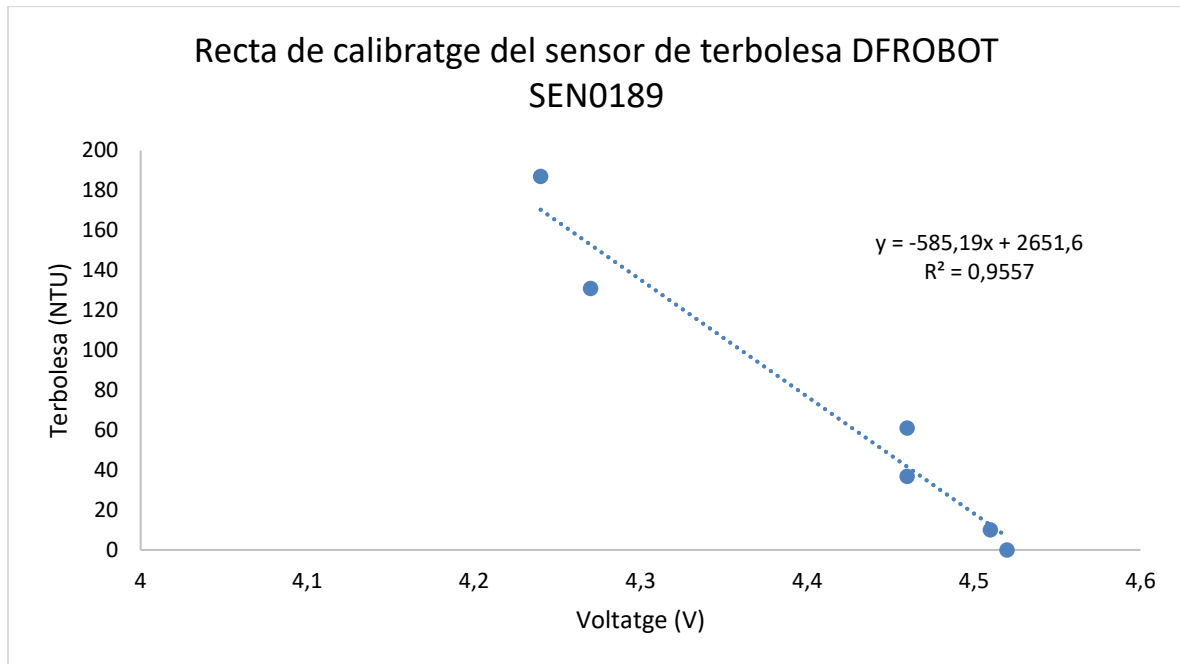
Taula 18. Voltatge de les diferents solucions de calibratge de turbiditat. Font: Pròpia.

Terbolesa (NTU)	Voltatge enregistrat (V)
0	4,52
10	4,51
36,8	4,46
61	4,44
131	4,27
187	4,24

Per a extreure l'equació de la recta de calibratge es va realitzar un ajust lineal entre el voltatge enregistrat per a cada solució i els valors de turbiditat coneguts de les solucions. En el cas del calibratge d'aquest sensor es va decidir enregistrar el voltatge en Volts utilitzant el codi del Annex A3.



Imatge 74. Sensor de turbiditat dins una solució de calibratge. Font: Pròpia.



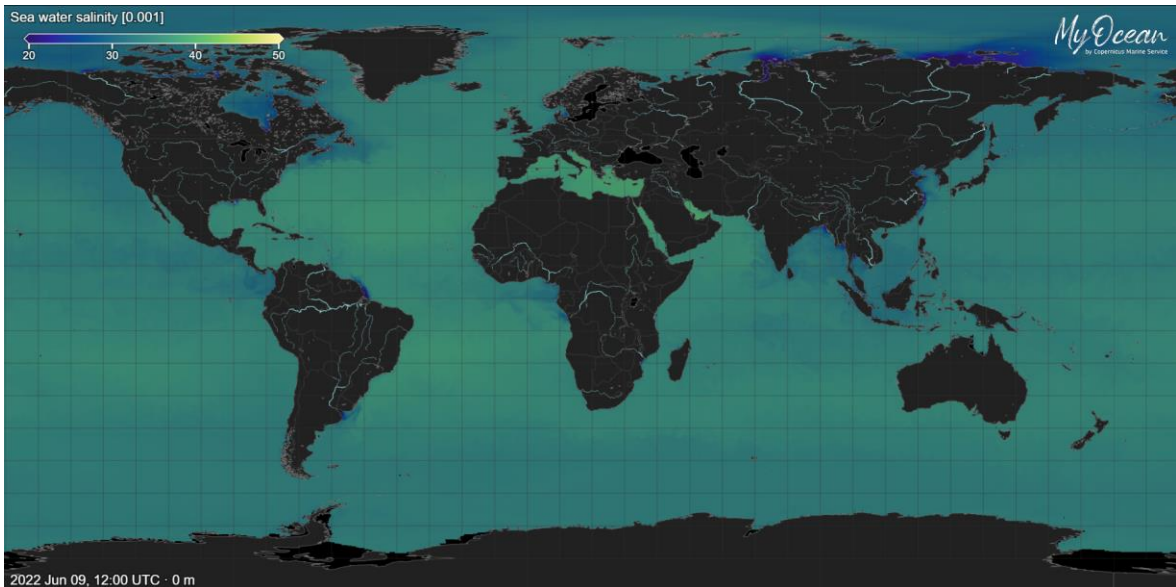
Gràfica 8. Ajust lineal entre el voltatge enregistrat per el sensor de terbolesa i els valors reals de les solucions.

La recta de calibratge que es va obtenir a partir de la regressió lineal de les dades de la Gràfica 8. Aquesta presenta coeficient de regressió de $R^2=0,995$, per lo que és pot afirmar que si existeix una linealitat, i que per tant es pot assumir la validesa dels resultats.

$$Terbolesa = -585,19 * Voltatge + 2651,6 \quad (18)$$

3.2.4. Calibratge del sensor de conductivitat DFRobot EC MeterK=10

Per a poder calibrar el sensor DFRobot EC Meter K=10 es van preparar 10 solucions al laboratori. Per a preparar aquestes mostres es va contemplar prèviament els rangs de salinitat/conductivitat tant de la costa com dels oceans. Per fer-ho es va fer ús de les dades recollides pel Satèl·lit Copernicus. Les dades es van descarregar de MyOcean Viewer, on les unitats de mesura són en PSU, que fent una generalització s'interpreten com a ppt \approx g/L.



Imatge 75. Distribució global de la salinitat en PSU. Font: Pròpia., extreta de *MyOcean Viewer*.

De les dades observades es va poder determinar que els rangs de salinitat costanera i oceànica, varien segons la situació geogràfica, així com segons altres factors naturals o artificials com són els deltes, les desembocadures d'aigües residuals urbanes o bé d'agricultura o ramaderia. Per tot, a la Taula 19 es poden observar quines van ser les 10 solucions que es van preparar pel calibratge.

Les solucions es van preparar utilitzant com a sals el Clorur de Sodi (NaCl), ja que tant la conductivitat com la salinitat segons Pilson (1998) si es fa una generalització de la mesura, es pot assumir que tota la conductivitat és deguda al NaCl per tal de facilitar la mesura.

Per preparar les solucions es volia partir d'una concentració inicial de 50 g/L de clorur de sodi per litre (S=50 g/L) i anar diluint aquesta concentració per obtenir les diferents mostres. Per a facilitar la tasca al laboratori és decidir es va decidir utilitzar una concentració inicial equivalent de 25 g de HCl en 0,5 L.

$$50 \text{ g NaCl}/1000\text{ml} * 500 \text{ ml} = 25 \text{ g NaCl}$$



Imatge 76. Preparació dels 25 g de Clorur de sodi per a la concentració inicial. Font: Pròpia.

Per a la preparació de les concentracions es va utilitzar la formula (17).

$$C_i/C_f = V_t/V_{aliquota}$$

Amb aquesta formula a partir de les dades que són constant V_t i C_i , i definint les diferents concentracions finals (C_f) s'obté el volum alíquota (V_a) que indica la quantitat de la solució inicials que es necessita. A la Taula 19 es presenten les respectives concentracions finals esperades amb el seu volum alíquota corresponent.

Taula 19. Volum alíquota per a la preparació de les concentracions finals de conductivitat. Font: Pròpia.

Concentració final (g/L)	Volum alíquota (mL)
5	5
10	10
15	15
20	20
25	25
30	30
35	35
40	40
50	50

El material per a realitzar les diferents solucions es pot visualitzar a la Imatge 77 i va ser el següent:

- 1 matràs aforat
- Una proveta
- Un matràs aforat amb la concentració inicial
- 10 tampons esterilitzats



Imatge 77. Material utilitzat per a la preparació de les diferents concentracions. Font: Pròpia.

Per a obtenir les solucions especificades a la Taula 19 s'agafava el volum alíquota calculat i s'introduïa a una proveta (Imatge 78), aquest després s'introduïa a un matràs aforat de 500 ml. Per acabar de preparar la concentració es vessarà l'aigua desionitzada a la proveta per tal de no perdre cap sal i aquest volum s'introduïa junt amb més aigua desionitzada al matràs aforat fins a aconseguir les solucions establertes anteriorment (Imatge 78). Aquestes concentracions es van ubicar a uns tampons de plàstic, els quals només s'obrien el temps necessari per a realitzar els calibratges per tal d'evitar l'evaporació de les sals.



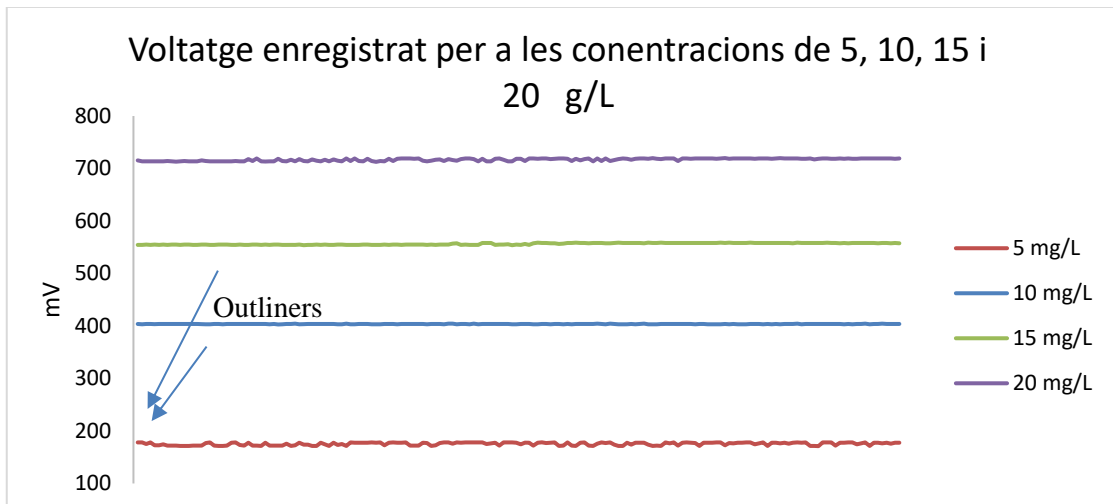
Imatge 78. Preparació de les concentracions. Font: Pròpia.

Per a prendre les mesures del voltatge, primerament es va introduir el sensor a les diferents mostres i es va esperar un temps prudencial perquè el sensor presentes una lectura estable de voltatge.

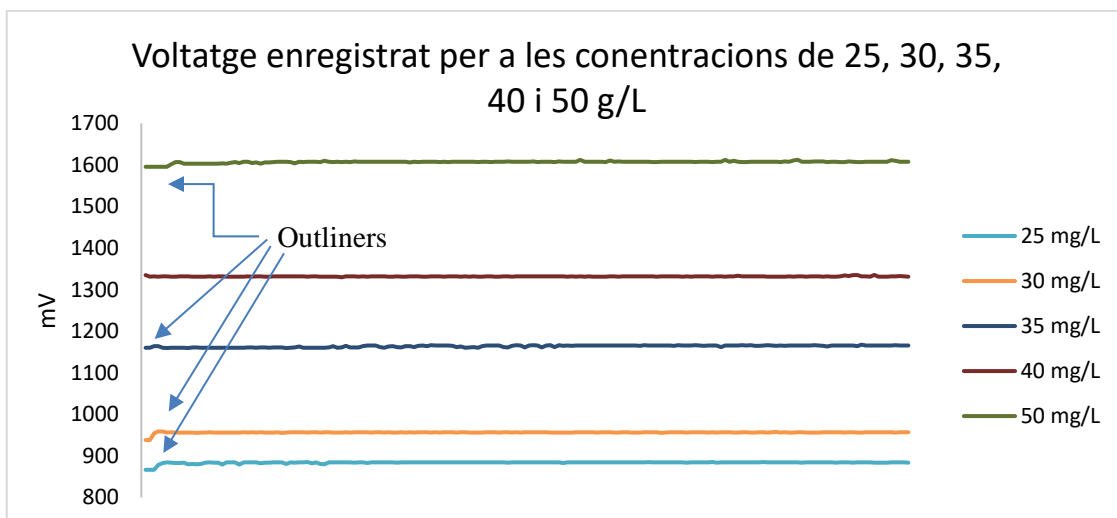


Imatge 79. Imatge de com es va col·locar el sensor amb tampones. Font: Pròpia.

Un cop els valors es van estabilitzar es van enregistrar els voltatges de cadascuna de les mostres, enregistant-lo cada segon durant 3 minuts i es va fer la mitjana dels resultats obtinguts per tal de tenir un voltatge que fos representatiu de les dades obtingudes i perquè s'ajustessin a la variabilitat que presenten els sensors de baix cost en les seves lectures. Del registre de dades es van extreure alguns outliers inicials de l'enregistrament de dades, els quals són observables a les Gràfica 9 i Gràfica 10.



Gràfica 9. Voltatge enregistat per el sensor de conductivitat en les diferents concentracions. Font: Pròpia.



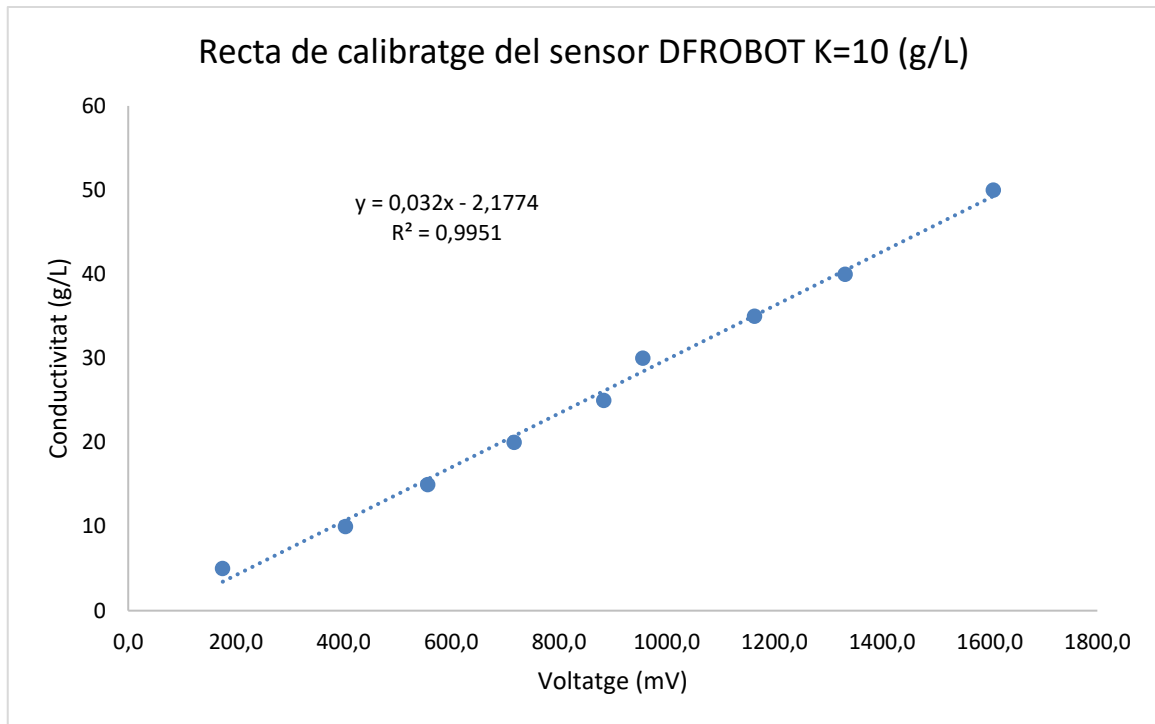
Gràfica 10. Voltatge enregistat per el sensor de conductivitat en les diferents concentracions. Font Pròpia.

A la Taula 20 es poden observar els valors de la conductivitat en mS/cm, g/L i els diferents valors de voltatge mitja enregistrats amb el sensor de baix cost.

Taula 20. Voltatge mitja de les diferents solucions de calibratge de conductivitat. Font: Pròpia.

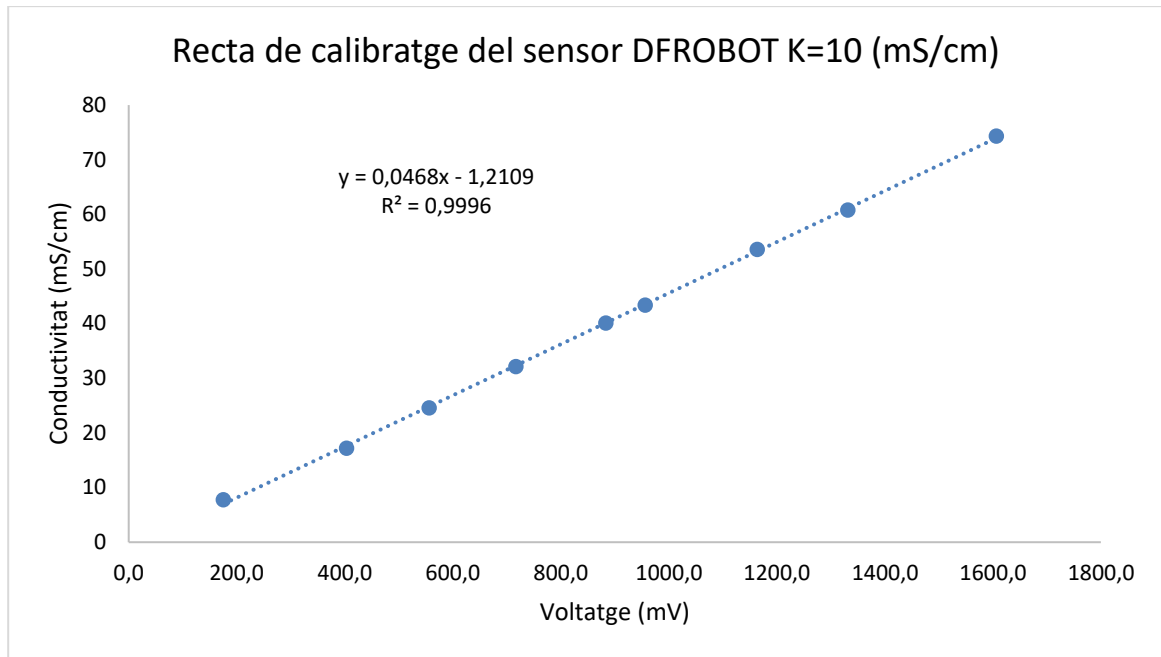
<i>g/L</i>	<i>mS/cm</i>	<i>Voltatge mitja enregistrar (mV)</i>
5	7,77	175,5
10	17,17	403,7
15	24,6	556,4
20	32,1	716,9
25	40,1	883,6
30	43,4	956,2
35	53,6	1163,7
40	60,8	1331,7
50	74,3	1606,9

Després de realitzar la mitjana dels voltatges enregistrats es va realitzar un ajust lineal entre el voltatge enregistrat pel sensor de baix cost i els valors de salinitat real en g/L i mS/cm dels diferents tampons preparats per al calibratge.



Gràfica 11. Ajust lineal entre el voltatge enregistrat per el sensor de conductivitat i els valors reals de les solucions en ppm. Font: Pròpia.

$$Conductivitat = 0,032 * Voltatge - 2,1774 \quad (19)$$



Gràfica 12. Ajust lineal entre el voltatge enregistrat per el sensor de conductivitat i els valors reals de les solucions en mS/cm. Font: Pròpia.

$$Conductivitat = 0,0468 * Voltatge - 21,2109 \quad (20)$$

3.3. Validació dels sensors

3.3.1. Validació del sensor de pH amb el monitoratge de les HRAP

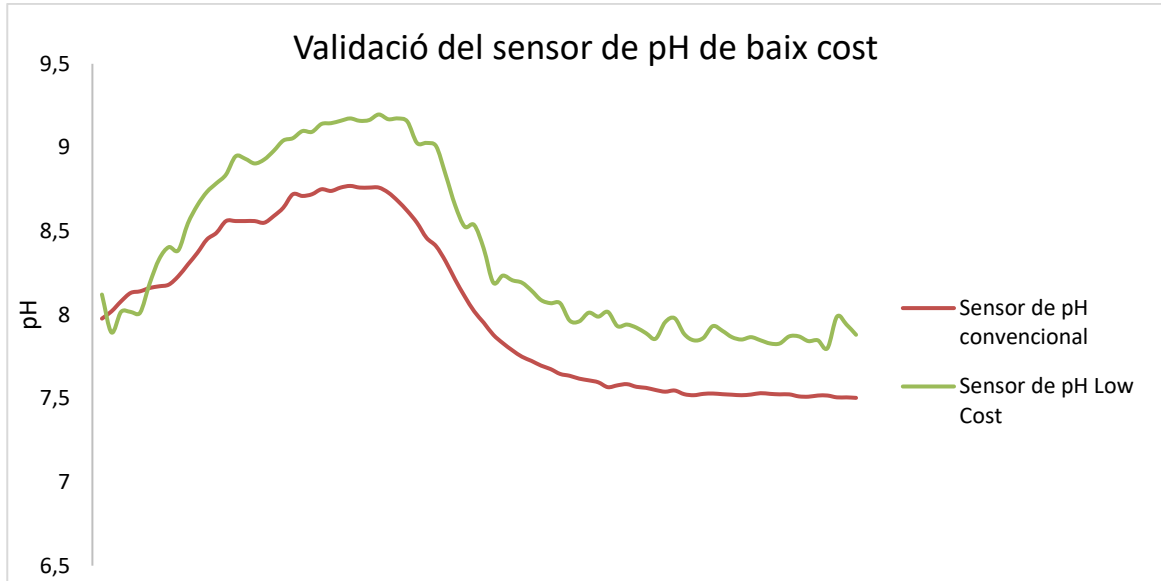
Les dades amb relació al pH de les llacunes, que van ser recollides entre el dia u i dos de maig mostren una clara variació, ja que els valors de les llacunes varien segons la franja horària, a causa de l'activitat biològica de les algues que tracten les aigües. Això és conseqüència del fet que les algues creixen amb la llum del sol, consumeixen substrat (Carboni i Nitrogen) i alliberen oxigen. L'alcalinitat d'aquestes aigües tractades junt amb els nutrients consumits seran molt importants per definir el pH del sistema. L'activitat d'aquestes algues, que creixen i que realitzen l'absorció fotosintètica provoquen que disminueixi la concentració d'hidròxid, el que fa alterar el pH augmentant-lo (Ranjan, et al. 2000). A la tarda/nit amb la falta de llum solar, es dona la respiració endògena, i la inactivitat de les microalgues que alliberen diòxid de carboni, el que provoca l'increment de ions d'hidrogen, disminuint així el pH (Garcia et al. 2015). Els rangs en els quals es comprendran les variacions del pH a les llacunes serà d'entre un 7-10 pH, ja que és el rang en el qual la majoria de les algues creixen.

A la Gràfica 13 es poden observar les dades recollides pel sensor convencional amb el *datalogger*. En aquestes es pot apreciar com el pH varia en un període de temps de 15 minuts. Les variacions són notables al llarg del temps, on a primera hora del matí el pH és de l'ordre de pH 7,5- 8. Aquest s'incrementa al llarg del matí fins a un pH 9,4 (més bàsica), el que és coherent, ja que com s'ha esmentat, les algues creixen i són sensibles a la llum solar, per la qual cosa la concentració d'hidròxid és menor, i, per tant, el pH augmenta a una solució més bàsica. Després s'observa com aquest va disminuint a la tarda i a la nit, ja que la llum solar rebuda és menor per la qual cosa el pH disminueix a valors similars als de primera hora del matí.

El sensor va ser instal·lat a les llacunes com és visible a la Imatge 80, on es pot observar el sensor adherit a una barra de PVC amb cinta adhesiva negra. Es van enregistrar les dades i estimar el pH amb la fórmula (15) calculada al Apartat 3.2.1, i el resultats que se'n van obtenir són els visibles a la Gràfica 13.

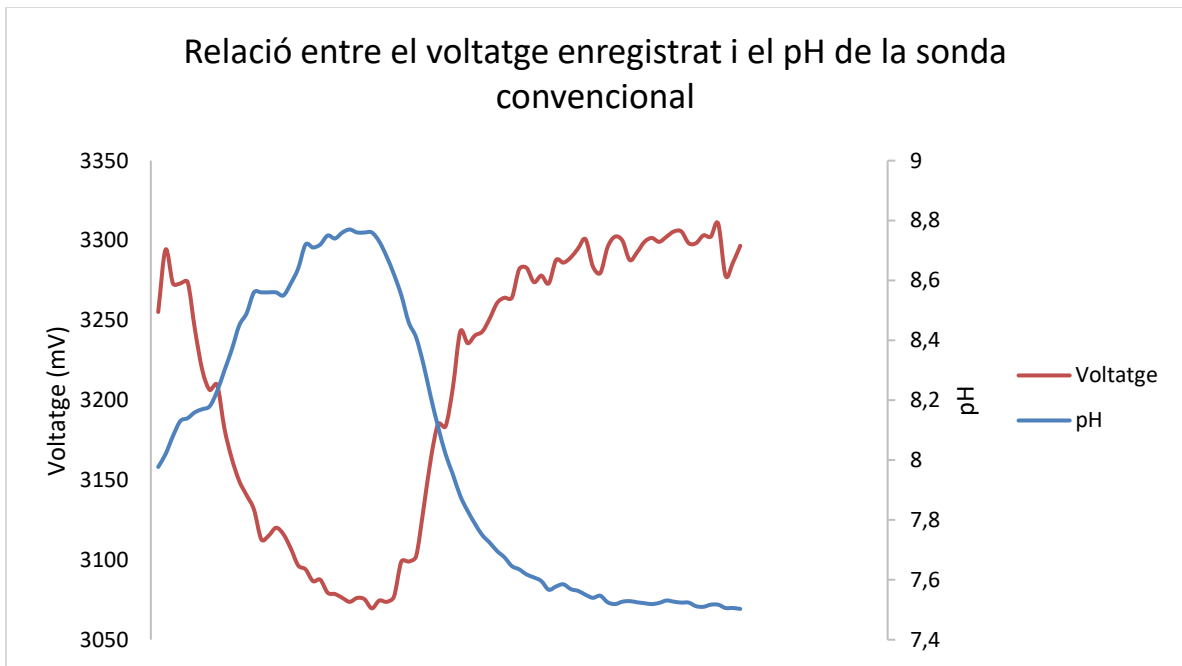


Imatge 80. Sensor de pH instal·lat a les llacunes. Font: Pròpia.



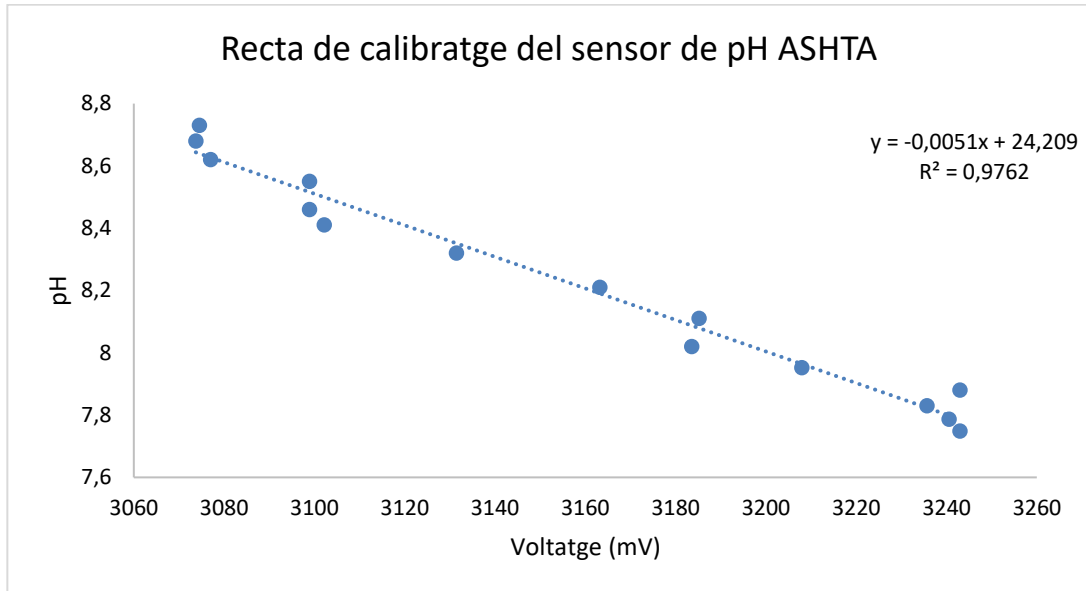
Gràfica 13. Comparació de la sensorització del pH de les HRAP entre el sensor de pH de baix cost i el convencional. Font: Pròpia.

El RMSE de les dades enregistrades és de $\pm 0,372185$ pH. Es podria considerar que aquest error és acceptable, però s'ha de recordar que el pH es basa en una escala logarítmica, per la qual cosa un error d'un 0,3 pH representa una variació del pH de prop d'un 36% respecte del valor real. Per tal d'intentar obtenir uns resultats més acurats en la transformació del voltatge enregistrat en valors de pH real, es va voler establir una nova recta de calibratge, és per això que es va observar la Gràfica 14, la qual relaciona les lectures del voltatge enregistrat per la sonda de baix cost i el pH real enregistrat per la sonda convencional. En aquesta gràfica es va buscar una zona on existís una linealitat, que en aquest cas era entre les 18:45 i les 22:15, per tal d'extreure les dades per a realitzar el calibratge.



Gràfica 14. Comparació entre el voltatge enregistrat per el sensor de pH de baix cost i els valors reals de pH de les HRAP. Font: Pròpia.

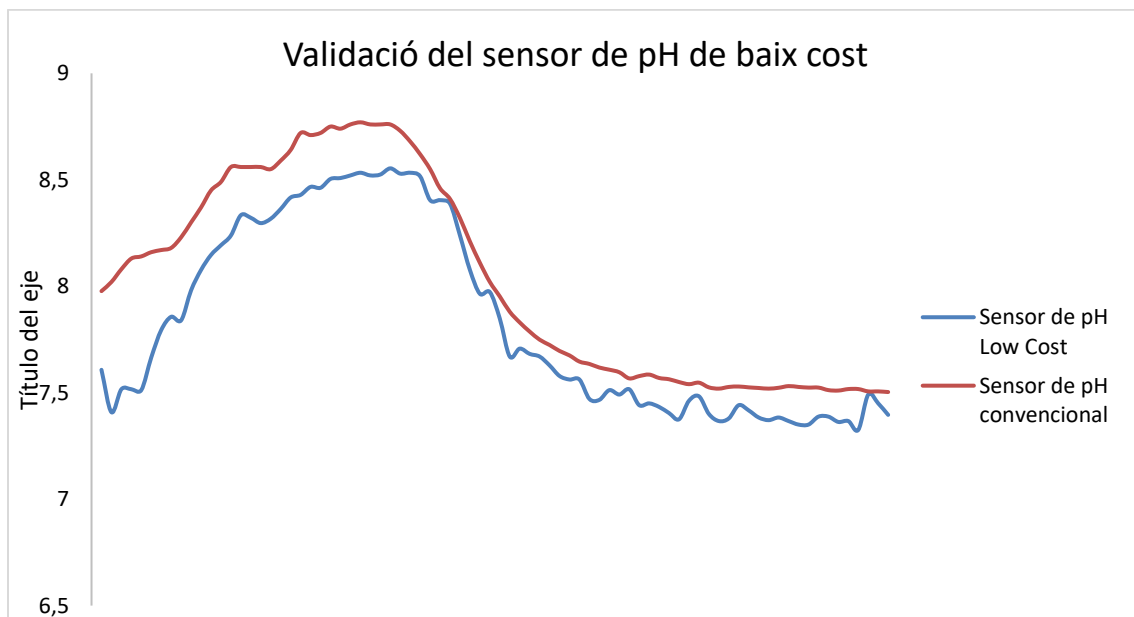
Es va establir una relació entre el voltatge enregistrat pel sensor de baix cost a aquestes hores i el valor real del pH de la sonda convencional. A la Gràfica 15 es troba l'ajust lineal realitzat, per a l'anàlisi d'aquestes dades, establint una nova fórmula per a relacionar el voltatge enregistrat pel sensor amb els valors de pH reals.



Gràfica 15. Ajust lineal entre el voltatge enregistrat per el sensor de pH i els valors reals de les de pH de les HRAP. Font: Pròpia.

$$pH = -0,0051 * Voltatge + 24,209 \quad (21)$$

A la Gràfica 16 es pot observar els nous valors de pH enregistrat aparti de la fórmula (21), on ara el RMSE és de 0,236 pH, i per això finalment la recta de calibratge que s'utilitzarà al projecte serà la fórmula (21), ja que l'error que presenta és menor que el que presenta la fórmula (15).



Gràfica 16. Comparació de la sensorització del pH de les HRAP entre el sensor de pH de baix cost i el convencional. Font: Pròpia.

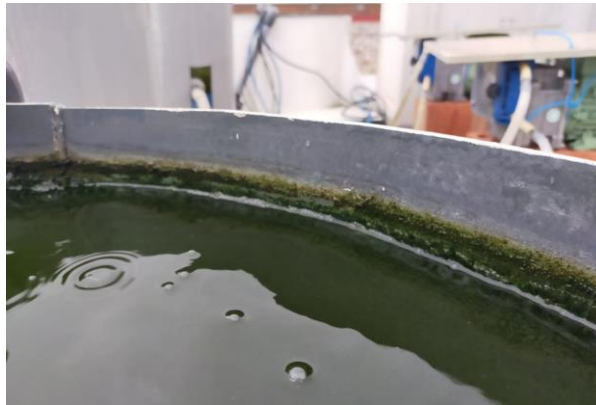
Els errors calculats es recopilen a la Taula 21 i es pot observar com la precisió del sensor és del $\pm 2,43\%$, així com els diferents errors calculats, i es determina que aquest sensor de baix cost presenta un error assumible pel que fa a l'enregistrament de dades, però cal tenir present que al tractar-se del pH les petites variacions d'aquest suposen un augment o decreixement molt elevat en la concentració de ions d'Hidrogen que són els que determinen la basicitat o acidesa de les substàncies.

Taula 21. RMSE, MAE, MSE i MAPE del sensor de baix cost de pH respecte el sensor convencional convencionals. Font: Pròpia.

Errors	Resultats	Unitats
RMSE	0,236	pH
MAE	0,197	pH
MSE	0,055	pH
MAPE	2,432	%

3.3.2. Validació del sensor de oxigen dissolt amb el monitoratge de les HRAP

Les variacions esperades al llarg del dia del l'OD a les llacunes, són degudes a la fotosíntesi de les algues, i és normal trobar altes variacions d'aquest paràmetre en relació al dia i la nit, com es pot observar a la Gràfica 6. Les variacions de l'Oxigen com s'ha esmentat amb anterioritat també poden dependre dels factors hidrodinàmics, ja que existeixen fenòmens com l'aeració, que provoquen la dissolució de l'oxigen a les aigües, la velocitat del corrent d'aigua així com el fregament amb les parets pot afectar a l'anomenada aeració, per aquest motiu el manteniment d'aquests sistemes és tan important, ja que l'acumulació d'algues a les parets afecta directament a paràmetres com l'Oxigen dissolt.

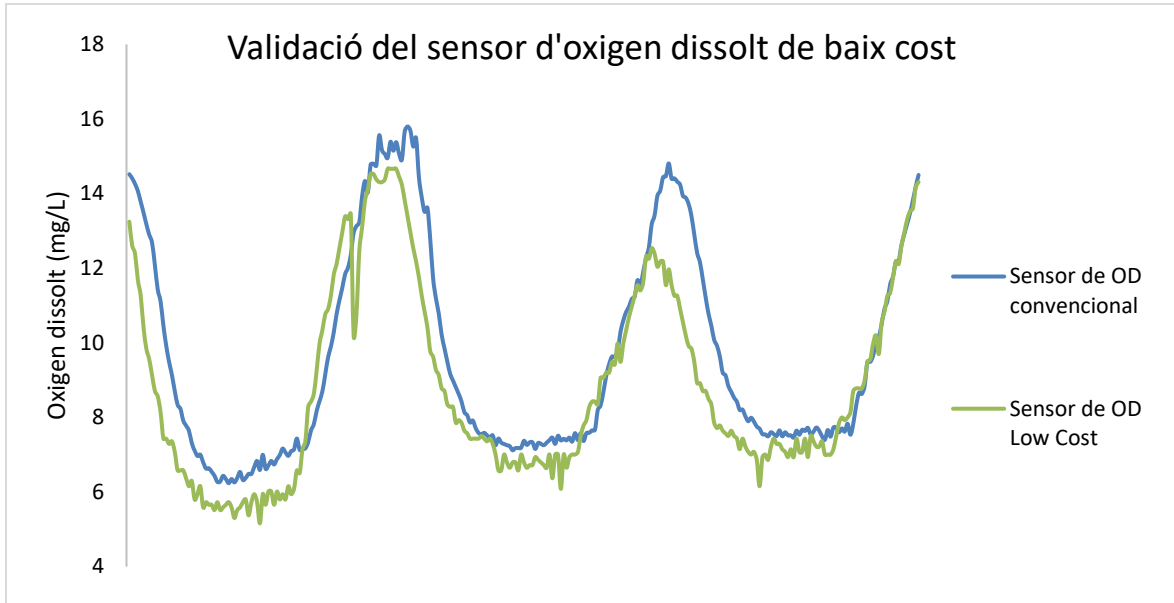


Imatge 81. Algues acumulades a les parets de les llacunes. Font: Pròpia.

Les HRAP funcionen gràcies a l'oxidació de la matèria orgànica i a l'oxigenació fotosintètica de les microalgues presents, aquesta fotosíntesi és alimentada pel CO_2 dissolt a l'aigua així com de la llum solar. La fotosíntesi provoca l'alliberació d'oxigen, el qual és utilitzat per els bacteris per a diferents activitats intrínseques a la seva naturalesa segons Cerón et al. (2015). Els nivells de OD poden sobrepassar els 15 mg/L pel matí, mentre que a la tarda/nit aquests nivells disminueixen, degut a que la fotosíntesi és inexistente, i les algues han de "respirar" aquest oxigen present a les aigües. El sensor d'oxigen dissolt va ser instal·lat a les llacunes amb cinta adhesiva a un tub de PVC, per tal d'enregistrar durant un cap de setmana. Una de les característiques principals dels sensors d'oxigen dissolt com ja s'ha comentat, és que l'elèctrode d'aquests estan submergits en una solució específica per a cada sensor. Aquestes solucions són molt volàtils, per tant, si el sensor no té una estanquitat correcta aquest líquid pot cristal·litzar, el que provocaria lectures errònies per part del sensor.



Imatge 82. Sensor de oxigen dissolta instal·lat a les HRAP. Font: Pròpia.



Gràfica 17. Comparació de la sensortització de l'oxigen dissolt de les HRAP entre el sensor de pH de baix cost i el convencional. Font: Pròpia.

Els resultats de la comparativa del sensor de baix cost i el convencional és visible a la Gràfica 17 on es veu clarament que el sensor de baix cost té resultats molt similars. Per tal de contrastar la precisió d'aquest sensor es van calcular els diferents errors que es presenten a la Taula 22, on es determina que el sensor d'Atlas Scientific d'oxigen dissolt té una precisió del 10,38 %.

Taula 22. RMSE, MAE, MSE i MAPE del sensor de baix cost de oxigen dissolt respecte el sensor convencional. Font: Pròpia.

Errors	Resultats	Unitats
RMSE	1,395	mg/L
MAE	1,036	mg/L
MSE	1,946	mg/L
MAPE	10,384	%

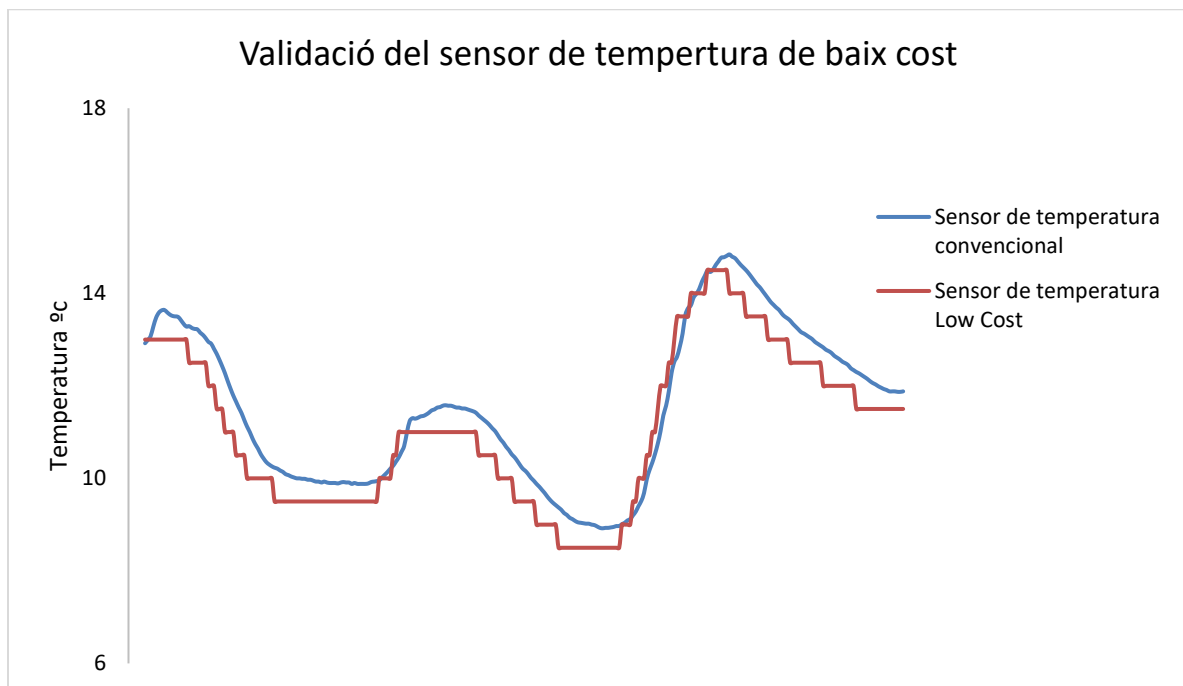
3.3.3. Validació del sensor de temperatura amb el monitoratge de les HRAP

La temperatura és un paràmetre que pot afectar a molts altres com el pH, la conductivitat, o a la solubilitat dels gasos, a més, és determinant per a la vida microbacteriana existent a les aigües de les llacunes. La majoria de cultius d'algues proliferen a temperatures d'entre els 16 i els 27 °C, temperatures inferiors o superiors no es consideren apropiades per al creixement de les algues motiu pel qual no tindria sentit tenir en funcionament les HRAP ubicades en zones on les temperatures de treball no fossin les adequades (V. Cerón et al. 2015).

El sensor de temperatura es va instal·lar a les llacunes sobre un tub de PVC amb cinta adhesiva i es van estar enregistrant dades durant tot un dia. A la Gràfica 18 es poden observar les variacions de la temperatura al llarg d'un dia segons el sensor convencional, juntament amb la temperatura enregistrada pel sensor de baix cost adquirit.



Imatge 83. Sensor de temperatura instal·lat a les HRAP. Font: Pròpia.



Gràfica 18. Comparació de la sensortització de la temperatura de les HRAP entre el sensor de temperatura de baix cost i el convencional. Font: Pròpia.

A la Gràfica 18 es pot observar com existeix una similitud entre les dades recollides pel sensor convencional i les del sensor de baix cost. Cal remarcar que la pinta que fan les dades del sensor de baix cost són com "esglaons" això és degut a que el sensor DS18B20 té una resolució de 0,5 ° C, ja que els intervals són de 0,5, generant aquest tipus d'evolució "esglaonada". Es van realitzar els càlculs dels diferents errors estudiats en aquest projecte, obtenint els resultats visibles a la Taula 23, on s'aprecia que aquest sensor té una precisió d'un 5,68 %.

Taula 23. RMSE, MAE, MSE i MAPE del sensor de baix cost de temperatura respecte el sensor convencional convencionals. Font: Pròpia.

Errors	Resultats	Unitats
RMSE	0,583	°C
MAE	0,532	°C
MSE	0,340	°C
MAPE	4,684	%

3.3.4. Validació dels sensors amb mesures puntuals dels fangs activats



Imatge 84. Sonda de pH instal·lada per realitzar les mesures puntuals. Font: Pròpia.

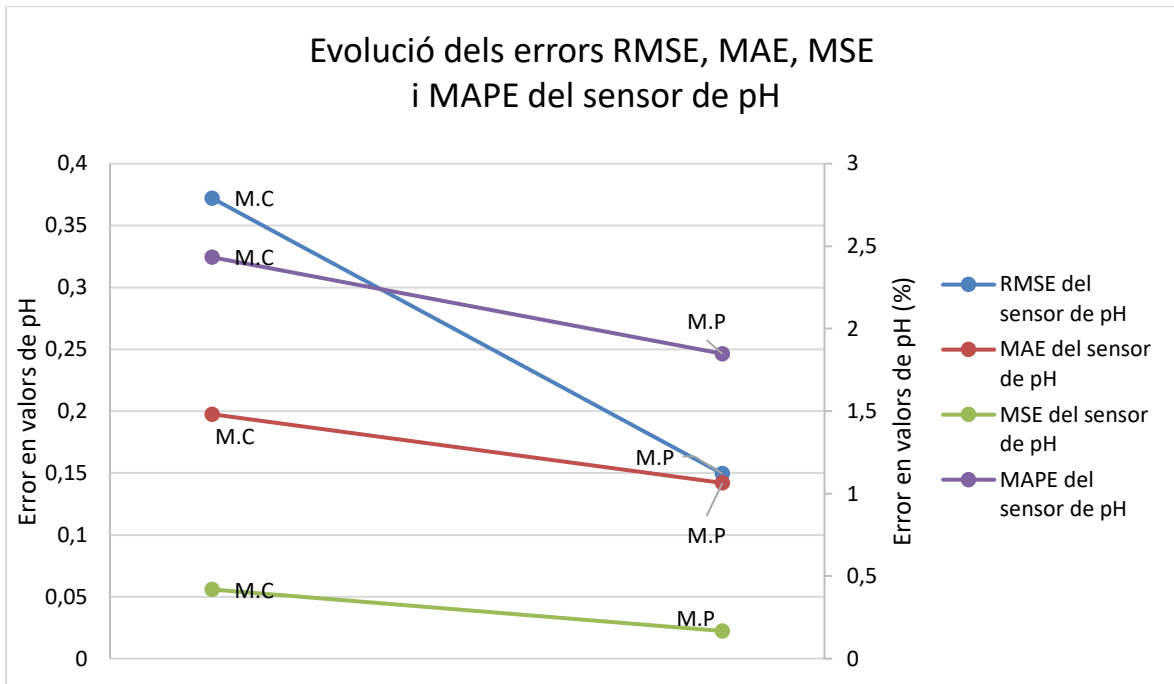
Es van fer un total de 5 registres de dades per a l'estudi de la viabilitat dels sensors per fer mesures puntuals, aquestes es van enregistrar en diferents dies, a la Taula 24 es presenten els diferents resultats obtinguts. En aquesta es poden observar els diferents errors estudiats entre els resultats obtinguts amb la instrumentació utilitzada de baix cost i la convencional.

Taula 24. Dades obtingudes de les mesures realitzades en dies puntuals per al control de la planta: Font: Pròpia.

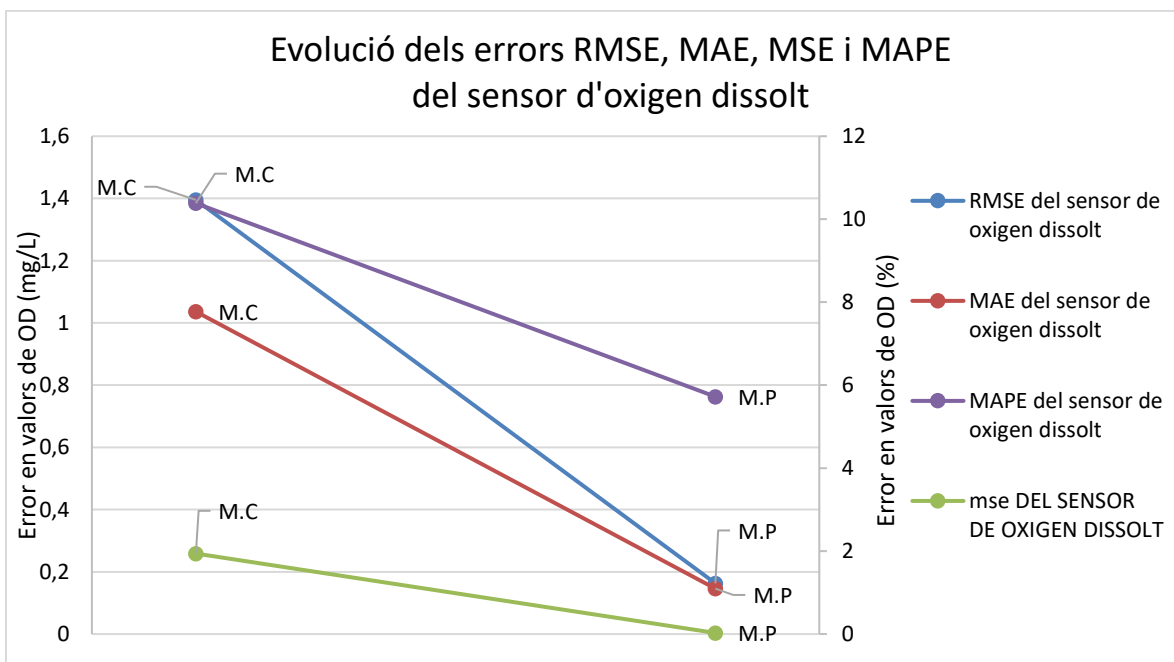
Dies de les mesures	Lovibond SensoDirect 150	Dades del sensor LC de OD	Crison meter 506	Dades del sensor LC de pH	Lovibond SensoDirect 150	Dades del sensor LC de temperatura
08/05/2022	4,66	4,52	7,71	7,55	18	18,5
15/05/2022	4,31	4,4	7,73	7,89	17,3	18
23/05/2022	1,32	1,07	7,52	7,68	17,2	17,5
01/06/2022	5,91	6,11	7,5	7,45	17,9	18
09/06/2022	4,19	4,24	7,82	8	17,2	17,5

Taula 25. RMSE, MAE, MSE i MAPE del sensor de baix cost de pH respecte el sensor convencional convencionals. Font: Pròpia.

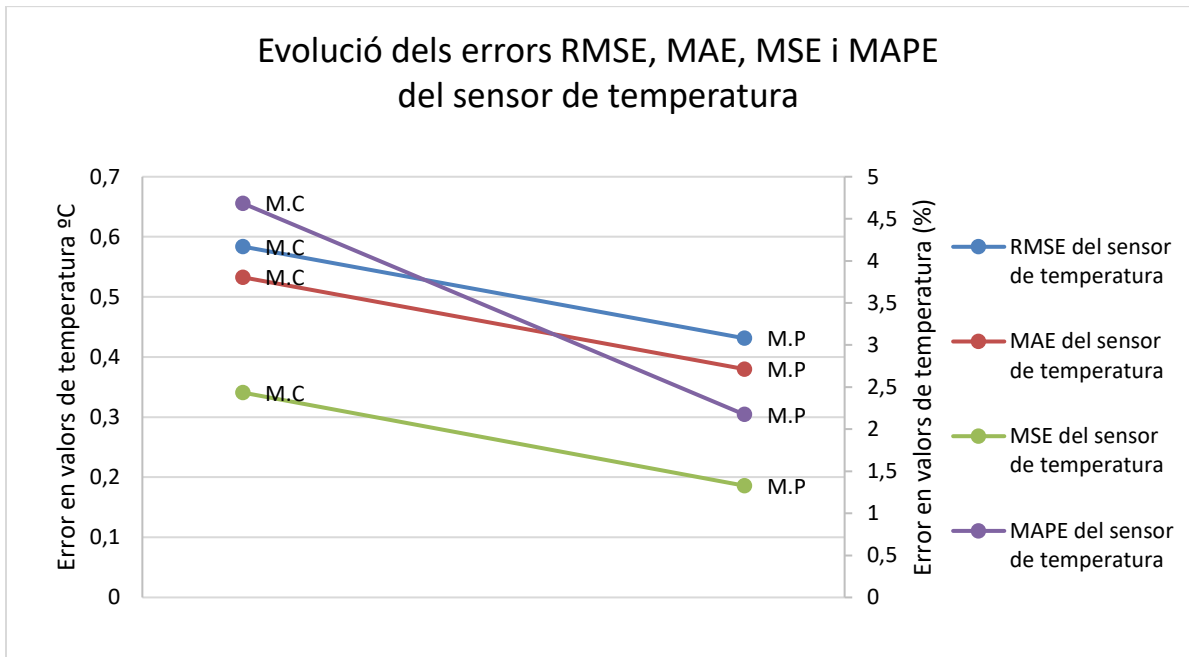
Errors	Resultats del sensor de oxigen dissolt	Unitats	Resultats del sensor de pH	Unitats	Resultat del sensor de temperatura	Unitats
RMSE	0,162	mg/L	0,149	pH	0,431	°C
MAE	0,146	mg/L	0,142	pH	0,38	°C
MSE	0,026	mg/L	0,022	pH	0,186	°C
MAPE	5,721	%	1,848	%	2,174	%



Gràfica 19. Evolució dels errors RMSE, MAE, MSE i MAPE, de les mesures puntuals amb les mesures en continu del sensor de pH. Font: Pròpia.



Gràfica 20. Evolució dels errors RMSE, MAE, MSE i MAPE, de les mesures puntuals amb les mesures en continu DEL sensor de oxigen dissolt. Font: Pròpia.

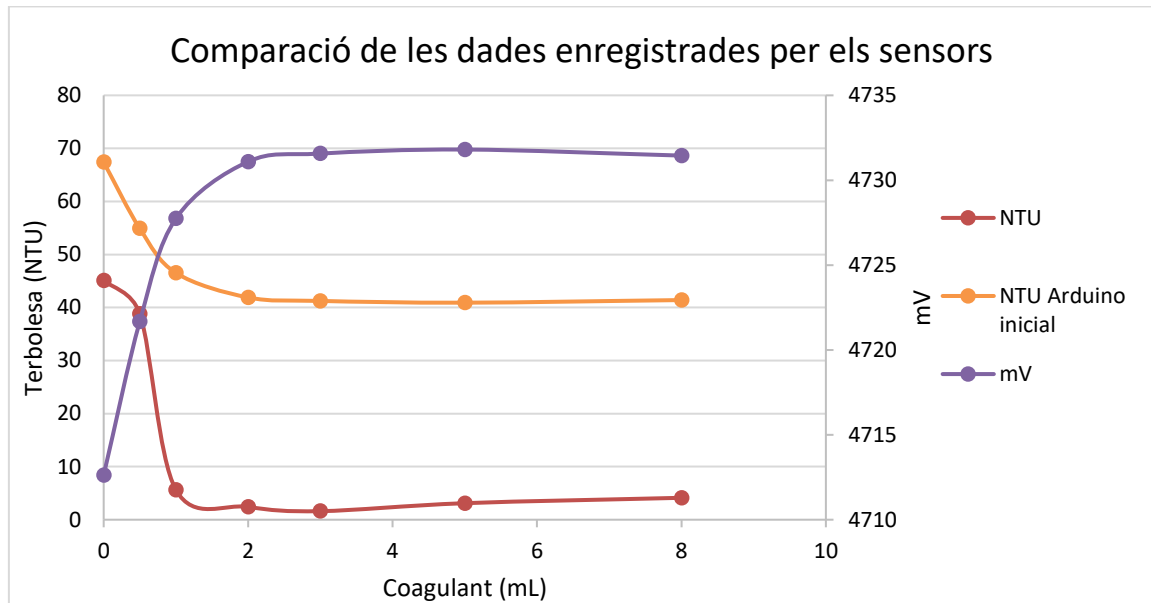


Gràfica 21. Evolució dels errors RMSE, MAE, MSE i MAPE, de les mesures puntals amb les mesures en continu del sensor de temperatura. Font: Pròpia.

A les Gràfica 19, Gràfica 20 i Gràfica 21 es poden observar les variacions dels errors calculats per a les proves en continu (M.C) i la recollida en mesures puntals (M.P). Els tres sensors a les proves puntals han presentat una quantitat d'error (MAPE) en la comparativa de les dades amb les sondes convencionals de més de la meitat respecte a la quantitat d'error calculat a les proves realitzades en el monitoratge en continu.

3.3.5. Validació del sensor de terbolesa amb el Jart Test

Els valors de terbolesa observats amb el turbidímetre convencional i el de baix cost es recopilen a la Taula 26, es veu clarament que els resultats difereixen en un gran nombre de magnitud, però es va observar que existia una correlació entre el voltatge enregistrat pel sensor de DFROBT i els valors reals de NTU determinats amb el turbidímetre, pel que es va determinar que la primera recta de calibratge no era del tot correcte. Si s’observa la Gràfica 22 es pot veure com existeix una relació entre el voltatge enregistrat pel sensor de baix cost i els valors de terbolesa més petits, per la qual cosa es va determinar que aquest sensor és molt més precís per a valors petits de terbolesa, es va establir amb l’ajuda d’aquesta pràctica que els rangs vàlids de mesura d’aquest sensor es comprenen entre 0 i 50 NTU.

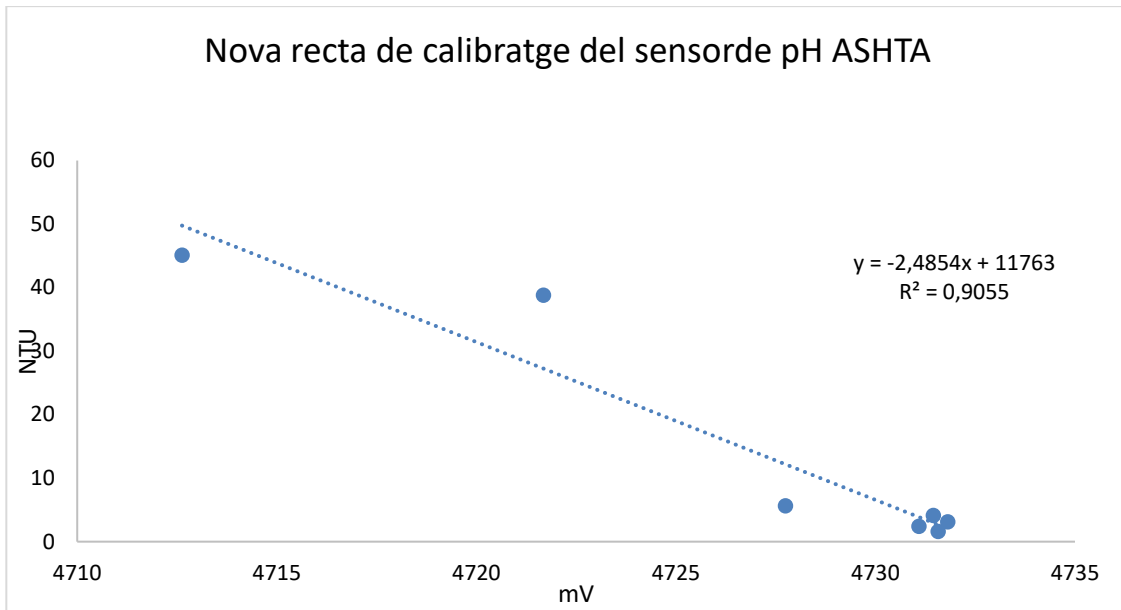


Gràfica 22. Comparativa de les lectures de terbolesa del sensor convencional, del de baix cost i del seu voltatge enregistrat. Font: Pròpia

A la Gràfica 23 es pot observar la nova recta de calibratge realitzada amb un ajust lineal de les dades, i com el coeficient de Pearsón és de $R^2=0,9055$, el que indica una certa correlació entre el voltatge enregistrat i els valors reals de terbolesa.

Taula 26. Dades dels sensors utilitzats en el Jarts-test. Font: Pròpia.

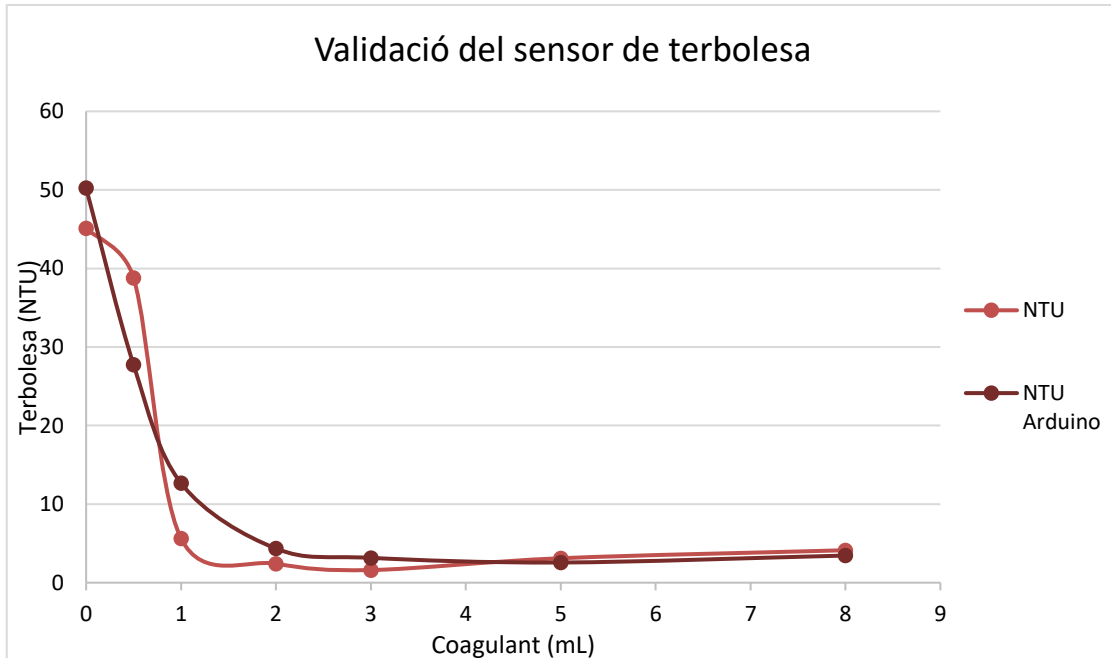
Terbolesa real (NTU)	Voltatge enregistrat	Valors de terbolesa amb la nova recta de calibratge
45,1	4712,625	50,241
38,8	4721,68	27,736
5,63	4727,743	12,667
2,42	4731,091	4,346
1,61	4731,569	3,158
3,11	4731,807	2,566
4,13	4731,45	3,454



Gràfica 23. Recta de regressió per al calibratge del sensor de terbolesa. Font: Pròpia.

Utilitzant l'equació de la recta de calibratge anterior es van establir els nous valors de terbolesa que aquest sensor donava per als voltatges enregistrats a la pràctica. A la Gràfica 24 i la Taula 26 es veuen les comparacions entre els valors de terbolesa reals del turbidímetre convencional i els del sensor de baix cost, calibrat amb la nova recta.

$$Terbolesa = -2,4854 * Voltatge(mV) + 11763 \quad (22)$$



Gràfica 24. Comparació entre el sensor de terbolesa convencional i el de baix cost. Font: Pròpia.

Es van realitzar els càlculs dels errors entre les dades del turbidímetre convencional i el de DFROBOT, obtenint els resultats visibles a la Taula 26. Com es pot apreciar l'error del sensor és de 5,414 NTU mentre i aquest tindrà un error en l'exactitud per a la construcció ajustada de valors reals de terbolesa del 53,503 %, el qual és molt elevat. De tots els sensors del projecte el de terbolesa és el que major incertesa presenta. Però de les dades de la Taula 26 es pot extreure que els valors de terbolesa més precisos entre els reals i els determinats amb la sonda de baix cost, s'obtenen a baixos

valors de terbolesa, per la qual cosa es va determinar que aquest sensor de terbolesa treballa més eficientment amb valors de baixos de terbolesa d'entre 0 i 10 NTU. Tot i això, es pot donar validesa a aquest sensor, ja que és capaç de detectar els canvis de terbolesa en les diferents solucions, el que si bé no pot servir per a establir un monitoratge exacte dels valors de terbolesa de les aigües costaneres sí que pot servir d'indicador per alertar sobre si es produeixen canvis tèrbols en les aigües marines.

Taula 27. Taula d'errors del sensor de terbolesa. Font: Pròpia.

Errors	Resultats	Unitats
RMSE	5,414	NTU
MAE	3,990	NTU
MSE	29,318	NTU
MAPE	53,503	%

3.4. Discussió dels resultats

Per poder provar els sensors primerament es van realitzar els seus corresponents calibratges, per tal que després es puguin realitzar les diferents validacions dels sensors del projecte es fa l'anàlisi numèric dels diferents errors, per tal d' examinar la disparitat entre les dades recollides pels sensors LC del prototip desenvolupat respecte els sensors convencionals.

Els primers calibratges realitzats per als sensors analògics van mostrar que existia una correlació lineal entre el voltatge enregistrat i els valors reals dels paràmetres de mesura, sent el coeficient de regressió de Pearson sempre superior al $R^2=0,90$. Per la qual cosa que els sensors podien passar a una segona fase, on s'observaria la viabilitat dels sensors LC. Com ja s'ha mencionat es va voler determinar si els sensors del projecte tenien una major precisió realitzant mesures puntuals o realitzant mesures en continu, per lo que es van comparar les dades recol·lectades pels sensors convencionals amb les dades dels sensors LC, podent estudiar la viabilitat d'aquestes, calculant diferents errors com el RMSE, el MAE, el MSE i el MAPE, sent la quantitat d'error (RMSE) i la mitjana d'error (MAPE) les dades més rellevants a tractar.

Les proves realitzades per al sensor LC de pH van determinar que el sensor presentava una precisió de $\pm 0,23$ pH, amb una incertesa de les mesures del 2,43%, realitzant un monitoratge continu, mentre que a les mesures realitzades puntualment la precisió era del $\pm 0,14$ pH i la mitjana d'error del 1,82 % . Al tractar-se de la mesura del pH, les petites variacions d'aquest suposen un augment o decreixement molt elevat en la concentració de ions de H^+ que són els que determinen la basicitat o acidesa de les substàncies. Pel que fa al sensor LC d'oxigen dissolt, aquest va presentar una precisió de $\pm 1,395337$ mg/L i una mitjana d'error de mesura del 10,384 % a les proves de monitoratge en continu, mentre que en les proves puntuals la quantitat d'error va estar de $\pm 0,162911$ mg/L, i l'error mitjà era del 5,721 % . Al tractar-se d'un sensor de OD, el més destacable que aquest pot detectar al medi marí, és la presència d'hipòxia (falta de OD) a l'aigua, i aquest fenomen és d'un ordre de magnitud important, per la qual cosa la precisió del sensor seria acceptable. Per un altre banda, els resultats del sensor LC de temperatura en continu assenyalen que presenta una quantitat d'error de $\pm 0,583$ °C, i un percentatge d'error mitjà del 4,684 % . A les mesures puntuals la precisió mostrada per la sonda va ser de $\pm 0,431$ °C i una mitjana d'error del 2,174 % . La temperatura és un paràmetre molt important, ja que l'escalfament global està generant l'augment de la temperatura de l'aigua marina a nivell mundial, els diferents errors presents a les proves indiquen que aquest podria ser útil sobretot en la detecció de temperatures extremes que s'estan donant en el marc del canvi climàtic com va assenyalar la NOAA (2022) o l'IPCC (2021).

Tenint en consideració que treballs LC i DIY com els de D.Fries i Z.Stanislav (2007) presentaven una precisió pel que fa als sensors de conductivitat i temperatura de $\pm 0,882$ mS/cm i $\pm 0,0012$ °C respectivament, es pot observar que els resultats de l'anàlisi realitzat en aquest treball entren dins de rangs obtinguts en altres treballs, tot i no tractar-se dels mateixos paràmetres de mesura serveixen com a dades orientatives de la quantitat d'error assumible, tot i que això depèn del paràmetre de mesura. Dels tres sensors LC, de pH, OD i temperatura es pot observar com presentaven una major precisió realitzant mesures puntuals que no realitzant observacions en continu, el que indica que aquests sensors tenen una millor aplicació en la recollida de dades de camp in situ. Però observant els errors calculant i tenint en consideració els paràmetres de mesura, l'únic sensor que potser presentaria una major problemàtica respecte del monitoratge en continu seria el de pH.

Respecte fa a el sensor de conductivitat, no es van realitzar proves de monitoratge ni sensorització, ja que no es disposaven de medis on observar el comportament d'aquest. El que sí que es pot assenyalar sobre aquest sensor es que és capaç de cobrir rangs de salinitat/conductivitat d'entre 10 i 50 g/L.

Per altra banda, el sensor de terbolesa de baix cost sí que presentava una mitjana d'error elevada de + 50%, i una precisió de $\pm 5,414$ NTU. Tot i la incertesa presentada pel sensor, es va observar a les dades enregistrades que aquest sensor presentava unes millors lectures en rangs baixos de terbolesa (0-10 NTU) i que aquest podria servir per donar valors orientatius de la terbolesa de l'aigua marina. Essent la precisió del sensor de 5,414 i considerant que el rang de terbolesa de l'aigua marina està entre els 0 i 200 NTU, el sensor pot funcionar per detectar els canvis més generals de la terbolesa, que podrien ser donats per temporals, corrents tèrboles, excés de nutrients que provoquen l'eutrofització entre d'altres.

La sonda multiparamètrica prototipada s'alinea amb altres projectes LC i DIY com els de Fries i Stanislav (2007), el de Oceanography for Everyone (OE), o la de Auråen (2019). Presentat com a fet diferencial que aquesta mesura més de dos paràmetres de qualitat l'aigua i que és energèticament autònoma, i per això pot funcionar sense tenir limitacions respecte a la càrrega energètica. A més, la sonda confeccionada té una construcció en forma modular, el que permet la reparació i substitució dels seus components. Per contra, aquesta sonda tot i tenir una certa estanquitat, no és submergible i per això només es poden prendre mesures de l'aigua marina més superficial. Tenint tot això en consideració cal valorar que la sonda construïda presenta un cost total de 391,77 d'Euros, el que suposa una gran diferència pel que fa als preus de les sondes convencionals, i també respecte als preus observats a treballs similars com el de Oceanography for Everyone amb un cost total de 436,45 Euros o el de Auråen (2019) amb un total de 364,46 Euros, sent les sondes construïdes CTD's, el que significa que únicament mesuren dos paràmetres de la qualitat de l'aigua, mentre que el prototip d'aquest projecte és capaç de mesurar cinc.

Capítol 4. Conclusions

En aquest treball de final de grau s'exposen els diferents passos seguit per al disseny i construcció d'un aparell per a mesurar la qualitat de l'aigua marina amb la filosofia LC i DIY. La sonda confeccionada esta composta per sensors LC de pH, oxigen dissolt, terbolesa, conductivitat i temperatura, i amb el present treball, mitjançant diferents proves puntuals i en continu s'ha demostrat que el dispositiu construït utilitzant sensors LC, té un rang de error acceptable respecte els aparells convencionals, i que és capaç de realitzar observacions puntuals i en continu.

La necessitat de la sensorització massiva de la qualitat de l'aigua marina fan que el desenvolupament d'instruments oceanogràfics LC i DIY siguin una resposta per dur a terme aquesta tasca, per la qual cosa l'estudi i anàlisi de les diferents eines ambientals de baix cost en les aplicacions oceanogràfiques tindran un paper important en la recerca. En aquest treball els diferents resultats obtinguts en les proves realitzades per a la validació dels sensors escollits per a realitzar la sonda prototipada van determinar que era viable utilitzar-los per a l'elaboració de la sonda multiparamètrica LC i DIY dissenyada.

Concloent, les aportacions realitzades en aquest treball tenen la finalitat de demostrar la viabilitat dels sensors LC en aplicacions oceanogràfiques i de donar suport a futurs treballs on es puguin desenvolupar eines LC i DIY per a la sensorització de l'aigua marina. La utilització de xarxes neuronals per al calibratge dels sensors, l'enviament de dades a un servidor, el desenvolupament de sensors DIY o el disseny d'instruments totalment estancs que puguin operar a grans profunditats, poden ser futures línies de recerca.

Referències i bibliografia

Aprendiendo Arduino. Puertos Analógicos Arduino Avanzado. [en línia]. [Consulta: 26 Abril 2022]. Disponible a: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2017/09/05/puertos-analogicos-arduino-avanzado/>

Auråen J. Low-cost CTD Instrument Arduino based CTD for autonomous measurement platform. [en línia]. [Consulta: 4 Febrer 2022]. Disponible a: <http://www.duo.uio.no/>

Barron JJ, Ashton C. The Effect of Temperature on Conductivity Measurement A REAGECON TECHNICAL PAPER. [en línia]. [Consulta: 24 Març 2022]. Disponible a: www.reagecon.com

Bennett EM, Carpenter SR, CARACO FN. Human Impact on Erodable Phosphorus and Eutrophication: A Global Perspective. [en línia]. [Consulta: 5 Març 2022]. Disponible a: [https://sci-hub.hkvisa.net/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0227:hioepa\]2.0.co;2](https://sci-hub.hkvisa.net/10.1641/0006-3568(2001)051[0227:hioepa]2.0.co;2)

Bigham KT, Rowden AA, Leduc D, Bowden DA. Review and syntheses: Turbidity flows-evidence for effects on deep-sea benthic community productivity is ambiguous but the influence on diversity is clearer. *EGU: Biogeosciences*, 2020. doi:10.5194/bg-2020-359

BOE. Presupuestos generales del estado Sección: 27 Ministerio de economía, industria y competitividad- Transferencias internas. Ejercicio presupuestario 2017.

Breitburg D, Levin LA, Oschlies A, et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science (1979)*, 2018, vol. 359. doi:10.1126/SCIENCE.AAM7240

Broadbent HA, Ivanov SZ, Fries DP. A miniature, low cost CTD system for coastal salinity measurements. *Measurement Science and Technology*, 2007, vol. 18, p.3295-3302. doi:10.1088/0957-0233/18/11/005

Bulmer RH, Townsend M, Drylie T, Lohrer AM. Elevated turbidity and the nutrient removal capacity of seagrass. *Mar Sci*. 2018, vol. 5. doi:10.3389/FMARS.2018.00462

Cánovas Sánchez B. El transporte marítimo internacional entre el cambio climático y el coronavirus. [en línia]. [Consulta: 6 Febrer 2022]. Disponible a: http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_opinion/2020/DIEEEO26_2020BARCAN_mar.pdf

Carminati M, Luzzatto-Fegiz P. Conduino: Affordable and high-resolution multichannel water conductivity sensor using micro USB connectors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, vol. 251, p. 1034-1041. doi:10.1016/J.SNB.2017.05.184

Cerón Hernández VA, Madera Parra CA, Peña Varón M. Using high rate algal ponds for wastewater treatment. *Ingeniería y Desarrollo*, 2015, vol. 33, p. 98-125. doi:10.14482/INDE.33.1.5318

Chen CTA, Huang MH. A mid-depth front separating the South China Sea water and the Philippine sea water. *Journal of Oceanography*, 1996, vol. 52, p. 17-25. doi:10.1007/BF02236530

Chivers DP, Al-Batati F, Brown GE, Ferrari MCO. The effect of turbidity on recognition and generalization of predators and non-predators in aquatic ecosystems. *Ecology and Evolution*, 2013, vol. 268. doi:10.1002/ECE3.454

Cloern JE, Jassby AD, Schraga TS, et al. Ecosystem variability along the estuarine salinity gradient: Examples from long-term study of San Francisco Bay. *Limnology and Oceanography*, 2017, vol. 62, p. 272-291. doi:10.1002/LNO.10537

- Cloern JE. Turbidity as a control on phytoplankton biomass and productivity in estuaries. *Continental Shelf Research*, 1987, vol. 7, p. 1367-1381. doi:10.1016/0278-4343(87)90042-2
- CMEMS. Powering the planet. [en línia]. [Consulta: 1 Febrer 2022]. Disponible a: <https://marine.copernicus.eu/news/powering-planet>
- CoastAdapt. Ocean acidification and its effects. [en línia]. [Consulta: 27 Febrer 2022]. Disponible a: <https://coastadapt.com.au/ocean-acidification-and-its-effects>
- Conductivity Measurements. Inductive vs. Contacting Measurements. [en línia]. [Consulta: 20 Maig 2022] Disponible a: <https://www.optek.com/en/conductivity-measurements.asp>
- Durack PJ, Wijffels SE, Matear RJ. Ocean salinities reveal strong global water cycle intensification during 1950 to 2000. *Science (1979)*, 2012, vol. 336, p. 455-458. doi:10.1126/SCIENCE.1212222/SUPPL_FILE/DURACK.SM.PDF
- EDIS. Climate Change: Effects on Salinity in Florida's Estuaries and Responses of Oysters, Seagrass, and Other Animal and Plant Life. [en línia]. [Consulta: 10 Abril 2022]. Disponible a: <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/SG138>
- Emerson Process Management. Theory and application of conductivity. . [en línia]. [Consulta: 1 Maig 2022]. Disponible a: <https://www.emerson.com/documents/automation/application-data-sheet-theory-application-of-conductivity-rosemount-en-68442.pdf>
- Fan T, Deser C, Schneider DP. Recent Antarctic sea ice trends in the context of Southern Ocean surface climate variations since 1950. *Geophysical Research Letters*, 2014, vol. 41, p. 2419-2426. doi:10.1002/2014GL059239
- Fiksen Ø, Aksnes DL, Flyum MH, Giske J. The influence of turbidity on growth and survival of fish larvae: a numerical analysis. *Sustainable Increase of Marine Harvesting: Fundamental Mechanisms and New Concepts*, 2002, p. 49-59. doi:10.1007/978-94-017-3190-4_5
- Fiscalab. Temperatura. [en línia]. [Consulta: 14 Abril 2022]. Disponible a: <https://www.fiscalab.com/apartado/temperatura>
- Fiter Cirera. Mireia. Control basat en lògica difusa per sistemes de fangs activats. Disseny, implementació i validació en EDAR reals. Universitat de Girona: Institut de Medi Ambient, 2006. ISBN 8468990051
- Fotocasa Life. La evolución del precio de la factura de la luz en 2022. [en línia]. [Consulta: 24 Maig 2022]. Disponible a: <https://www.fotocasa.es/fotocasa-life/hogar/energia/subida-precio-de-la-luz/>
- Gaines S, Cabral R, Free CM, et al. The Expected Impacts of Climate Change on the Ocean Economy. [en línia]. [Consulta: 3 Febrer 2022]. Disponible a: www.oceanpanel.org/expected-impacts-climate-change-ocean-economy
- Garcia J, Author F, et al. New mechanistic model to simulate microalgae growth. *Algal Research*, 2008, vol.12, p.350-358.
- García J, Mujeriego R, Hernández-Mariné M. High rate algal pond operating strategies for urban wastewater nitrogen removal. *Journal of Applied Phycology*. 2000;12(3-5):331-339. doi:10.1023/A:1008146421368
- Globallast. The Lead Partnering Countries of the, GEF-UNDP-IMO GloBallast Partnerships Programme. Economic Assessment of Ballast Water Management. [en línia]. [Consulta: 10 Febrer 2022]. Disponible a: <http://globallast.imo.org>.

- Gohin F. Annual cycles of chlorophyll-a, non-algal suspended particulate matter, and turbidity observed from space and in-situ in coastal waters. *Ocean Science*, 2011, vol. 7, p. 705-732. doi:10.5194/OS-7-705-2011
- Goreau TJ, Hayes RL. Effects of rising seawater temperature on coral reefs. [en línia]. [Consulta: 2 Juny 2022]. Disponible a: https://www.globalcoral.org/wp-content/uploads/2014/01/effects_of_rising_seawater_temp_coral_reefs.pdf
- HANNA Instruments Colombia. La Temperatura afecta el pH del Agua. [en línia]. [Consulta: 1 Febrer 2022]. Disponible a: <https://www.hannacolombia.com/blog/post/39/la-temperatura-afecta-el-ph-del-agua>
- Hayashi M. Temperature-electrical conductivity relation of water for environmental monitoring and geophysical data inversion. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2004, vol. 96, p. 119-128. doi:10.1023/B:EMAS.0000031719.83065.68
- Hope JA, Hewitt J, Pilditch CA, Savage C, Thrush SF. Effect of Nutrient Enrichment and Turbidity on Interactions Between Microphytobenthos and a Key Bivalve: Implications for Higher Trophic Levels. *Front Mar Sci*, 2020, vol. 7, p. 680-695. doi:10.3389/FMARS.2020.00695/BIBTEX
- IEEE. Inexpensive Expendable Conductivity Temperature and Depth (CTD) Sensor Publication. [en línia]. [Consulta: 4 Febrer 2022]. Disponible a: <https://ieeexplore-ieee-org.recursos.biblioteca.upc.edu/document/6741068>
- ILCE. La composición química del agua del mar. [en línia]. [Consulta: 20 Febrer 2022]. Disponible a: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/12/htm/sec_16.html
- Inst Tools . Dissolved Oxygen Analyzer Working Principle. [en línia]. [Consulta: 5 Maig 2022]. Disponible a: <https://instrumentationtools.com/dissolved-oxygen-analyzer-working-principle/>
- IPCC. Climate Change 2021: The Ocean. *Cambridge University Press. In Press, 2021, p.1658-1715.*
- ISO - ISO 7027:1990 - Water quality — Determination of turbidity. [en línia]. [Consulta: 5 Març 2022]. Disponible a: <https://www.iso.org/standard/13586.html>
- ISO - ISO 7888:1985 - Water quality — Determination of electrical conductivity. [en línia]. [Consulta: 10 Abril 2022]. Disponible a: <https://www.iso.org/standard/14838.html>
- Iverson RL, Bittaker HF, Iverson RL, Bittaker HF. Seagrass distribution and abundance in Eastern Gulf of Mexico coastal waters. *ECSS*, 1986 vol. 22, p. 577-602. doi:10.1016/0272-7714(86)90015-6
- Kelley CD, Krolick A, Brunner L, et al. An affordable open-source turbidimeter. *Sensors (Switzerland)*, 2014, vol. 14, p. 7142-7155. doi:10.3390/S140407142
- Kester W, Bryant J, Jung W. Analog Devices : Sensor Signal Conditioning, Temperature Sensors, Chapter 7. [en línia]. [Consulta: 13 Abril 2022]. Disponible a: https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/temperature_sensors_chapter7.pdf
- Langis DP. Arduino Based Oceanographic Instruments: An Implementation Strategy for Low-Cost Sensors. [en línia]. [Consulta: 18 Febrer 2022]. Disponible a: <https://scholarworks.calstate.edu/concern/theses/mp48sd70n?locale=es>
- Lauchlan SS, Nagelkerken I. Species range shifts along multistressor mosaics in estuarine environments under future climate. *Fish and Fisheries*, 2020, vol. 21, p. 32-46. doi:10.1111/FAF.12412

Lin C, Su J, Xu B, Tang Q. Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem. *Progress in Oceanography*, 2001, vol. 49, p. 7-19. doi:10.1016/S0079-6611(01)00013-1

Mengual B, Cayocca F, le Hir P, et al. Influence of bottom trawling on sediment resuspension in the 'Grande-Vasière' area (Bay of Biscay, France). *Ocean Dynamics*, 2016, vol. 66, p. 1181-1207. doi:10.1007/S10236-016-0974-7

Mishra P, Naik S, Babu PV, et al. Algal bloom, hypoxia, and mass fish kill events in the backwaters of Puducherry, Southeast coast of India. *Oceanologia*, 2021, vol. 64, p. 396-403. doi:10.1016/J.OCEANO.2021.11.003

Molecular Sciences and Chemical Engineering. Turbidity, Turbidimetry, and Nephelometry. [en línia]. [Consulta: 9 Maig 2022]. Disponible a: https://www.researchgate.net/publication/311677310_Turbidity_Turbidimetry_and_Nephelometry_In_Reedijk_J_Ed_Reference_Module_in_Chemistry_Molecular_Sciences_and_Chemical_Engineering_Waltham_MA_Elsevier_15-July-2016_doi_101016B978-0-12-409547-211006-6_1

Mujal-Colilles A, Guarasa JN, Fonollosa J, Llull T, Castells-Sanabra M. COVID-19 impact on maritime traffic and corresponding pollutant emissions. The case of the Port of Barcelona. *Environ Manage*, 2022. doi:10.1016/J.JENVMAN.2022.114787

National Oceanic and Atmospheric Administration. Ocean acidification. [en línia]. [Consulta: 27 Febrer 2022]. Disponible a: <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-acidification>

NCEI. Climate at a Glance. [en línia]. [Consulta: 14 Abril 2022]. Disponible a: https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/globe/land_ocean/1/7/1880-2021

OceanographyforEveryone. The OpenCTD is a low-cost, open-source CTD for researchers and citizen scientists. [en línia]. [Consulta: 4 Febrer 2022]. Disponible a: <https://github.com/OceanographyforEveryone/OpenCTD>

Olmedo E, Turiel A, González-Gambau V, et al. Increasing stratification as observed by satellite sea surface salinity measurements. *Nature*, 2022, vol. 12. doi:10.1038/s41598-022-10265-1

OzCoasts. pH of coastal waterways. [en línia]. [Consulta: 24 Febrer 2022]. Disponible a: https://ozcoasts.org.au/indicators/biophysical-indicators/ph_coastal_waterways/

Pankhurst NW, Munday PL, Pankhurst NW, Munday PL. Effects of climate change on fish reproduction and early life history stages. *Marine and Freshwater Research*, 2011, vol. 62, p.1015-1026. doi:10.1071/MF10269

Paulmier, Aurélien. *Oxygen and the ocean*, First edition. CNRS Éditions, 2017. ISBN 978-2-271-11907-0.

pH meter. pH electrode. [en línia]. [Consulta: 1 Maig 2022]. Disponible a: <http://www.ph-meter.info/pH-electrode-flowing-gel>

Phadjustment. pH Probe Architecture. [en línia]. [Consulta: 1 Maig 2022]. Disponible a: http://www.phadjustment.com/TArticles/pH_Probe.html

Phillip Mitchell. Turbidity Units From: Water Ecoscience. *Waterwatch: Water Ecoscience*, 1998.

Pilson, M.E.Q. *An Introduction to the Chemistry of the Sea*, second edition. Cambridge University Press, 2013. ISBN 978-0-521-88707-6. 524

- PracticasconArduino. Alimentación eléctrica de Arduino. [en línea]. [Consulta: 23 Maig 2022]. Disponible a: http://www.practicasconarduino.com/manualrapido/alimentacin_elctrica_de_arduino.html
- Project Eutrophication. Eutrophication. [Consulta: 5 Març 2022]. Disponible a: <https://projecteutrophication.weebly.com/>
- Purdue. Calculating pH and pOH. [en línea]. [Consulta: 24 Febrer 2022]. Disponible a: https://www.chem.purdue.edu/gchelp/howtosolveit/Equilibrium/Calculating_pHandpOH.htm
- Rajwa-Kuligiewicz A, Bialik RJ, Rowiński PM. Dissolved oxygen and water temperature dynamics in lowland rivers over various timescales. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2015, vol. 63, 353-363. doi:10.1515/JOHH-2015-0041
- Ranjan S, Gupta PK, Gupta SK. Comprehensive Evaluation of High-Rate Algal Ponds: Wastewater Treatment and Biomass Production. *Application of Microalgae in Wastewater Treatment*, 2019, p. 531-548. doi:10.1007/978-3-030-13909-4_22
- Richard W BA, Vellinga Robert MT. Global warming and thermohaline circulation stability. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 2003, p. 345:361. doi:10.1098/rsta.2003.1245
- Saber es practico. Superficie de los 5 océanos. [en línea]. [Consulta: 1 Febrer 2022]. Disponible a: <https://www.saberespractico.com/geografia/oceanos-superficie/>
- Sarmiento JL, Gruber N. *Ocean Biogeochemical Dynamics*. First Edition. Princeton University Press, 2005. ISBN 978-0691017075
- Schoellhamer DH. Anthropogenic sediment resuspension mechanisms in a shallow microtidal estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1996, vol. 43, p. 533-548. doi:10.1006/ECSS.1996.0086
- Selection of parameters in the design of beach coastal water quality monitoring programs. [en línea]. [Consulta: 5 Març 2022]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4866012>
- Shi B, Catsamas S, Kolotelo P, et al. A Low-Cost Water Depth and Electrical Conductivity Sensor for Detecting Inputs into Urban Stormwater Networks. *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 30-56. doi:10.3390/S21093056
- Shi JZ. Tidal resuspension and transport processes of fine sediment within the river plume in the partially-mixed Changjiang River estuary, China: A personal perspective. *Geomorphology*. 2010;121(3-4):133-151. doi:10.1016/J.GEOMORPH.2010.04.021
- Shi W, Wang M. Characterization of global ocean turbidity from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer ocean color observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010;115(C11):11022. doi:10.1029/2010JC006160
- Simpson SD, Munday PL, Wittenrich ML, et al. Ocean acidification erodes crucial auditory behaviour in a marine fish. *Biology Letters*. 2011;7(6):917. doi:10.1098/RSBL.2011.0293
- Spivak ED, Cuesta JA, Spivak • E D, Cuesta JA. The effect of salinity on larval and new findings of the zoeal morphology. *Scientia Marina*, 2009, vol. 73, p. 297-305. doi:10.3989/SCIMAR.2009.73N2297
- Stanford. Lecture 3: Temperature, Salinity, Density and Ocean Circulation. [en línea]. [Consulta: 10 Abril 2022]. Disponible a: http://ocean.stanford.edu/courses/bomc/chem/lecture_03.pdf
- Stewart .R.H; *Introduction To Physical Oceanography*. First edition. Orange Grove Books, 1997. ISBN 978-1616100452

Stiasny MH, Mittermayer FH, Sswat M, et al. Ocean Acidification Effects on Atlantic Cod Larval Survival and Recruitment to the Fished Population. *Plos one*, 2016, vol. 11, p. 155-178. doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0155448

Tecniberia . La planificación en costas es una inversión, no un gasto. [en línea]. [Consulta: 1 Febrer 2022]. Disponible a: <https://tecniberia.es/planificacion-en-costas-es-una-inversion/>

Turner C, Brown P, Oliver K, Mcdonagh EL. Decomposing oceanic temperature and salinity change using ocean carbon change. *Ocena Sci*, 2021, vol.18, p. 523-548.doi:10.5194/os-2021-54

Tyler RH, Boyer TP, Minami T, Zweng MM, Reagan JR. Electrical conductivity of the global ocean 1. *Geomagnetism. Earth, Planets and Space*, 2017, vol. 69, p. 1-10. doi:10.1186/S40623-017-0739-7/FIGURES/5

UNESCO. The Ocean is Losing its Breath Intergovernmental Oceanographic Commission United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Declining Oxygen in the World's Ocean and Coastal Waters Summary for policy makers. [en línea]. [Consulta: 3 Març 2022]. Disponible a: <http://ioc.unesco.org>.

UNESCO. UNESCO-ICES-SCOR-IAPSO joint panel on oceanographic tables and standards. Background Papers and Supporting Data on the International Equation of State of Seawater 1980.; 1981. [en línea]. [Consulta: 24 Març 2022]. Disponible a: https://www.jodc.go.jp/info/ioc_doc/UNESCO_tech/047363eb.pdf

US EPA. Understanding the Science of Ocean and Coastal Acidification. [en línea]. [Consulta: 27 Febrer 2022]. Disponible a: <https://www.epa.gov/ocean-acidification/understanding-science-ocean-and-coastal-acidification>

USGS. Turbidity-Units of Measurement. [en línea]. [Consulta: 27 Maig 2022]. Disponible a: <https://or.water.usgs.gov/grapher/fnu.html>

Vargas-Yáñez M, García-Martínez MC, Moya F, et al. Updating temperature and salinity mean values and trends in the Western Mediterranean: The RADMED project. *Progress in Oceanography*, 2017, vol. 157, p. 27-46. doi:10.1016/J.POCEAN.2017.09.004

Viana M, Hammingh P, Colette A, et al. Impact of maritime transport emissions on coastal air quality in Europe. *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 90, p. 96-105. doi:10.1016/J.ATMOSENV.2014.03.046

Virtual Labs. Turbidity. [en línea]. [Consulta: 9 Maig]. Disponible a: <https://ee2-nitk.vlabs.ac.in/exp/turbidity-in-water/theory.html>

Volkoff H, Rønnestad I. Effects of temperature on feeding and digestive processes in fish. *Temperature: Multidisciplinary Biomedical Journal*, 2020, vol. 7, p. 300-307. doi:10.1080/23328940.2020.1765950

Walker TR, Adebambo O, del Aguila Feijoo MC, et al. Environmental effects of marine transportation. *World Seas: An Environmental Evaluation Volume III: Ecological Issues and Environmental Impacts*, 2018, p.505-530. doi:10.1016/B978-0-12-805052-1.00030-9

Wetzel RG. *Limology Lake and River Ecosystems*. 3rd Ed. Academic press: Elsevier, 2001. ISBN 9780127447605

WHOI. The pH Scale: Woods Hole Oceanographic Institution. [en línea]. [Consulta: 24 Febrer 2022]. Disponible a: <https://www.whoi.edu/know-your-ocean/ocean-topics/ocean-chemistry/ocean-acidification/the-ph-scale/>

Annexos

Annex A1. Codi de calibratge del sensor de pH

```
//Es defineixen les variables del port analogic i les variables de calcul
#define PHPIN 5
float voltph;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
//Es transformen els bits en voltatge
  voltph = (analogRead(PHPIN) * 5000.0) / 1024.0;
//Lectura al port Serial de les dades enregistrades
  Serial.println(voltph);
  delay(1000);
}
```

Annex A2. Codi de calibratge senor de OD

```
//LLIBRERIA SD
#include <SD.h>
//FI LLIBRERIA SD

//LIBRERIES RELLOTGE
#include <virtuabotixRTC.h> //Libreria
//FI LLIBREIRES RELLOTGES

// definim entrades analogiques i digitals
#define ODPIN 1
//fi de entrades

//definim variables de lectures analogiques i digitals
int Aod;
//fi de lectures analog

//definim les variables dels voltatges
float voltod;
//fi def variable volt

//definim variables reals
float OD;
// fi def var reals
//declarem sd
File logFile;
//fi delcar sd

//definim rellotge
virtuabotixRTC myRTC(6, 7, 8);
//fi def rellotge

void setup()
{
  Serial.begin(9600);

  //INICIEM TARGETA SD
  Serial.print(F("Iniciando SD ..."));
  if (!SD.begin(4))
  {
    Serial.println(F("Error al iniciar"));
    return;
  }
  Serial.println(F("Iniciado correctamente"));
}
// Funcion que simula la lectura de un sensor
int readSensor()
{
  return 0;
}
//FI INICI TARGETA
void loop()
{
```

```

//rellotge
myRTC.updateTime();
//fi rellotge

//OBRIM ARXIU
logFile = SD.open("datapod.txt", FILE_WRITE);
//lectura sensor
Aod=analogRead(ODPIN);
//fi lectura
//conv a voltatge
voltod=(5000.0*Aod)/1024.0;
//fi conv
//GUARDAR
if (logFile)
{
//ESCRIPTURA A TARGETA
  logFile.print(myRTC.dayofmonth);
  logFile.print("/");
  logFile.print(myRTC.month);
  logFile.print("/");
  logFile.print(myRTC.year);
  logFile.print(":");
  logFile.print(myRTC.hours);
  logFile.print(":");
  logFile.print(myRTC.minutes);
  logFile.print(":");
  logFile.print(myRTC.seconds);
  logFile.print(",");
  logFile.println(voltod);
  logFile.close();
//TANQUEM ARXIU

//Escriptura
Serial.print("Data i hora=");
Serial.print(myRTC.dayofmonth);
Serial.print("/");
Serial.print(myRTC.month);
Serial.print("/");
Serial.print(myRTC.year);
Serial.print(" ");
Serial.print(myRTC.hours);
Serial.print(":");
Serial.print(myRTC.minutes);
Serial.print(":");
Serial.print(myRTC.seconds);
Serial.print("\t");
Serial.print("Voltatge");
Serial.print(voltod);
Serial.println("mV");
//escriptura
}
else {
  Serial.println("Error al abrir el archivo");
}
delay(900000); }

```

Annex A3. Codi de calibratge senor de turbolesa

```
//Es defineixen les variables del port analogic i les variables de calcul
#define TURBPIN 5
float volturb;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  //Es tranformen els bits en voltatge
  volturb = ((analogRead(TURBPIN)) * 5000.0) / 1024.0;
  //Lectura al port Serial de les dades enregistrades
  Serial.println(volturb);
  delay(1000);
}
```

Annex A4. Codi de calibratge sonda de conductivitat

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include "DFRobot_EC10.h"
#include <EEPROM.h>
#define CONDPIN 5
#define Vref 5000.0
float voltcond, ecValue;
DFRobot_EC10 ec;
void setup(){
  Serial.begin(9600);
  ec.begin();}
void loop(){
  long int lect_analog = 0;
  int i;
  float voltage = 0.0;
  int n_mostres = 1000;
  static unsigned long t_inici, t_mostra;
  t_inici = millis();
  for (i = 0; i < n_mostres; i++) {
    lect_analog = analogRead(CONDPIN )// read the voltage
    voltcond += (float)lect_analog;}
  voltcond = voltcond / (float)n_mostres;
  voltcond = voltcond *5000.0 / 1024.0;
  Serial.println(voltcond);
  delay(1000);
}
```

Annex A5. Codi de validació del sensor de pH

```
//LLIBRERIA SD
#include <SD.h>
//FI LLIBRERIA SD

//LIBRERIES RELLOTGE
#include <virtuabotixRTC.h> //Llibreria
//FI LLIBREIRES RELLOTGES

// definim entrades analogiques i digitals
#define PHPIN 1
//fi de entrades

//definim variables de lectures analogiques i digitals
int Aph;
//fi de lectures analog

//definim les variables dels voltatges
float voltph;
//fi def variable volt

//definim variables reals
float pH;
// fi def var reals

//declarem sd
File logFile;
//fi delcar sd

//definim rellotge
virtuabotixRTC myRTC(6, 7, 8);
//fi def rellotge

void setup()
{
  Serial.begin(9600);

  //INICIEM TARGETA SD
  Serial.print(F("Iniciando SD ..."));
  if (!SD.begin(4))
  {
    Serial.println(F("Error al iniciar"));
    return;
  }
  Serial.println(F("Iniciado correctamente"));
}
// Funcion que simula la lectura de un sensor
int readSensor()
{
  return 0;
}
//FI INICI TARGETA
void loop()
```



```

{
  //rellotge
  myRTC.updateTime();
  //fi rellotge

  //OBRIM ARXIU
  logFile = SD.open("datapht.txt", FILE_WRITE);
  //lectura sensor
  Aph=analogRead(PHPIN);
  //fi lectura
  //conv a voltatge
  voltph=(5000.0*Aph)/1024.0;
  //fi conv
  //valor ph
  pH= -0.0051*voltph + 24.209;
  //fi valor ph
  //GUARDAR
  if (logFile)
  {
  //ESCRITURA A TARGETA
    logFile.print(myRTC.dayofmonth);
    logFile.print("/");
    logFile.print(myRTC.month);
    logFile.print("/");
    logFile.print(myRTC.year);
    logFile.print(":");
    logFile.print(myRTC.hours);
    logFile.print(":");
    logFile.print(myRTC.minutes);
    logFile.print(":");
    logFile.print(myRTC.seconds);
    logFile.print(",");
    logFile.print(voltod);
    logFile.print(",");
    logFile.println(pH);
    logFile.close();

  //TANQUEM ARXIU
  else {
    Serial.println("Error al abrir el archivo");
  }
  delay(900000);
}

```

Annex A6. Codi de validació del sensor de temperatura

```
//LLIBRERIA SD
#include <SD.h>
//FI LLIBRERIA SD

//LIBRERIES RELLOTGE
#include <virtuabotixRTC.h> //Llibreria
//FI LLIBREIRES RELLOTGES

//lliberies temp
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
//fi lliberies temo
// definim entrades analogiques i digitals
#define TEMPPIN 5

//fi de entrades

//definim variables de lectures analogiques i digitals
float TEMPERATURA;

//fi de lectures analog

//definim les variables dels voltatges
float voltph;
//fi def variable volt

//declarem sd
File logFile;
//fi delcar sd

//definim rellotge
virtuabotixRTC myRTC(6, 7, 8);
//fi def rellotge

// definim temperatura
OneWire oneWireBus(TEMPPIN);
DallasTemperature sensor(&oneWireBus);
//fi def temp

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  sensor.begin();
  //INICIEM TARGETA SD
  Serial.print(F("Iniciando SD ..."));
  if (!SD.begin(4))
  {
    Serial.println(F("Error al iniciar"));
    return;
  }
}
```

```

    }
    Serial.println(F("Iniciado correctamente"));
}
// Funcion que simula la lectura de un sensor
int readSensor()
{
    return 0;
}
//FI INICI TARGETA

void loop()
{
    //rellotge
    myRTC.updateTime();
    //fi rellotge

    //OBRIM ARXIU
    logFile = SD.open("datatemp.txt", FILE_WRITE);
    //TANQUEM ARXIU
    //temp
    sensor.requestTemperatures();
    TEMPERATURA = sensor.getTempCByIndex(0);
    //fi temp

    //GUARDAR
    if (logFile)
    {
        //ESCRITURA A TARGETA

        logFile.print(myRTC.dayofmonth);
        logFile.print("/");
        logFile.print(myRTC.month);
        logFile.print("/");
        logFile.print(myRTC.year);
        logFile.print(":");
        logFile.print(myRTC.hours);
        logFile.print(":");
        logFile.print(myRTC.minutes);
        logFile.print(":");
        logFile.print(myRTC.seconds);
        logFile.print(",");
        logFile.println(TEMPERATURA);
        logFile.close();
    }
    //TANQUEM ARXIU
    }
    else {
        Serial.println("Error al abrir el archivo");
    }
    delay(900000);
}

```

Annex A7. Codi de les proves de les mesures puntuals

Sensor de pH

```
//Es defineixen les variables del port analogic i les variables de calcul
#define PHPIN 5
float voltph;
float pH;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
//Es transformen els bits en voltatge
  voltph = (analogRead(PHPIN) * 5000.0) / 1024.0;
  pH= -0.0051*voltph + 24.209;
  //Lectura al port Serial de les dades enregistrades
  Serial.println(pH);
  delay(1000);
}
```

Sensor de OD

```
#define ODPIN 5
float voltod;
float OD;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
//Es transformen els bits en voltatge
  voltod = (analogRead(ODPIN) * 5000.0) / 1024.0;
  OD=0,0215* voltph +3,3258;
  //Lectura al port Serial de les dades enregistrades
  Serial.println(OD);
  delay(1000);
}
```

Sensor de temperatura

```
//LLIBRERIA SD
#include <SD.h>
//FI LLIBRERIA SD

//LLIBRERIES RELLOTGE
#include <virtuabotixRTC.h> //Llibreria
//FI LLIBREIRES RELLOTGES

//lliberies temp
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
//fi lliberies temo

// definim entrades analogiques i digitals
#define TEMPPIN 5
//fi de entrades

//definim variables de lectures analogiques i digitals
float TEMPERATURA;
//fi de lectures analog

// definim temperatura
OneWire oneWireBus(TEMPPIN);
DallasTemperature sensor(&oneWireBus);
//fi def temp

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  sensor.begin();
}
//FI INICI TARGETA

void loop()
{
  //temp
  sensor.requestTemperatures();
  TEMPERATURA = sensor.getTempCByIndex(0);
  //fi temp

  Serial.println(TEMPERATURA);
  delay(1000);
}
```

Annex A8. Codi de validació de la terbolesa

```
#define TURBPIN 5
float volturb;
float terbolesa;
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  //Es transformen els bits en voltatge
  volturb = ((analogRead(TURBPIN)) * 5000.0) / 1024.0;
  // terbolesa = -585.19* volturb + 2651.6;
  terbolesa = -2.4854* volturb + 11763;
  //Lectura al port Serial de les dades enregistrades
  Serial.println(terbolesa);
  delay(1000);
}
```

Annex A9. Memòria tècnica presentada per al concurs Recircula Challenge 2022

En el marc de la beca d'aprenentatge que va realitzar l'autor d'aquest TFG es va presentar una proposta al concurs Recircula Challenge 2022.

La idea del projecte era desenvolupar una sonda multiparamètrica autoabastida basada en microcontroladors de baix cost i codi obert, que permetessin controlar i poder fer el monitoratge en temps real dels paràmetres fisicoquímics i microbiològics d'interès, per tal de poder optimitzar el màxim possible els recursos hídrics així com també l'excés de fertilitzants.

El resultat del concurs va ser la obtenció del **3. Er premi**.



MEMÒRIA TÈCNICA RECIRCULA CHALLENGE 2022



Equip e-grosens Benjamí Calvillo Melero
Anna Espina Boronat
Marta Fernandez Gatell

Mentor Jaume Puigagut Juárez
