



OpenSpirulina: Monitorat i control de cultius d'espírulina

Sergio Arroyo Arroyo
Grau d'Enginyeria Informàtica
Sistemes encastrats

Jordi Bécares Ferrés
Pere Tuset Peiró

06/2019



Aquesta obra està subjecta a una llicència de [Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada 3.0 Espanya de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

FITXA DEL TREBALL FINAL

Títol del treball:	<i>OpenSpirulina: Monitorat i control de cultius d'espírulina</i>
Nom de l'autor:	<i>Sergio Arroyo Arroyo</i>
Nom del consultor/a:	<i>Jordi Bécares Ferrés</i>
Nom del PRA:	<i>Pere Tuset Peiró</i>
Data de lliurament (mm/aaaa):	<i>06/2019</i>
Titulació o programa:	<i>Grau d'Enginyeria Informàtica</i>
Àrea del Treball Final:	<i>Sistemes encastats</i>
Idioma del treball:	<i>Català</i>
Paraules clau	<i>Microalga, espírulina, cultiu</i>
Resum del Treball:	
<p>L'espírulina és un cianobacteri el qual es creu que va aparèixer al planeta Terra fa aproximadament 3500 milions d'anys. En els darrers 60 anys està despertant un gran interès per les seves propietats nutricionals i la seva eficiència productiva.</p> <p>S'ha convertit en la microalga més cultivada al món amb una producció d'unes 90000 tones/any. Molts cops ha estat assenyalada com un aliment per millorar la desnutrició global i va ser declarada com "un dels millors aliments per al futur de la humanitat" per l'IIMSAN amb un estudi encarregat per la FAO l'any 2008.</p> <p>Aquest treball neix de la col·laboració amb l'entitat OpenSpirulina, la qual disposa d'una solució propietària basada en un microcontrolador Arduino que realitza lectures dels sensors connectats i els envia a un servidor remot. Tot i això, la solució actual era força bàsica i amb problemes d'estabilitat i escalabilitat, amb la qual cosa l'entitat sol·licita ajuda per remodelar el projecte, com també poder ampliar les funcionalitats i possibilitats de la solució, així com el rendiment dels cultius.</p> <p>El projecte consisteix en la renovació i millora del sistema monitorat dels cultius d'espírulina, afegint funcionalitats de configuració molt més intuïtiva i dinàmica per a l'usuari. També s'afegeix un nou sistema de control remot d'actuadors, com d'exploració de dades i control d'alarmes de forma centralitzada amb ajuda d'una nova plataforma web més modulable per a futures millores i flexible en quant a configuració.</p>	

Abstract:

Spirulina is a cyanobacteria which is believed to have appeared on the planet Earth approximately 3.5 billion years ago. In the last 60 years, it is awakening a great interest for its nutritional properties and its productive efficiency.

It has become the most cultivated microalgae in the world with a production of about 90000 tons / year. Many times it has been designated as a food to improve global malnutrition and was declared as "one of the best foods for the future of humanity" by IIMSAN with a study commissioned by FAO in 2008.

This work is born from the collaboration with the entity OpenSpirulina, which has a proprietary solution based on an Arduino microcontroller that makes readings of the connected sensors and sends them to a remote server. Even so, the current solution was quite basic and with problems of stability and scalability, with which the entity requests help to remodel the project, as well as being able to expand the functionalities and possibilities of the solution, as well as the yield of the crops.

The project consists of the renewal and improvement of the monitored system of spirulina cultures, adding configuration features much more intuitive and dynamic for the user. A new system of remote control of actuators is also added, such as data exploitation and alarm control in a centralized way with the help of a new web platform more modular for future improvements and flexible in terms of configuration.

Índex

Contingut

1.	Introducció.....	3
1.1.	Context i justificació del treball	3
1.2.	Descripció del treball	5
1.3.	Objectius del TFC	5
1.4.	Enfocament i mètode seguit	7
1.5.	Planificació del treball.	8
1.6.	Recursos emprats	12
1.7.	Productes obtinguts	13
1.8.	Breu descripció dels altres capítols de la memòria.	15
2.	Antecedents	16
2.1.	Estat de l'art.....	16
2.2.	Estudi de mercat.....	18
3.	Descripció funcional.....	20
3.1.	Sistema de monitorat i control de cultius d'espírulina	20
3.2.	Sistema microcontrolador	23
3.2.1.	Diagrama de blocs	26
3.3.	Sistema Web de visualització de dades i control remot d'actuadors	27
4.	Descripció detallada	30
4.1.	Sistema del microcontrolador	30
4.1.1.	Procediment d'inici.....	30
4.1.2.	Fitxer de configuració.....	31
4.1.3.	Servidor Web.....	32
4.1.4.	Publicador de missatgeria MQTT.....	33
4.1.5.	Procediment cíclic de monitorat i control.....	34
4.2.	Sistema Web de visualització de dades.....	34
4.3.	Broker MQTT	35
4.4.	Esquemàtic del hardware	36
5.	Especificacions i característiques dels sensors	40
5.1.	Sensors d'obtenció de dades de l'ambient	40
5.1.1.	Sensor Temperatura i humitat (DHT22).....	40
5.1.2.	Sensors d'irradiància	40
5.1.3.	Sensor d'obtenció de dades dels cultius	41
6.	Viabilitat tècnica.....	44
6.1.	Punts forts	44
6.2.	Punts dèbils.....	44
6.3.	Anàlisi de riscos.....	45
7.	Valoració econòmica	47
8.	Conclusions	51
8.1.	Quines lliçons s'han après del treball?.....	52
8.2.	Autoavaluació	52
8.2.1.	Dedicació de temps.....	52
8.2.2.	Reflexió crítica i anàlisi	53
8.3.	Línies de futur	53
9.	Glossari.....	55
10.	Bibliografia (Totes les fonts que hagueu consultat)	56

Il·lustració 1. Esquema funcional de la solució inicial proporcionada per el client	4
Il·lustració 2. Prototip MCU amb sensors de ORP, pH, Lux i corrent connectats	13
Il·lustració 3. Prototip MCU amb sensors de lux i corrent connectats	14
Il·lustració 4. Prototip entorn web de visualització de dades rebudes dels cultius	14
Il·lustració 5. Imatge del microcontrolador STM32F4Discovery	16
Il·lustració 6. Imatge del microcontrolador Arduino DUE	17
Il·lustració 7. Dispositiu boia de la marca YSI per el sector de l'aqüicultura	18
Il·lustració 8. Esquema funcional del sistema de monitorat i control	20
Il·lustració 9. Visió general sobre funcionament i interacció dels diferents sistemes	23
Il·lustració 10. Disseny per capes del mòdul que interactuen en la solució	24
Il·lustració 11. Esquema de disseny de software	26
Il·lustració 12. Esquema funcional del sistema Web	28
Il·lustració 13. Exemple de panell Grafana que agrupa gràfiques i actuadors remots	29
Il·lustració 14. Interfície Web de control d'actuadors del MCU	32
Il·lustració 15. Diagrama de flux del procediment cíclic de monitorat	34
Il·lustració 16. Esquema comunicació entre publicadors i subscriptors	36
Il·lustració 17. Connector mascle de 3 pins polaritzat	37
Il·lustració 18. Connector mascle de 4 pins polaritzat	37
Il·lustració 19. Termial block de 4 pins	37
Il·lustració 20. Connector VGA mascle	37
Il·lustració 21. Escut (Shield) per Arduino Mega dissenyat per OpenSpirulina	38
Il·lustració 22. PCB escut dissenyat per OpenSpirulina	38
Il·lustració 23. Sensor DHT22 de temperatura i humitat	40
Il·lustració 24. Sensor de lux model BH1750	41
Il·lustració 25. Sensor de lux model MAX44009	41
Il·lustració 26. Sensor de temperatura per a líquids	42
Il·lustració 27. Sensor de pH	42
Il·lustració 28. Sensor de ORP	42
Il·lustració 29. Sensor amperímetre	43
Il·lustració 30. Sensor DO	43
Taula 1. Taula d'objectius principals	6
Taula 2. Taula d'objectius extraordinaris	7
Taula 3. Detall de tasques i subtasques de la fase 1	8
Taula 4. Detall de tasques i subtasques de la fase 2	8
Taula 5. Detall de tasques i subtasques de la fase 3	9
Taula 6. Diagrama de Gantt amb la distribució de tasques i subtasques	11
Taula 7. Comparativa sobre característiques de MCU alternatius a Arduino Mega 2560	17
Taula 8. Diagrama de flux d'inici del MCU	30
Taula 9. Estructura del Webservice de peticions d'actuadors	33
Taula 10. Descripció de l'estructura del missatge MQTT	33
Taula 11. Descripció de la estructura de dades InfluxDB	35
Taula 12. Relació de dispositius connectats a l'escut	39
Taula 13. Valoració de presupost de material	47
Taula 14. Especificació dels costos dels materials necessaris	48
Taula 15. Especificació des costos de desenvolupament del producte	49
Taula 16. Càlcul final de presupost	50
Taula 17. Taula d'objectius principals	51
Taula 18. Taula d'objectius extraordinaris	51
Taula 19. Previsió de dedicació d'hores	53

1. Introducció

L'espírulina és coneguda com una alga, tot i que en realitat és un cianobacteri. Es creu que va aparèixer al planeta Terra fa aproximadament 3.500 milions d'anys, en els darrers 60 anys està despertant un gran interès per les seves propietats nutricionals i la seva eficiència productiva. S'ha convertit en la microalga més cultivada al món amb una producció d'unes 90.000 tones/any (dades FAO¹ any 2016). Molts cops ha estat assenyalada com un aliment per millorar la desnutrició global i va ser declarada «com un dels millors aliments per al futur de la humanitat» per l'IIMSAN amb un estudi encarregat per la FAO l'any 2008.

Els principals motius per cultivar la microalga espírulina es deriven de les seues propietats nutricionals i l'eficiència energètica i de recursos que caracteritzen el seu cultiu.

A Europa el seu cultiu s'ha desenvolupat en dos models ben diferents: per una banda el sistema de cultiu artesanal que consisteix en diferents basses de grandàries que oscil·len entre 25 i 150 m² amb una profunditat de 20-30 cm, on França és el principal país amb aquest tipus de producció amb més de 250 productors actius. Per altra banda el model desenvolupat per grans consorcis empresarials on es cultiva l'espírulina i/o altres micro algues amb fotobiorreactors.

1.1. Context i justificació del treball

L'espírulina és una microalga la qual conté nombroses propietats beneficioses per al consum humà, degut al seu alt contingut en proteïna, vitamines, minerals, àcids grassos essencials, entre molts d'altres. Degut al gran interès a nivell mundial sobre aquest suplement nutricional, des de fa uns anys han començat a sorgir models de negoci centrats en el cultiu d'aquesta. És en aquest punt on entra en escena l'associació OpenSpirulina, una empresa social de l'àmbit de l'economia blava amb l'objectiu principal és promocionar el cultiu autònom a petita escala d'espírulina per la sobirania alimentària.

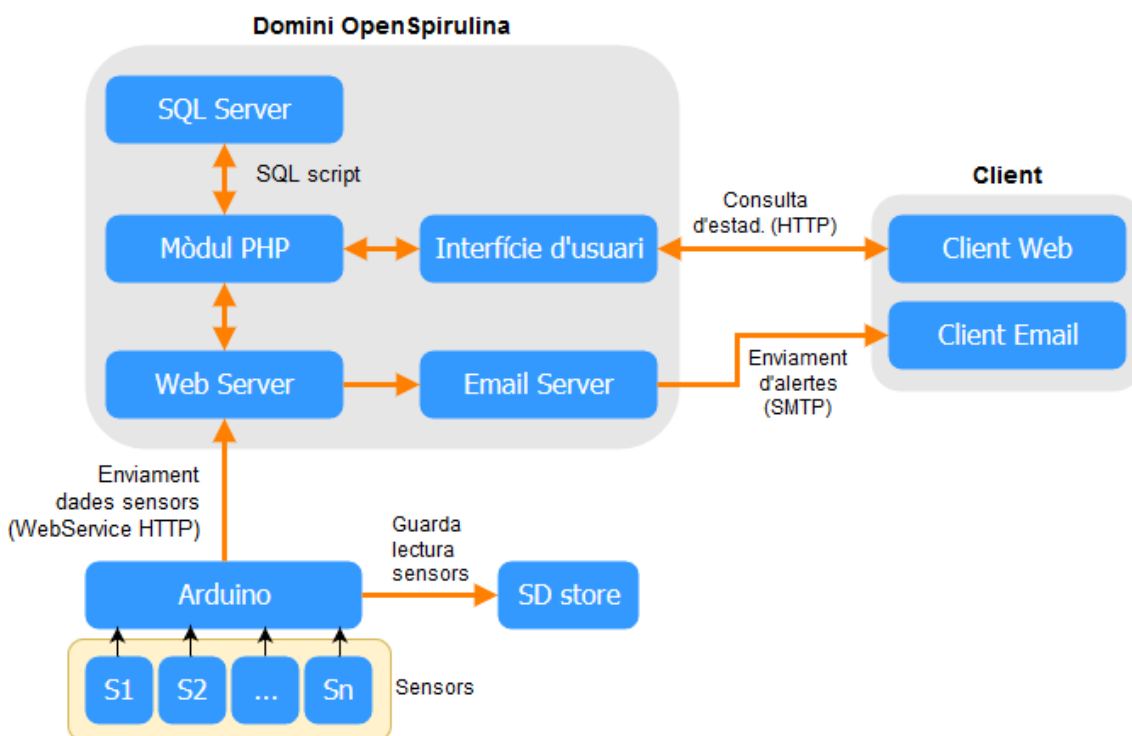
Fa uns anys, OpenSpirulina comença a desenvolupar una solució propietària basada en el MCU Arduino Mega 2560 en el qual l'usuari d'un cultiu podia descarregar el codi, modificar algunes parts d'aquest per adaptar-ho a les peculiaritats d'un cultiu en concret i finalment compilar-ho per posar-lo en funcionament. També disposen d'un servidor remot el qual pot rebre les dades recol·lectades dels diferents cultius, consultar les dades del cultiu mitjançant taules de dades tabulares i la possibilitat d'enviar notificació per correu del sensor de temperatura afegit al MCU.

¹ FAO [2019] - <http://www.fao.org/home/es/>

Tot i que la solució fins al moment ha estat parcialment funcional, el client es troba amb una sèrie de problemes que impedeixen tenir un sistema més flexible, productiu i, en conseqüència, més competitiu, que poder oferir als seus clients. Els principals problemes que pateix la solució actual son:

- Sistema del MCU poc configurable i intuïtiu.
- Sistema microcontrolador poc estable: de forma aleatòria es bloqueja i s'ha de intervenir manualment per tornar a fer-lo funcionar.
- Sense opció de configuració de notificacions dels diferents tipus de sensors: Tan sols s'envien notificacions per correu dels sensors de temperatura.
- Sistema de visualització de dades molt poc flexible i configurable.

Per tal de resoldre els problemes existents i millorar les funcionalitats actuals es planteja redissenyar el sistema per tal de aconseguir una solució molt més estable, flexible i intuïtiva per als usuaris finals que la facin servir. Per tal d'assolir els objectius plantejats, es pretén basar la solució en tecnologies actuals que ajudaran a aconseguir un producte final més i versàtil, fàcilment integrable amb altres sistemes i més escalable.



Il·lustració 1. Esquema funcional de la solució inicial proporcionada per el client

1.2. Descripció del treball

La solució es basarà en dos sistemes separats, un situat a la part del MCU i d'altre situat a la part de servidor remot a Internet:

Àmbit de MCU:

Redissenyar completament el sistema per tal de poder suportar tant els sensors que conté la actual solució, com d'altres els sensors que requereix el client. Donant la possibilitat de poder afegir-ne en un futur altres tipus de forma àgil.

També, amb disposició d'un mòdul lector de targetes SD, s'afegeix la funcionalitat de que l'usuari pugui modificar fàcilment la configuració, distribució i comportament dels sensors, configuració de xarxa, interval de lectura del sensors, activació de mostreig per pantalla, bolcat de dades a fitxer, etc. D'aquesta forma permetre que usuaris amb poc o cap coneixement de programació hagin de modificar codi per adaptar el sistema a les seves necessitats.

Àmbit de servidor remot:

En la solució actual es disposa d'un sistema de servidors remots allotjats al domini 'openspirulina.com', els quals implementen algunes funcionalitats bàsiques com: la recepció de dades enviades des de els diferents cultius; representació d'una gràfica bàsica amb les dades rebudes; o l'enviament de correu si la temperatura del cultiu sobrepassa uns llindars prefixats. Però aquest sistema no permet fixar noves alarmes referents a senyals de diferents sensors o crear noves gràfiques compostes de dades procedents de diferents cultius, etc.

Es proposar doncs, substituir aquest sistema d'anàlisi i monitorat de dades per un sistema basat en tauler Grafana el qual serà molt més versàtil per poder representar noves gràfiques compostes de diferents canals de dades, programar alarmes de diferents tipus, etc. També es proposa redissenyar el sistema de missatgeria per la notificació de les dades dels sensors, substituint l'actual enviament al Web Service propietari per el protocol MQTT. Aquest nou sistema de comunicació de les dades permetrà poder afegir nous sensors de forma dinàmica sense haver de modificar codi a la part de servidors. Com també permetrà als diferents usuaris subscriure's a notificacions de qualsevol sensor en qualsevol cultiu i consultar les dades en temps real des de qualsevol dispositiu mòbil, ordinador, etc.

1.3. Objectius del TFC

A partir de l'estat inicial en el que es troba la solució actual, les prioritats funcionals que ha transmès el client i el temps del que es disposa per a la realització del projecte, s'especifiquen els objectius, distribuïts com a principals i extraordinaris, de la següent forma:

Principals

#	Objectiu	Fase
1	Configuració de dispositius mitjançant targeta SD	1
2	Integració nous mòduls + sensors requerits per el client	2
3	Implantació de sistema de gràfiques amb <i>Grafana</i> + protocol <i>MQTT</i>	2
4	Implementació a <i>Grafana</i> d'alarmes actualment ja operatives la solució actual	3
5	Implementació a <i>Grafana</i> d'alarmes per la resta de sensors afegits	3
6	Actuadors manuals remots, per controlar el hivernacle i l'agitador	3
7	Implantació de sistema WDG per control d'errors	3

Taula 1. Taula d'objectius principals

1. Sistema configuració del dispositiu per fer servir uns sensors o uns altres. L'objectiu és que els usuaris no hagin de compilar novament tot el projecte per tal d'activar uns paràmetres o d'altres.
2. El client OpenSpirulina requereix noves funcionalitats en el sistema, com per exemple: canvi de l'actual mòdul *Ethernet W5100* a un nou model *W5500*, per aconseguir més estabilitat en les comunicacions; suportar nous sensors de Lux model *MAX44009*, amb major rang de captació que els actuals que incorpora el sistema (el *BH1750*); nous sensors de corrent de tipus no invasius (model *SCT-013*) i sensor de *ORP* (oxidation / reduction potential).
3. Instal·lació d'un entorn de recepció, visualització i format de dades mètriques amb ajuda dels softwares *Grafana* + protocol de missatgeria *MQTT* + client *Telegraf* per la inserció de mètriques obtingudes des de els MCU a la BBDD de *Grafana*.
4. Afegir al sistema d'alarmes sobre *Grafana*. Com a mínim les alarmes implementades en el codi de la solució inicial implementada per el client.
5. Afegir les alarmes per a la resta de sensors implementats fins al moment en el sistema.
6. Possibilitat de poder executar accions sobre el microcontroladors de forma remota des de la web. En aquesta primera aproximació es realitzarà la part del sistema de comunicacions, amb un *LED* connectar al *GPIO* per simular quan s'activa un motor i un altre quan s'activa l'agitador. A mida que es vagi avançant es definirà amb més detall.
7. Sistema *Watchdog* per al control d'errors per tal d'assegurar que sempre funciona la comunicació amb el servidor, sinó que el servidor enviï alarma i/o el dispositiu es reiniciï.

Extraordinaris

En cas de que s'assoleixin tots els objectius principals abans del temps previst, es pot valorar la implementació dels objectius descrits a continuació:

#	Objectiu
A	Actuadors automàtics, fer certa intel·ligència en el sistema
B	Sistemes de comunicacions genèric
C	Comunicació d'accions entre múltiples microcontroladors

Taula 2. Taula d'objectius extraordinaris

- A. Actuadors automàtics, fer certa intel·ligència en el sistema per permetre executar accions complexen en detectar lectures dels sensors fora de rang.
- B. WiFi + sistema de comunicacions genèric per poder canviar interfície només amb un paràmetre de configuració i poder escollir entre *WiFi*, *Ethernet*, *SD*, etc.
- C. Poder enviar accions entre altres microcontroladors per tal d'executar accions en altres dispositius del mateix cultiu. Per exemple *MCU* que controlin sistemes de ventilació o il·luminació llunyan.

1.4. Enfocament i mètode seguit

Com a estratègia a seguir ja ens ve fixada per el client la necessitat de seguir adaptant la solució que fins ara han estat desenvolupant i que no volen perdre, però si millorar en la mesura de lo possible, optimitzar els processos d'obtenció i tractament de les dades i afegit noves funcionalitats, tot utilitzant tecnologies més actuals.

El poder partir d'un projecte donat pot comportar avantatges tals com la possibilitat de poder iniciar les tasques sobre una solució totalment, o com a mínim parcialment, funcional. Tot i això també pot comportar una sèrie de problemes afegits com la necessitat de solucionar possibles falles existents en la solució inicial abans de poder implantar noves funcionalitats de forma estable.

Així doncs, durant la primera fase de projecte es dedica un cert nombre d'hores a analitzar i familiaritzar-se amb l'estructura i funcionament de la solució actual. Després de l'anàlisi es pren la decisió de quines part del projecte es poden aprofitar i quines altres s'hauran de refer de noves per optimitzar el funcionament, millorar l'estabilitat o facilitar l'adaptabilitat en futures estratègies que la empresa vulgui prendre.

1.5. Planificació del treball.

La planificació d'aquest projecte compren el semestre en curs, de febrer a juny del 2019. En les següents taules es representa la planificació dividida en tres fases en que es compona el projecte:

Fase 1	
1	Estructurar parts del projecte
2	Dimensionar càrrega de treball a realitzar
3	Cercar informació referent a les tecnologies implicades en la solució
4	Proves d'execució de la solució actual del client sobre el HW proporcionat
5	Configuració de dispositius mitjançant targeta SD
5.1	<ul style="list-style-type: none">• Cerca d'informació i especificacions del mòdul lector de SD utilitzat
5.2	<ul style="list-style-type: none">• Implementació del codi funcional
5.3	<ul style="list-style-type: none">• Execució del joc de proves
6	Redactat del document PAC2

Taula 3. Detall de tasques i subtasques de la fase 1

Fase 2	
1	Integració nous mòduls + sensors requerits per el client <ul style="list-style-type: none">• Sensors de Lux, model <i>MAX44009</i>• Sensors de ORP, fabricant <i>AtlasScientific EZO</i>• Corrent (Intensitat), model <i>SCT-013</i>, fabricant <i>DF Robot</i>• Mòdul <i>Ethernet W5500</i> que haurà de substituir a l'anterior <i>W5100</i>
1.1	<ul style="list-style-type: none">• Obtenció de les especificacions de fabricant dels diferents mòduls
1.2	<ul style="list-style-type: none">• Implementació del codi funcional
1.3	<ul style="list-style-type: none">• Integració dels nous sensors a la web actual <i>sensors.openspirulina.com</i>
1.4	<ul style="list-style-type: none">• Execució del joc de proves
2	Implantació de sistema de gràfiques <i>Grafana</i> + protocol <i>MQTT</i>
2.1	<ul style="list-style-type: none">• Instal·lació VM amb <i>Ubuntu Server 18.04 LTS</i>
2.2	<ul style="list-style-type: none">• Implantació de broker <i>MQTT (Mosquitto broker + clients)</i>
2.3	<ul style="list-style-type: none">• Implantació d'agent lleuger <i>Telegraf</i> de recollida de missatgeria <i>MQTT</i>
2.4	<ul style="list-style-type: none">• Parametrització bàsica de <i>Grafana</i>
3	Redactat del document PAC3

Taula 4. Detall de tasques i subtasques de la fase 2

Fase 3	
1	Configuració a <i>Grafana</i> d'alarmes implementades actualment al codi
2	Configuració a <i>Grafana</i> d'alarmes per la resta de sensors afegits
3	Actuadors manuals remots, per controlar el hivernacle i l'agitador
3.1	<ul style="list-style-type: none">• Implementació servei web al <i>MCU</i> per tal d'escollir peticions
3.2	<ul style="list-style-type: none">• Implementació de servei d'actuador remot per tal d'enviar senyals als <i>MCU</i>
3.3	<ul style="list-style-type: none">• Implementació servei de visualització de l'estat dels actuadors
4	Implantació de sistema <i>WDG</i> per control d'errors
5	Redactat del document PAC4

Taula 5. Detall de tasques i subtasques de la fase 3

En la planificació inicial, el projecte no ha sofert excessives modificacions, tot i que han hagut alguns problemes en la en la fase de implementació que han fet augmentar la dedicació d'hores en taques, les quals es preveien inicialment menys complexes. Posteriorment, amb un anàlisi de l'estat del projecte i les tasques pendents de finalitzar, es decideix si alguna d'aquestes pren una prioritat diferent a l'inicial i així poder garantir la finalització de la solució amb el màxim nombre de fites realitzades. Els punts més significatius que han alterat la planificació inicial son:

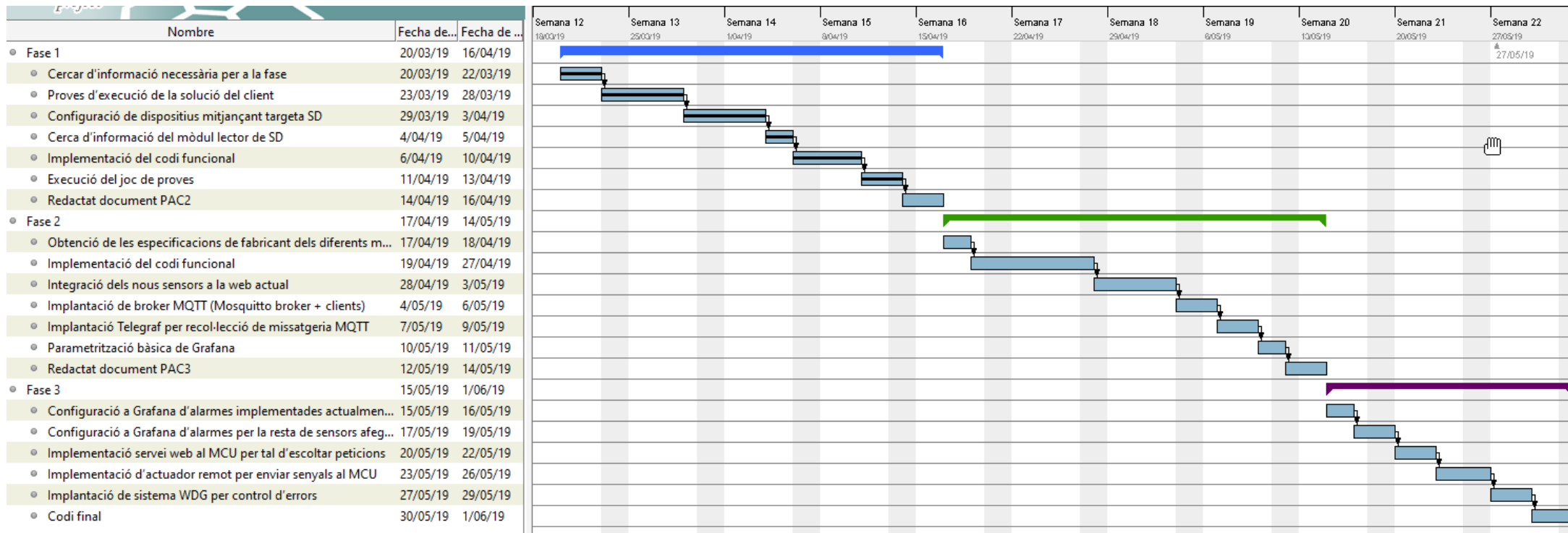
Fase 1: En la primera fase s'han assolit totes les tasques planificades inicialment, tot i que amb alguns contratemps en la part d'implementació de codi per la càrrega de configuració mitjançant fitxer allotjat a la targeta SD. En aquesta part s'han hagut d'invertir més hores de les inicialment fixades per tal de poder adaptar la solució ja existent, ja que el codi inicialment realitzat pel client no contemplava la possibilitat de configuració dels mòduls en temps de càrrega del programa, així com la possibilitat d'afegir de nous en temps d'execució. Aquest inconvenient va ampliar en dos dies més la tasca d'implementació de codi funcional, reduint parcialment el temps de dedicació en el redactat de l'informe de seguiment.

Fase 2: En aquesta fase, es va requerir força temps d'anàlisi i proves en la implantació del mòdul W5500 amb Arduino Mega 2560 el qual, en el moment d'entrega parcial d'aquesta fase, no va estar possible integrar-ho en el sistema de forma correcte. Degut a aquest problema, gran part del temps inicialment planificat per altres tasques ha estat dedicat l'intent de resolució aquest incident. Tot i que no era completament bloquejant, si que és cert que és una part important en el projecte la qual s'avia de mirar de trobar una solució ràpida durant la següent -i darrera- fase, per tal de que el MCU pogués enviar les mesures rebudes dels sensors fina al servidor remot.

D'altre banda, també durant la segona fase, el client decideix no dur a terme les modificacions necessàries per suportar la recepció de dades dels nous sensors afegits al sistema, ja que crec que amb el nou portal Grafana ja quedaran cobertes totes les necessitats fixades fins al moment. Aquesta modificació en la planificació, tot i que afegeix temps addicional a la fase 2, va haver de ser utilitzat per mirar de cercar una solució amb el mòdul Ethernet, anteriorment comentat.

Fase 3: La darrera fase tan sols ha sofert una modificació en una de les darreres tasques (tasca 4 de la taula 5), referent a la implementació de control d'errors. Durant la implementació del servidor Web sobre el MCU per tal de controlar remotament els actuadors connectats al sistema, es decideix afegir una funcionalitat de interfície Web (sobre el MCU). Aquesta nova interfície Web permet al usuari visualitzar l'estat actual dels tots els actuadors configurats en el sistema i poder interactuar amb aquests activant i desactivant cada un de forma individual.

En la il·lustració següent es mostra el diagrama de Gantt inicialment elaborat en una fase prèvia al projecte en el que es van fer estimacions aproximades dels temps que es requeririen per cada una de les tasques fixades.



Taula 6. Diagrama de Gantt amb la distribució de tasques i subtasques

1.6. Recursos emprats

El client OpenSpirulina ens proporciona la solució actual desenvolupada fent servir el IDE de Arduino. A partir d'aquesta base es valora la possibilitat d'utilitzar el mateix entorn o d'altre solució gratuïta que faciliti la creació i integració de codi i també, si és possible, doni suport durant el desenvolupament, com per exemple la possibilitat de comparació de codi font, sistema d'auto completat de codi (funció *IntelliSense code completion*), possibilitat de publicació plataformes de desenvolupament de col·laboració (com per exemple *GitHub*). Per aquest motiu es decideix utilitzar *Microsoft VSCode + PlatformIO*.

També es tindrà en compte que la solució realitzada fins al moment per el client està plantejada amb la utilització d'un microcontrolador *Arduino Mega*, fent ús inclús d'una placa de circuit modular, dissenyada per la mateixa empresa *OpenSpirulina*, que facilita la connexió dels diferents sensors i mòduls. Així doncs queden fixats alguns paràmetres com el llenguatge de programació a utilitzar, el microcontrolador o els sensors requerits.

A continuació es mostra una llista amb els recursos utilitzats per a la realització del projecte:

- Hardware:
 - PC Intel Core i7-4510, 8GB RAM
 - Placa Arduino Mega 2560 Rev. 3.
 - Shield propietària OpenSpirulina per connexió de mòduls externs.
 - Joc de mòduls proporcionats per OpenSpirulina.
- Software:
 - S.O. Windows 10 x64 Pro
 - IDE *Microsoft Visual Studio Code* v1.33 + *PlatformIO* v2.0.2
 - VM Oracle *VirtualBox* v6.0, per a la execució del servidor Linux
 - Editor de text *Sublime Text* v3.2.
 - Client Telnet *Putty* v0.7, per a administració remota del servidor Linux
 - Client FTP *FileZilla Client* is 3.41.2
 - Aplicació de disseny de diagrames *Draw.io*
 - Conjunt d'eines Microsoft Office 2016
 - Client *MQTT Spy*, per a proves d'enviament de missatgeria MQTT
 - *Wireshark* v3.0, per l'anàlisi de tràfic de xarxa enviat entre el MCU i el servidor remot
- Documentació:
 - Manual de referència de programació en C++
 - Manual de referència de Arduino Mega + especificacions tècniques

- Especificacions tècniques dels fabricants dels diferents mòduls Arduino

1.7. Productes obtinguts

En la finalització del projecte s'aconsegueix obtenir els següents productes:

MCU de monitorat i control del cultiu: un sistema de autònom fàcilment parametrizable a nivell d'usuari, el qual permet la connexió de diferents mòduls externs com: sensors pH, de lluminositat, temperatura ambiental i/o de líquids, d'humitat, *ORP² (Oxidation / Reduction Potential)*, corrents, etc. Com també la possibilitat d'afegir dispositius tipus relés, alarmes tipus botzina, etc. Aquests mòduls podran comportar-se com actuadors externs, per poder realitzar accions com per exemple: activar calefactors, obrir sistemes de ventilació, etc. i ser controlats de forma remota amb esdeveniments executats des de la web de gràfiques o com accions directes dels usuaris.

En les dues següents il·lustracions es mostra un prototip del MCU amb diferents sensors connectats i una mostra simple de actuador, en forma de LED vermell, que simula l'activació de qualsevol dispositiu connectat a la sortida de l'actuador:



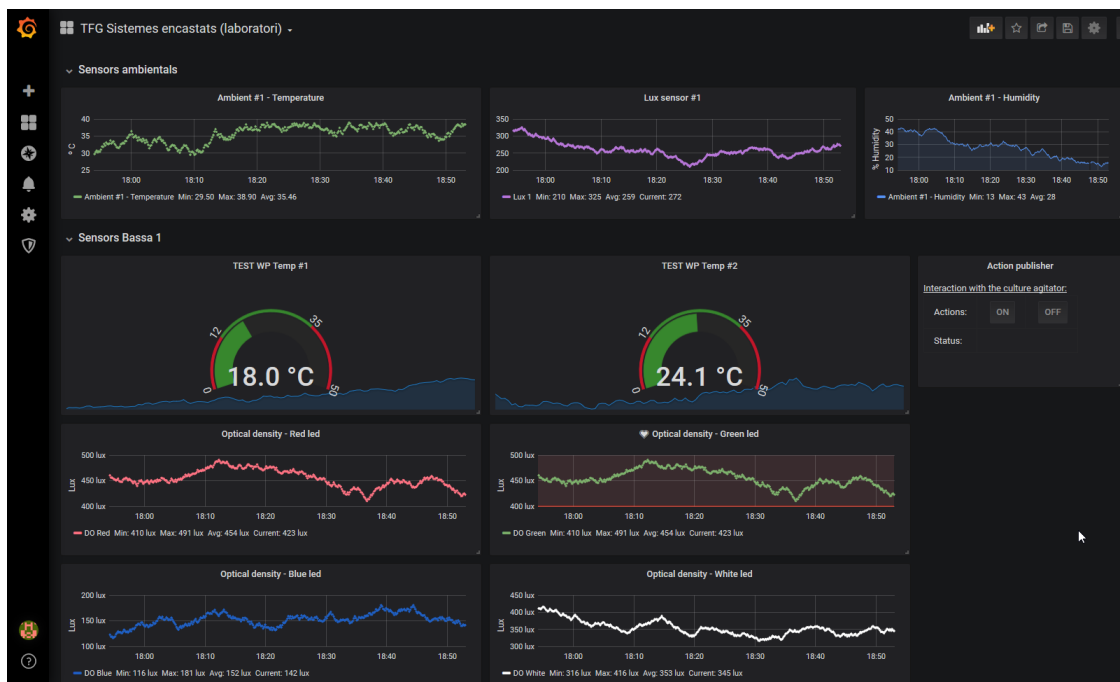
Il·lustració 2. Prototip MCU amb sensors de ORP, pH, Lux i corrent connectats

² ORP - (agost 2017) Wikipedia: https://ca.wikipedia.org/wiki/Potencial_de_reducci%C3%B3



Il·lustració 3. Prototip MCU amb sensors de lux i corrent connectats

Servidor remot: També s'inclou un sistema de recepció, emmagatzematge i visualització de les dades mètriques rebudes dels diferents MCU i sensors. Amb aquest sistema es poden realitzar consultes i exploració de dades dels diferents cultius així com enviar accions al actuadors connectats en els MCU dels cultius. En la següent il·lustració es mostra un prototipat de la interfície Web basat en Grafana:



Il·lustració 4. Prototip entorn web de visualització de dades rebudes dels cultius

Les dades dels diferents cultius ubicats en qualsevol part del món podran ser comparats o analitzats de forma conjunta per prendre decisions estratègiques o intentar potenciar el creixement dels microorganismes creant condicions idònies per aquests.

1.8. Breu descripció dels altres capítols de la memòria.

En els següents capítols es descriu amb detall els següents apartats que es resumeixen a continuació:

- **Capítol 2 - Antecedents:** Breu anàlisi de les tecnologies en els sistemes encastats i com poden ajudar aquests en el desenvolupament d'un sistema de monitorat de cultius o control de qualsevol àmbit productiu en general. S'analitzen diferents tipus de microcontroladors actualment disponibles al mercat i es comparen les seves característiques amb l'utilitzat en el projecte. També es realitza una prospecció del mercat per analitzar la existència de solucions de tercers que siguin similars a desenvolupada al projecte. Veure les característiques de les que disposen i comparar amb les nostres.
- **Capítol 3 – Descripció funcional:** Anàlisi sobre el disseny realitzat en les diferents parts del projecte, el seu funcionament com també les decisions preses per a la realització d'aquest i els diagrames de blocs que descriuen la relació entre les diferents parts del disseny.
- **Capítol 4 – Descripció detallada:** En aquest capítol es pretén descriure de forma tècnica i detallada el disseny i funcionament de la solució. El procés es detallarà en diferents apartats, tenint en compte tres parts diferenciades conceptualment: una el sistema del MCU; altre, el sistema web de visualització de dades i control d'alertes; i finalment, el sistema de comunicació i distribució de missatgeria MQTT.
- **Capítol 5 – Especificacions i característiques dels sensors:** Breu descripció sobre els sensors afegits a la solució i les seves característiques.
- **Capítol 6 – Viabilitat tècnica:** Es realitza un estudi de la viabilitat tècnica del projecte, valorant quins punts poden ser millorables i quins altres són un atractiu en la solució global.
- **Capítol 7 – Valoració econòmica:** Es realitza una estimació pressupostària de quin seria el cost real de producció del projecte i es valora la seva viabilitat dur-la a terme.

2. Antecedents

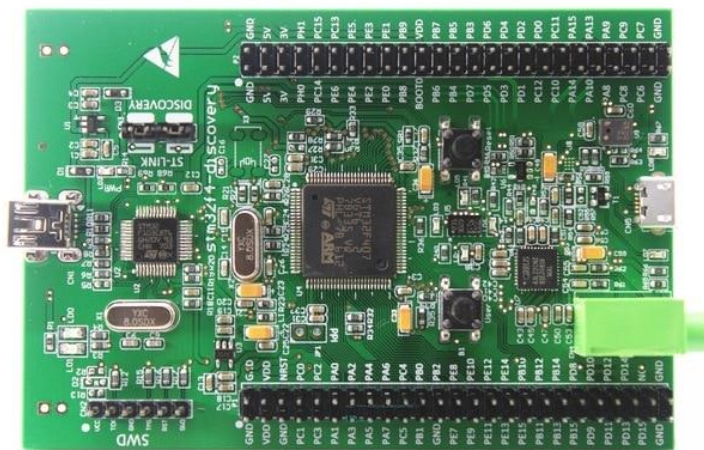
2.1. Estat de l'art

Qualsevol sistema de monitorat de cultius i, de forma més general, qualsevol sistema de control de cultius, processos, etc. engloba un conjunt de tecnologies que, utilitzen de forma simultània una sèrie de sistemes electrònics per tal de realitzar tasques d'obtenció d'informació, comunicacions de dades, control d'accions, etc. Evidentment, un sistema d'aquestes característiques, pot desenvolupar tasques que, tot i ser senzilles, poden ser molt crítiques.

El cas del d'aquest projecte és un bon exemple de criticitat en els processos, ja que en cas de patir una falla en el sistema de control, pot afectar al creixement del cultiu o fins i tot fer-ho mal be. És per aquest motiu la gran importància que s'ha de donar a l'elecció d'un sistema encastat adequat als requeriments de cada projecte, escollint la opció la qual disposi de tecnologies més actuals i que millor s'adapti a les necessitats concretes.

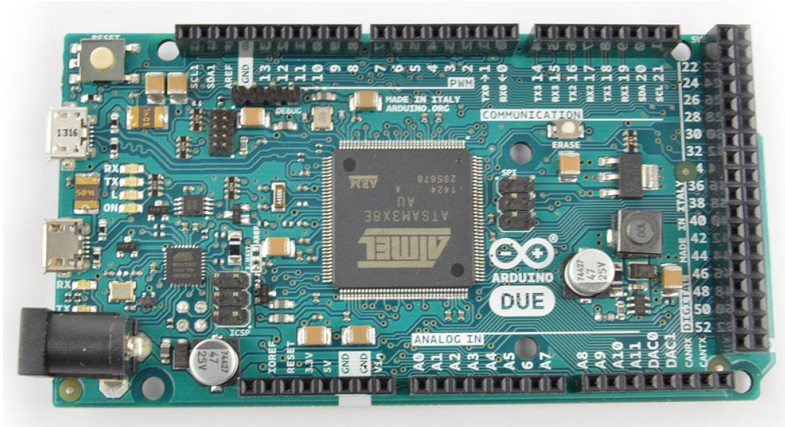
Després de realitzar un estudi sobre els sistemes encastats més estesos i que més versatilitat poden donar a aquest projecte, s'exposen dos alternatives al microcontrolador utilitzat fins al moment i es comparen les principals característiques:

- **Opció 1 - STM32F4DISCOVERY:** Microcontrolador de la marca *STMicroelectronics*, amb processador *ARM Cortex M4* a 168 Mhz de 32 bits i 192 KB de memòria RAM.



Il·lustració 5. Imatge del microcontrolador STM32F4Discovery

- **Opció 2 – Arduino DUE:** Microcontrolador de la mateixa marca Arduino amb el mateix format de GPIO que l'Arduino Mega 2560. Disposa d'un processador *Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3* a 84 Mhz i 96 KB de memòria SRAM.



Il·lustració 6. Imatge del microcontrolador Arduino DUE

A continuació es mostra comparativa amb les característiques més rellevants per al projecte que s'està realitzant, com poden ser la freqüència del processador, la resolució del convertidor *DAC* per obtenir les lectures dels sensors que emeten senyal analògica, el consum del microcontrolador sense càrrega de treball, etc:

	Arduino Mega 2560	Arduino DUE	STM32F407
Model de processador	ATmega2560	ARM Cortex-M3 r2.0	ARM Cortex-M4F
Tipus de processador	8-bits	32-bits	32-bits
Freqüència de processador	16 Mhz	84 Mhz	168 Mhz
Timers	2x8-bits, 4x16-bits	3x32-bits	10x32-bits
Memòria Flash	256 KB	512 KB	512KB - 1MB
Memòria RAM	8 KB	96 KB	192 KB
Resolució DAC	10-bits	12-bits	12-bits
Voltatge d'operació	5v	3.3v	5v
Corrent sense càrrega	40 mA	800 mA	44 mA
Pins analògics (In / Out)	16/0	12/2	8 ports de 16bits
Pins digitals (IO / PWM)	54/15	54/12	+ port de 12 bits
Preu de venda al públic	33€	37€	18€

Taula 7. Comparativa sobre característiques de MCU alternatius a Arduino Mega 2560

Com ja s'ha comentat amb anterioritat, el client va fixar una sèrie de requisits per al disseny del projecte, una d'aquestes era la realització de la solució utilitzant el *Arduino Mega 2560*. Tot i això, com s'ha mostrat anteriorment, al mercat es disposa d'un gran nombre de tecnologies força més potents en quant a capacitat de càlcul i de d'emmagatzematge d'informació i a uns preus molt similars al de la placa utilitzada, en ocasions inclús més competitives.

Per a un futur canvi de disseny del projecte de *OpenSpirulina*, es creu seria molt recomanable valorar la possibilitat de canvi de microcontrolador. Una bona alternativa seria el *STM32F407Discovery*, ja que proporciona un elevat nombre de pins GPIO, els convertidors de senyal analògica a digital amb una resolució de 12 bits, la qual cosa dota d'una major resolució en la conversió de la senyal (0-4095) o una major freqüència del rellotge de processador amb un consum quasi igual al Arduino Mega.

2.2. Estudi de mercat

Després de realitzar un anàlisi de mercat i demanar informació a *OpenSpirulina* sobre si tenen coneixement d'algun sistema similar de la competència que estigui orientat al mateix àmbit que el projecte el qual s'ha dissenyat. Finalment s'arriba a la conclusió de que actualment no hi ha cap comercialització de producte específic per al cultiu d'espíulina, però que si existeixen solucions similars que s'utilitzen per monitorar de l'aqüicultura³. Aquestes sistemes estan destinats a empreses dels sectors dedicats a la cria d'espècies aquàtiques vegetals i animals.

Un exemple seria la empresa YSI la qual disposa de sistema de boia que incorporen varius sensors que solen ser: *pH*, temperatura, *ORP*, i en ocasions també sensor per oxigen dissolt. Aquests sistemes es depositen sobre la superfície del fluid per anar realitzant lectures de forma periòdica i enviar les dades a una computadora centralitzada. En la següent figura es mostra un dels dispositius de la marca:



Il·lustració 7. Dispositiu boia de la marca YSI per el sector de l'aqüicultura

El problema d'aquests tipus de solució és l'elevat preu, que ronda entre els 5.000 i 10.000€, per a l'ús de cultiu d'espíulina en una empresa familiar (que és el mercat el qual inicialment està orientat *OpenSpirulina*).

³ Wikipedia [2019] - <https://es.wikipedia.org/wiki/Acuicultura>

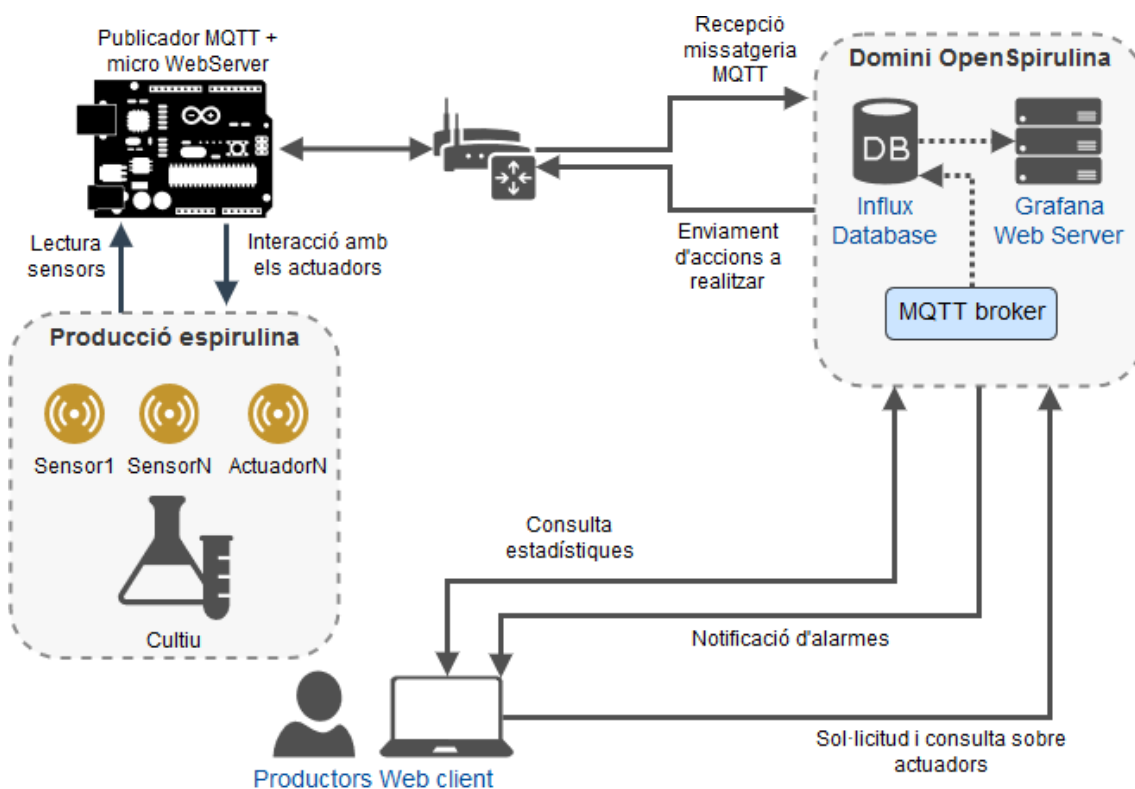
Tenint les dades tècniques del producte comercial que proporciona la empresa YSI, inicialment no es podria afegir cap funcionalitat més a la solució de *OpenSpirulina*. Ja que aquesta ja incorpora tots els sensors dels que disposa la competència i n'afegeix alguns més d'específics com els sensors de lux, humitat i temperatura ambiental, com també sensors de disseny propietari com és el de densitat òptica.

3. Descripció funcional

En aquest capítol es tractarà el disseny del sistema realitzar per al projecte, com també l'anàlisi de les decisions preses en cada un dels processos realitzats.

3.1. Sistema de monitorat i control de cultius d'espíulina

Tal com s'ha descrit breument amb anterioritat, la solució consta de tres parts ben diferenciades que formen el conjunt de la solució completa. Aquesta està basada en: una part del sistema allotjat en el microcontrolador a prop del cultiu a monitorat, d'altre en el sistema de comunicacions i notifikacions de les dades basat en protocol MQTT i, una tercera part en el sistema remot de servidors que unifica la presentació de les dades al usuari, així com també la lògica de notifikacions d'alarmes i execució d'accions remotes sobre els MCU dels cultius. En la següent figura es mostra l'esquema funcional del sistema de monitorat i control que es descriurà a continuació:



Il·lustració 8. Esquema funcional del sistema de monitorat i control

El funcionament del sistema és el següent:

Com a primer pas, l'usuari productor d'espírulina instal·la el MCU Arduino Mega amb els sensors i actuadors que es desitgen utilitzar en el cultiu que es vol controlar. Per tal de que el sistema del MCU tingui coneixement de quin són els sensors i actuadors connectats, l'usuari tindrà la possibilitat de configurar els paràmetres i comportament d'aquests en un fitxer de configuració allotjat en la targeta SD que pot incorporar el mòdul lector de targetes del sistema. Entre les els paràmetres de configuració es poden parametritzar, no tan sols les sensors i/o actuadors, sinó també paràmetres de comportament generals com: ús de pantalla *LCD* per notificació del sistema (lectures realitzades, estat del enviaments, temps restant per el pròxim cicle d'obtenció de dades, etc.), configuració de les interfícies *Ethernet* i *GRPS*, identificació del cultiu que s'està monitorant, activació del mòdul *RTC*⁴, connexió del broker *MQTT* o interval del cicles d'obtenció de dades.

Un cop el sistema del *MCU* estigui configurat i en funcionament, aquest realitzarà de forma periòdica (segons el temps configurat per l'usuari) cicles d'obtenció de les dades dels diferents sensors afegits al sistema, agrupant aquests per tipus i guardant les dades en memòria per poder enviar-les en la següent fase, la d'enviament.

Seguidament, en la fase de emmagatzemament de les dades, el dispositiu decidirà on s'han d'enviar. En funció de la parametrització que hagi realitzat l'usuari, aquestes podran ser bolcades a un fitxer de text de forma local sobre la targeta *SD* del *MCU* (per posteriorment poder ser llegides i realitzar exploració de dades o qualsevol altre tipus de tractament). Com també podran ser enviades al servidor remot de *Grafana* mitjançant protocol *MQTT* a través d'un broker intermedi el qual també estarà allotjat al mateix servidor remot de *Grafana*. El sistema suporta la possibilitat d'activació de les dos opcions de forma seqüència, fent bolcat a fitxer i enviament a servidor remot en cada cicle.

En el cas d'activar l'opció d'enviament de dades al servidor remot, el *MCU* configurarà en temps de càrrega d'inici un client *MQTT* en mode publicació el qual connectarà al broker remot per notificar la intenció d'enviament d'informació (anomenats "*topic*" en l'arquitectura *MQTT*), i posteriorment en cada cicle, notificar un nou missatge amb les dades rebudes dels diferents sensors. Posteriorment, un agent intern del sistema remot, s'encarrega de rebre les dades (mitjançant una subscripció als "*topic*" *MQTT* sobre el broker) per inserir aquestes directament a la base de dades *InfluxDB*.

En el moment en que les dades s'estan rebent en el servidor remot, l'usuari ja podrà accedir a la interfície web del portal de *Grafana* publicat per el servidor remot. Aquesta web ofereix a l'usuari múltiples possibilitats com: visualització de les dades rebudes en forma de gràfiques acotades

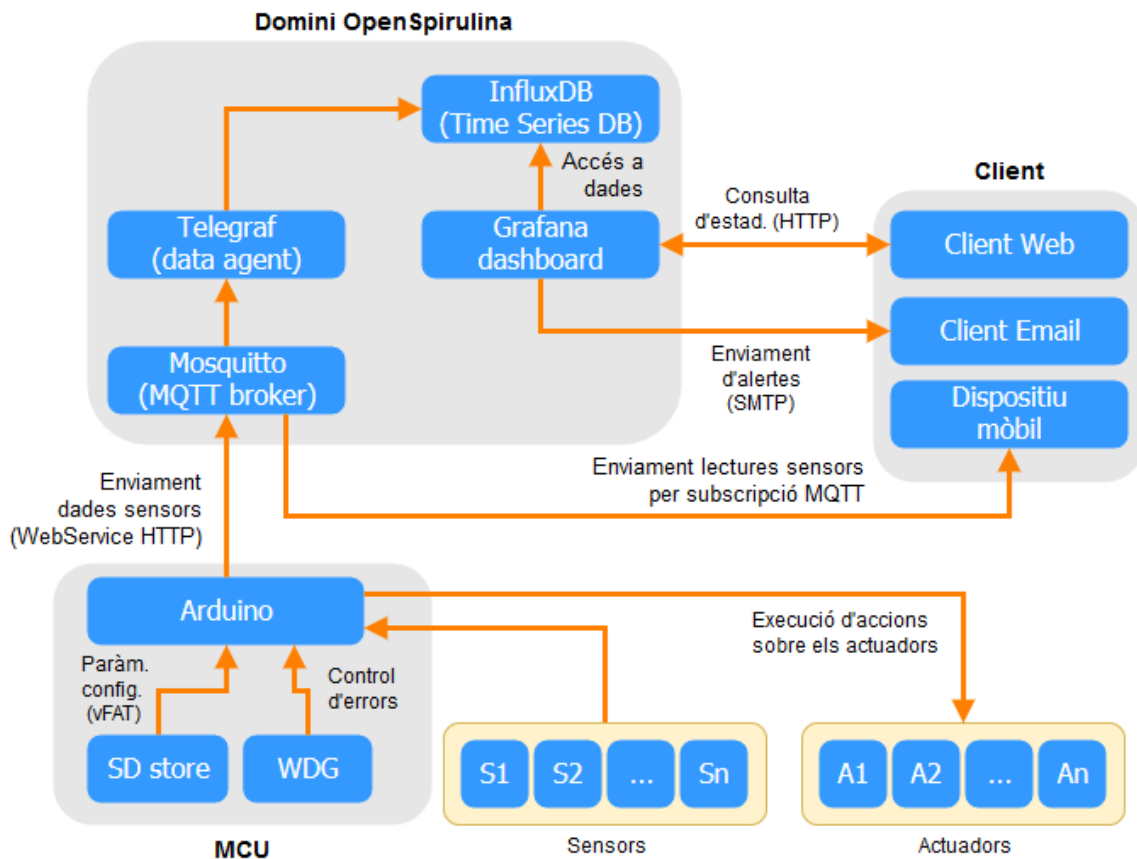
⁴ Wikipedia [desembre 2018] - https://ca.wikipedia.org/wiki/Relotge_de_temps_real

en franges temporal, control d'alarmes dels diferents canals de dades com poden ser temperatura ambiental, humitat, lluminositat, etc. dels sensors connectats en els cultius. Així, l'usuari podrà programar de forma personalitzada els avisos mitjançant correu electrònic (com també altres canals com missatgeria *Telegram*, Slack, etc.), de qualsevol informació rebuda, per ser notificat si un dels sensors realitza una lectura fora dels límits normalitzats per el cultiu. Per exemple, si la temperatura de l'aigua de la bassa sobrepassa els 28.7°C i aquest fet pot provocar la mort dels cianobacteris del cultiu i, en conseqüència, la pèrdua de la producció.

Finalment, altre interacció que l'usuari/productor pot realitzar sobre el cultiu és la possibilitat de interactuar amb els dispositius connectats al MCU, com poden ser: un focus transmissió de calor, sistema de refrigeració, apertura de finestres o teulada per afavorir la aclimatació externa o en general qualsevol dispositiu extern connectat a un relé que pugui contribuir a la millora de l'estar del cultiu. Aquestes interaccions, que consisteixen en activar o desactivar els diferents actuadors, les pot controlar l'usuari de dues formes:

- a) Mitjançant controls afegits al panell de Grafana, amb el qual es poden sol·licitar les accions a executar per a cada actuator de forma independent.
- b) Accedint al servidor Web que publica el *MCU* Arduino. Aquest mostrarà un llistat amb els actuadors presents en el sistema i l'estat de cada un d'ells. Des de la mateixa web l'usuari podrà interactuar amb aquests activant o desactivant segons la acció que es desitgi realitzar.

A continuació es mostra el següent esquema que dona una visió general del projecte i de la integració entre les diferents parts:



Il·lustració 9. Visió general sobre funcionament i interacció dels diferents sistemes

3.2. Sistema microcontrolador

Tot i que el conjunt de la solució es basa en una agrupació de sistemes que, no tan sols conté el MCU, sinó tant el broker que dona garantia en la transmissió i distribució de la missatgeria enviada per MQTT, com el sistema de visualització, exploració de dades i notificació d'alertes. Tot i així, gran part de la lògica i importància del projecte està allotjada en el microcontrolador. Aquest és el cervell de control del sistema situat a prop del cultiu, que vetlla executar de forma sistemàtica les accions determinades per l'usuari a fi de notificar les dades obtingudes cada cert temps.

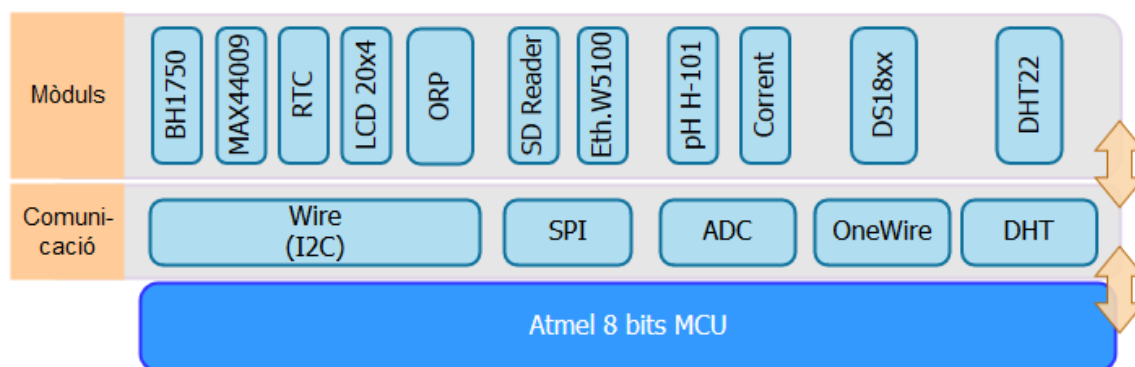
En el disseny de l'aplicació inicialment s'havia valorat aprofitar la solució inicial que proporcionava el client, però un anàlisi en profunditat del codi inicial mostrava que el disseny realitzat no era el apropiat d'una solució estructurada, clara i fàcil de mantenir (degut a que els programadors no són especialistes en el disseny d'aplicacions ni han cursat cap tipus de titulació relacionada amb l'enginyeria de software). Així doncs es decideix crear una nova aplicació completament des de zero, però tenint en compte totes les funcionalitats i característiques de les que disposa l'actual.

Per a la realització de la nova aplicació, es van tenir en compte tant els mòduls de Arduino que s'utilitzaven en l'anterior solució, com els nous que es volien afegir en aquesta nova. Amb un anàlisi dels requeriments i l'abast del projecte, es decideix el disseny de forma modular amb la utilització del paradigma de la programació orientada a objectes (a partir d'ara POO).

Amb les millores implementades en la aplicació del sistema microcontrolador es pretén aconseguir els següents beneficis:

- **Encapsulació:** Per tal de facilitar la reutilització de codi o funcionalitats d'altres mòduls.
- **Facilitat de comprensió del disseny:** Als usuaris que desitgin realitzar modificacions o reutilitzar la solució per adaptar-la a altres projectes.
- **Optimització de recursos:** S'aconsegueix reduir el consum de memòria SRAM, ja que amb la nova funció totalment funcional consumeix tan sols un 5% més de memòria. Els recursos necessaris es carreguen en temps d'execució en funció dels sensors que es requereixen.

A continuació es presenta el diagrama de blocs que representa la relació entre les diferents capes que interactuen en el funcionament de la solució proposada:



Il·lustració 10. Disseny per capes del mòduls que interactuen en la solució

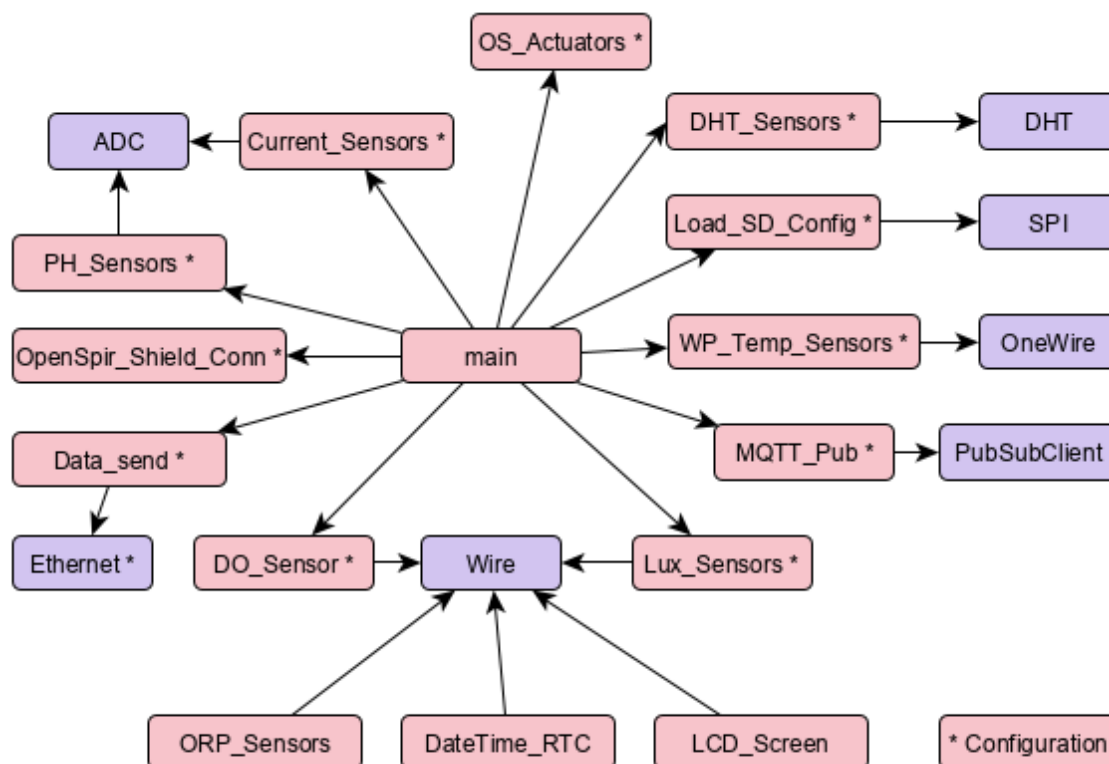
En el diagrama exposat es representen els següents blocs:

- **Wire:** S'encarrega de controlar la comunicació entre els diferents dispositius connectats al bus I2C. En la solució actual controlarà els sensors de lux, el mòdul de rellotge en temps real (RTC) i la pantalla LCD.

- **SPI:** S'encarrega de controlar la comunicació entre els diferents dispositius connectats al bus SPI. En la solució actual controlarà el mòdul lector de targetes SD i el mòdul de comunicacions via *Ethernet*.
- **ADC:** Té com a funció la lectura dels valors sobre els diferents canals analògics i realitzar la conversió d'analògic a digital en 10-bits de resolució. En el cas de Arduino Mega el voltatge de referència és de 5v, de tal forma que s'obté una resolució de
$$5V / 2^{10\text{bits}} = 0.0049V / u. = 4.9 \text{ mV} / u.$$
- **OneWire:** Controla tots els sensors de temperatura (en aquest d'aquest projecte s'utilitzen sensors de temperatura per líquids, model *DS18B20*) que requereixen de protocol *OneWire*. Aquestes connecten el seu canal de transmissió amb un mateix cable d'enviament i recepció de dades.
- **DHT:** S'encarrega de la comunicació amb els diferents sensors de tipus DHT mitjançant protocol propietari (anomenat també DHT).

3.2.1. Diagrama de blocs

Per tal de facilitar la comprensió de l'aplicació, es proporciona l'esquema del disseny de software amb el que es poden observar la relació entre els diferents llibreries i mòduls funcionals de la solució. En la següent figura es mostra la relació:



Il·lustració 11. Esquema de disseny de software

Els blocs amb asterisc (*) indiquen l'ús del bloc de configuració, el qual unifica tota la parametrització per defecte del funcionament del microcontrolador.

A continuació es descriuen de forma cada bloc:

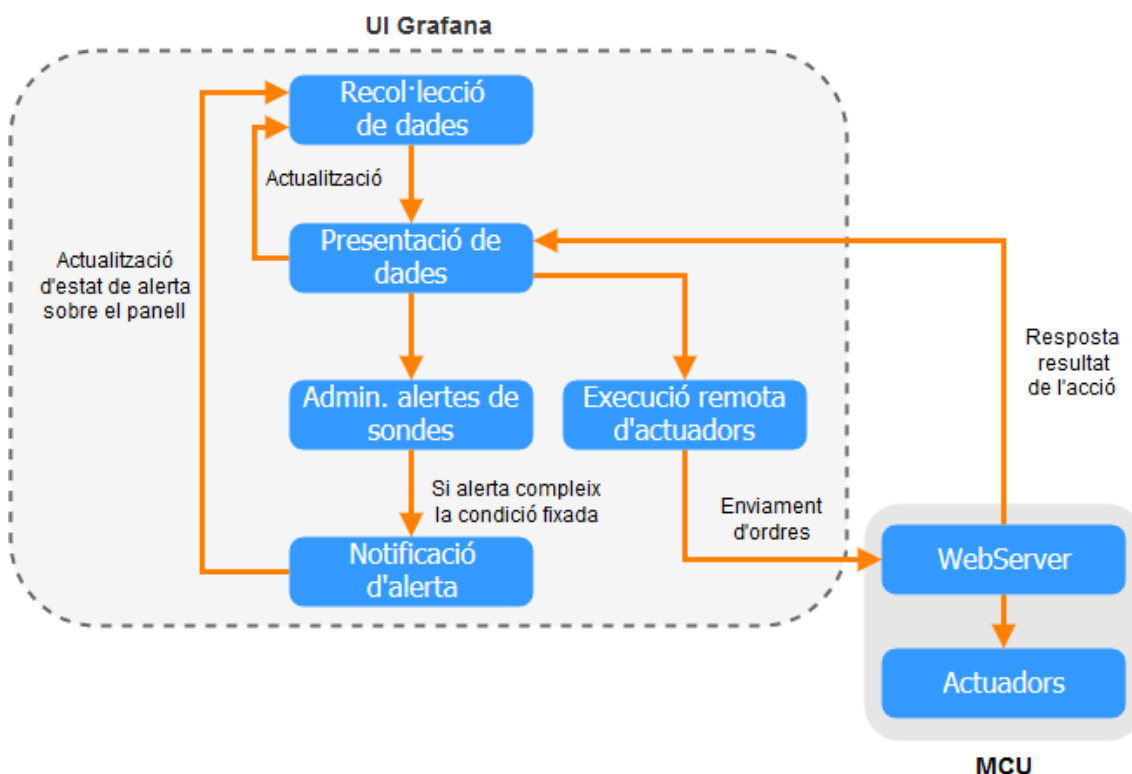
- **Current_Sensors:** Unifica la càrrega i obtenció de dades dels sensors de tipus “ACS712” (de tipus invasiu) i “SCT013” de tipus no invasiu mitjançant lectura de port analògic (ADC).
- **PH_Sensors:** Control del sensors de tipus *pH* mitjançant protocol *I2C*. Suporta el model “H-101” de la marca HAOSHI.
- **DHT_Sensors:** Unifica la càrrega i obtenció de dades dels sensors *DHT* per a temperatura ambiental i humitat ambiental. Suporta els models “DHT11”, “DHT22” i “DHT21”.

- **WP_Temp_Sensors:** Encarregat de la càrrega i control dels sensors de temperatures de líquids model “DS18B20”.
- **Lux_Sensors:** Unifica la càrrega i obtenció de dades dels sensors de lux. Suporta tan el model “BH1750” com el “MAX44009”.
- **DO_Sensor:** Control de lectura i obtenció de dades del sensor propietari dissenyat per el client *OpenSpirulina*. Aquest sensor està basat en el sensor de lux BH1750.
- **ORP_Sensors:** Control de lectura de sensors de *ORP* mitjançant protocol *I2C*. Els sensors poden ser configurats prèviament amb diferents adreces *I2C*, de tal forma que el sistema pot suportar varies unitats simultàniament.
- **DateTime_RTC:** Control i obtenció de data i hora actuals, com també funcionalitats addicionals relacionades amb el càlcul de diferencials de temps.
- **LCD_Screen:** Controla l'accés a la pantalla LCD per presentar a l'usuari dades informatives sobre l'estat en temps real del sistema.
- **OpenSpir_Shield_Conn:** Capa d'abstracció sobre les connexions de l'escut dissenyat per *OpenSpirulina*. La seva funció és facilitar a l'usuari la especificació dels connectors d'aquest escut.
- **Data_send:** Encarregada de l'enviament de dades mitjançant interfícies *Ethernet* o *GPRS*.
- **MQTT_Pub:** Capa encarregada de la publicació de missatgeria sobre protocol *MQTT* fins al broker remot.
- **OS_Actuators:** Càrrega i control del diferents actuadors afegits al sistema.
- **Load_SD_Config:** Comporta la lògica de càrrega de paràmetres, tant dels sensors com del sistema en general, mitjançant fitxer de configuració allotjat en la targeta SD.
- **Configuration:** Unificació dels paràmetres per defecte de control i comportament del sistema.
- **main:** Control principal del sistema i l'execució seqüencial dels diferents blocs que el componen.

3.3. Sistema Web de visualització de dades i control remot d'actuadors

La interfície principal d'usuari està basada en la solució de *Grafana* de codi obert i totalment gratuïta. La interfície tracta de donar solució a totes les necessitats que es plantegen com a requeriment d'usuari per part del client. Aquesta, s'encarrega de mostrar les dades al usuari per tal de que aquest pugui interactuar amb el sistema, ja sigui: visualitzant les dades obtingudes en forma de gràfiques dinàmiques; configurant notificacions d'alarmes o avisos en front a cert esdeveniment com poden ser alteracions en el límits preestablerts en el sensors dels cultius; o bé interactuant amb el dispositius remots en forma d'actuadors.

A continuació es mostra l'esquema de blocs que representa les funcionalitats que proporciona i les accions que el sistema exerceix:



Il·lustració 12. Esquema funcional del sistema Web

Els blocs que intervenen són els següents:

- **Recol·lecció de dades:** Encarregar d'obtenir les dades allotjades en el sistema gestor de base de dades (a partir d'ara SGBD) per posteriorment facilitar-les a agent de presentació de dades.
- **Presentació de dades:** Encarregat de rebre les dades i presentar-les en la interfície d'usuari segons els criteris desitjats.
- **Control de l'alertes:** Supervisa si es compleix qualsevol dels criteris especificats com a crítics en forma d'alerta. En cas de complir-se alguna, ho notificarà a l'agent de notificacions d'alertes.
- **Notificador d'alertes:** Encarregat d'enviar les alertes rebudes sobre el canal configurat, en el cas pràctic de la solució es notifica per defecte per correu electrònic.

- **Notificador d'accions remotes:** Aquest serà l'encarregat de sol·licitar una acció de sobre un actuator concret que es trobi configurat a microcontrolador i rebre la resposta per presentar-la a l'usuari.

El disseny del panell principal unifica tant la part de representació de dades obtingudes dels diferents sensors actius en el sistema recol·lector (MCU), com el controls del actuadors remots que es desitgin controlar remotament enviant ordres d'activació (ON) o desactivació (OFF). En la il·lustració següent es un exemple de l'entorn d'usuari en que es poden observar dues parts diferenciades: una en la representació de les gràfiques (marcat amb el número 1) i d'altre amb el controls d'actuació remots (marcat amb el número 2):



Il·lustració 13. Exemple de panell Grafana que agrupa gràfiques i actuadors remots

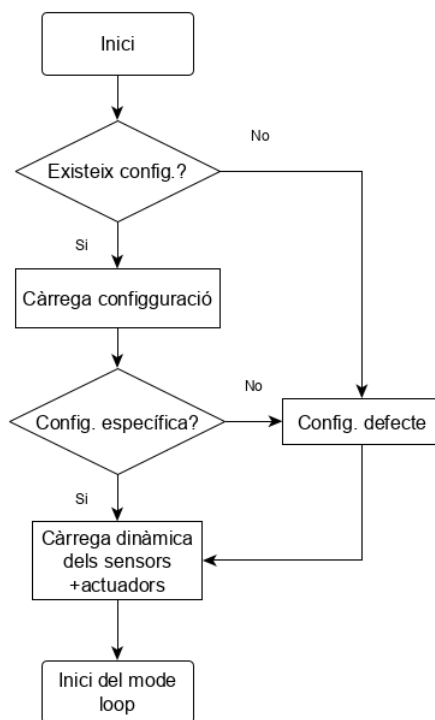
4. Descripció detallada

En aquest capítol es pretén descriure de forma tècnica i detallada el disseny i funcionament de la solució. El procés es detallarà en diferents apartats, tenint en compte tres parts diferenciades conceptualment: una el sistema del MCU; altre, el sistema web de visualització de dades i control d'alertes; i finalment, el sistema de comunicació i distribució de missatgeria MQTT (que es pot considerar com un *Middleware* entre els dos sistemes anteriors).

4.1. Sistema del microcontrolador

4.1.1. Procediment d'inici

Tal com s'ha descrit en l'apartat anterior, el sistema del MCU contempla la possibilitat de configuració del comportament general així com dels sensors i actuadors del sistema. Per obtenir una idea més concreta del procediment d'inici i execució d'aquest, a continuació es mostra el diagrama de flux que descriu el procés d'inici:



Taula 8. Diagrama de flux d'inici del MCU

Com es pot observar en el diagrama anterior, els criteris d'inici que segueix el MCU in cop arrenca és el de validar si hi ha accessible la targeta SD i en cas afirmatiu revisa si existeix l'arxiu de

configuració anomenat "*config.ini*". En cas afirmatiu iniciarà un procés de càrrega de la configuració específica del usuari, revisant si hi ha alguna disponible per cada un dels paràmetres suportats del sistema.

4.1.2. Fitxer de configuració

El format que utilitza l'arxiu de configuració és el format INI que, tot i que no és un estàndard, s'ha convertit en un format força estès tant en l'àmbit de Microsoft Windows com en el món GNU/Linux.

Els elements que poden trobar-se al fitxer de configuració són els següents:

- **Seccions:** Comencen amb una línia que conté una declaració de secció amb un nom de secció entre claus rectangulars com ara [secció1].
- **Paràmetres:** Consisteixen en una línia dins la secció amb un nom, anomenat clau, un signe igual "=" i un text fins a final de línia que expressa el valor del paràmetre.
- **Comentari:** Les línies que comencen amb punt i coma, es consideren comentaris i el seu contingut és ignorat a efectes de dades. També es pot utilitzar coixinet "#" com a inici de comentari.

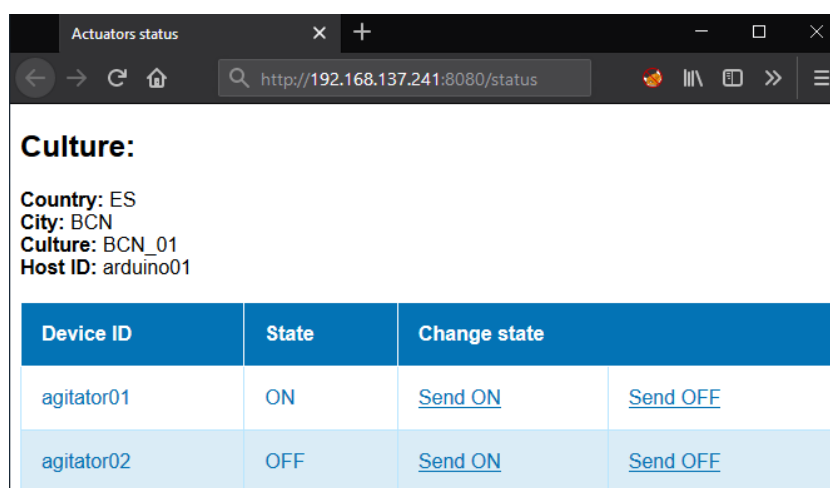
A continuació es detallen les seccions suportades en el fitxer de configuració i una molt breu descripció del seu ús:

- **culture:** Identificació del cultiu on s'instal·la el sistema de control.
- **net:** Configuració de xarxa per l'enviament de dades al broker remot MQTT.
- **rpt:MQTT:** Identificació del broker remot MQTT.
- **debug:** Activació/desactivació del mode de depuració per port UART.
- **LCD:** Activació/desactivació de la pantalla LCD.
- **RTC:** Activació/desactivació del mòdul RTC (rellotge).
- **SD_card:** Activació/desactivació del bolcat en fitxer de les dades recollides.
- **sensors:DHT:** On "XXX" pot ser ["DHT", "lux", "DO", "pH", "ORP", "wp_temp", "corrent"]. Configuració de la càrrega dinàmica dels sensors específics.
- **actuators:** Configuració de la càrrega dinàmica dels actuadors.

4.1.3.Servidor Web

El sistema microcontrolador implementar un servidor web el qual presenta dos serveis que donen la possibilitat de interactuar amb el actuadors de forma remota. Els serveis que es presenten son el següents:

“/status”: Presenta una interfície Web bàsica on es mostren les dades del cultiu i el actuadors que han estat carregats en el sistema durant el procés d’inici. A més, l’usuari que accedeix a la web pot activar o desactivar qualsevol dels actuadors amb ajuda de botons que executen l’acció desitjada. A continuació es mostra un exemple de la interfície web.



Il·lustració 14. Interfície Web de control d'actuadors del MCU

“/action”: Presenta un Webservice senzill en que pot rebre peticions HTTP amb mètode GET per tal de realitzar accions concretes sobre els actuadors activats en el sistema. El format de petició HTTP GET que suporta el servidor es descriu a continuació:

Format:

http://{IP_MCU}/action?{ACTUATOR}={ACTION}

<i>IP_MCU</i>	Indica la direcció IP d'accés al microcontrolador.
<i>ACTUATOR</i>	Indica el identificador del actuator que es carrega al sistema. Cada actuator al ser afegit al sistema durant el procés d'inici se li assigna un ID per posteriorment ser utilitzat per identificar-ho.

ACTION	Acció a executar sobre el actuador. Aquestes accions poden ser: "ON" per activar el actuador, "OFF" per desactivar-ho, "SWITCH" per intercanviar l'estat.
--------	---

Taula 9. Estructura del Webservice de peticions d'actuadors

Per tal d'atendre les possibles peticions web, el servidor ha de estar validant de forma constant si ha arribat alguna connexió al socket d'escolta del servidor. Per dur a terme aquesta tasca, s'ha implementat una funció (anomenada "WebServer_check_petition") que és executada en durant el procés d'obtenció de dades dels sensors (després de la lectura de cada tipus de sensors) i durant el procés d'espera d'un cicle de lectura.

4.1.4. Publicador de missatgeria MQTT

Un dels punts més importants i innovadors de la solució és la implementació del protocol MQTT per a la transmissió de les dades obtingudes dels sensors fins al servidor remot. Els motius per els que s'ha decidit implementar aquest tipus de protocol son els següents:

- El protocol està dissenyat per a IoT, consumint relativament pocs recursos en el MCU.
- És un protocol rebost que suporta nivells de qualitat del servei en l'enviament de missatgeria.
- És fàcilment adaptable per afegir altres dades d'enviament.
- Les dades poden ser rebudes per altres subscriptors a més del servidor remot. D'aquesta forma un usuari es pot subscriure a temes concrets per estar informat de les lectures obtingudes al mateix temps que es reben a altres punts.

El format en que un publicador MQTT ha de notificar un missatge al broker és el següent:

Format:

"{MCU_ID}/sensors" "PAYLOAD"

<i>MCU_ID</i>	Identifica al microcontrolador de forma única en els cultius
<i>PAYLOAD</i>	Es tracta de la cadena de dades amb els resultats de les lectures realitzades sobre els sensors carregats al sistema

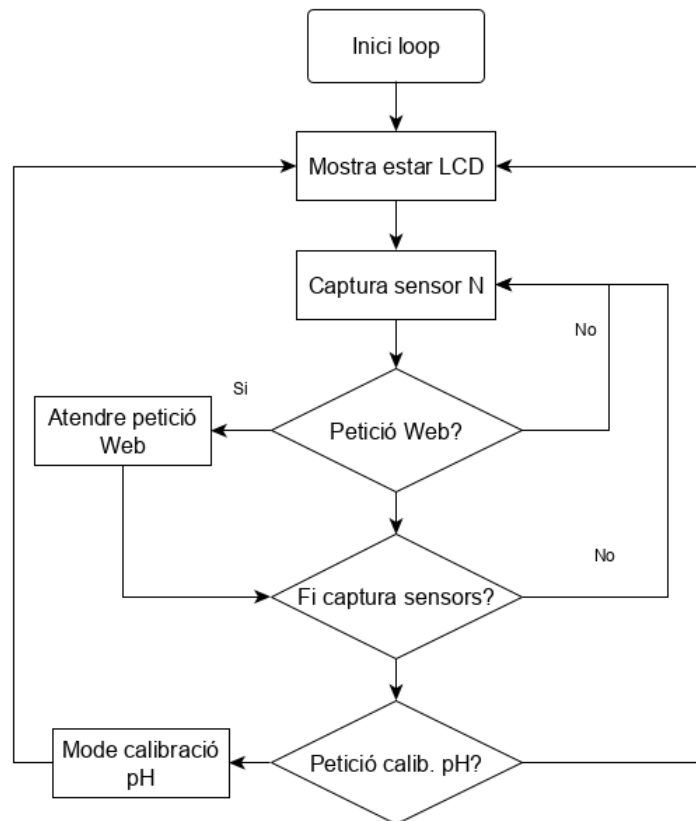
Taula 10. Descripció de l'estructura del missatge MQTT

Exemple:

arduino01/sensors wp1_s=19.2,t1=18.3,t2=21.8,...

4.1.5. Procediment cíclic de monitorat i control

A continuació es representa el diagrama de flux que segueix l'execució del MCU un cop s'ha iniciat el sistema:



Il·lustració 15. Diagrama de flux del procediment cíclic de monitorat

Com es pot observar en la il·lustració anterior, durant el procediment cíclic de monitorat (execució de la funció "loop" del codi, de forma infinita), es realitza un control tant de les possibles peticions Web que puguin ser realitzades, com de l'activació del mode de calibrat.

4.2. Sistema Web de visualització de dades

Per tal de que la base de dades *InflubDB* rebí les dades enviades des de els diferents sensors, un agent anomenat *Telegraf* (revisar il·lustració 8 de la secció 3.1) és l'encarregat de subscriure's al tema (tòpic) de MQTT amb el qual pot rebre totes les notificacions enviades per qualsevol MCU

de qualsevol cultiu. Per tal de fer possible aquest tipus de subscripció, s'ha configurat l'agent *Telegraf* per connectar al broker MQTT i subscriure's al tema "+/sensors/#".

En la notació de missatgeria MQTT, quan un subscriptor sol·licita registrar-se a un tema ho pot fer sobre identificador de tema concret, tipus "arduinoXX/sensors/lux01" o amb utilització de comodins, per exemple "+/sensors/#". On:

- "+": Indica que es vol subscriure a les notificacions de qualsevol MCU de qualsevol cultiu.
- "#": Indica que es vol rebre totes les notificacions dels sensors publicades qualsevol MCU.

Cada cop que el agent rep una notificació del broker amb dades de mesures, aquest s'encarrega de realitzar una connexió a la base de dades per inserir-les. El format que s'utilitza per a informar les dades a introduir està estandarditzat per *InfluxDB* com a format protocol de línia (*Line Protocol*). El format és el que es presenta a continuació:

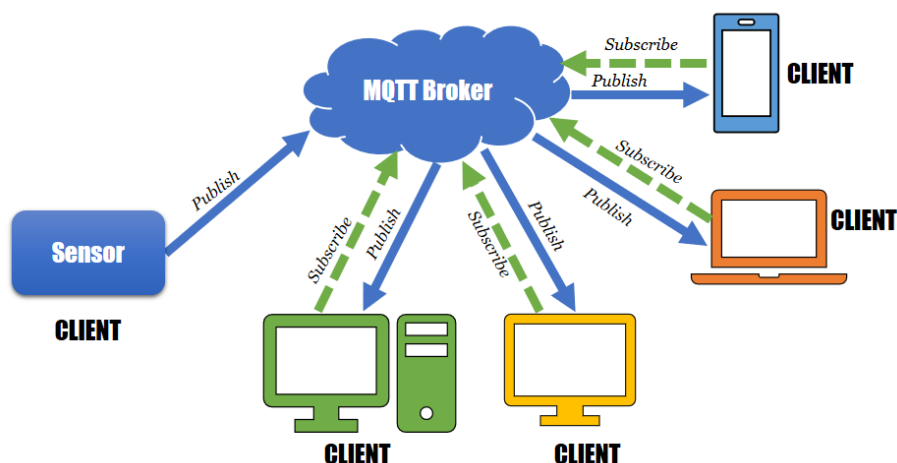
|measurement|,tag_set| |field_set| |timestamp|

<i>measurement</i>	Indica la taula on seran inserides les dades.
<i>tag_set</i>	Indica les dades d'identificació del cultiu (com ID del MCU, país, ciutat, ..), separat per comes.
<i>field_set</i>	Valors dels diferents sensors, separats per comes.
<i>timestamp</i>	Timestamp del sistema en format Epoch de Unix. En el cas de la solució implementada no s'envia ja que el propi sistema Influx afegeix la data al inserir el missatge.

Taula 11. Descripció de la estructura de dades *InfluxDB*

4.3. Broker MQTT

Tot i que el broker està situat al mateix servidor que la base de dades i servei Grafana, aquest exerceix una tasca independent al altres. Aquesta tasca consisteix en la responsabilitat de rebre la missatgeria provinent dels publicadors MQTT i garantir que arriba al seus destinatària, no no son altres que els subscriptors.



Il·lustració 16. Esquema comunicació entre publicadors i subscriptors

A l'anterior il·lustració es pot observar com un publicador pot notificar un missatge amb un topic (tema) concret i el broker s'encarrega de notificar aquest a tots els subscriptors que s'han registrat en aquest topic concret.

Aquest exemple reflexa la flexibilitat de la solució comentada anteriorment, ja que no tan sols el servidor Grafana pot rebre les notificacions dels sensors dels cultius, sinó que altres usuaris amb qualsevol dispositiu mòbil pot subscriure's al canal per poder rebre tots els missatges emesos per en un topic.

4.4. Esquemàtic del hardware

Tal com s'ha descrit breument en apartats anteriors el client estableix una sèrie de requeriments inicials per al projecte, entre aquests s'especifica el model del microcontrolador a utilitzar, que en aquest cas és un *Arduino Mega 2560*. Aquest requeriment inicial be donat per la necessitat de poder seguir utilitzant un escut (shield) per aquest tipus concret de placa, el qual ha dissenyat el client amb ajuda de uns tercers col·laboradors en altre projecte.

El escut que es proporciona *OpenSpirulina* està dissenyat per facilitar la connexió de sensors, gràcies a diferents tipus de connectors soldats a la placa. A continuació es descriuen els tipus de connectors utilitzats:

- **Connector mascle polaritzat de 3 pins:** Tipus de connector utilitzat per a la connexió dels sensors que utilitzen senyal analògica. Connectors definits a la placa com J1-J6.



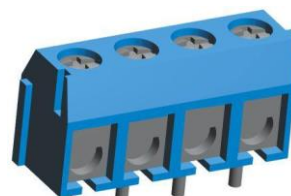
Il·lustració 17. Connector mascle de 3 pins polaritzat



- **Connector mascle polaritzat de 4 pins:** Connector utilitzat per a la connexió de la pantalla LCD on s'utilitza connexió de bus del tipus I2C.

Il·lustració 18. Connector mascle de 4 pins polaritzat

- **Terminal block PCB de 4 pins:** Connector de terminal amb cargols de rosca. Utilitzat per a la connexió de dispositius de tipus I2C addicionals que es requereixin afegir al sistema. En el cas de les proves realitzades, s'ha utilitzat per connectar el sensor ORP.



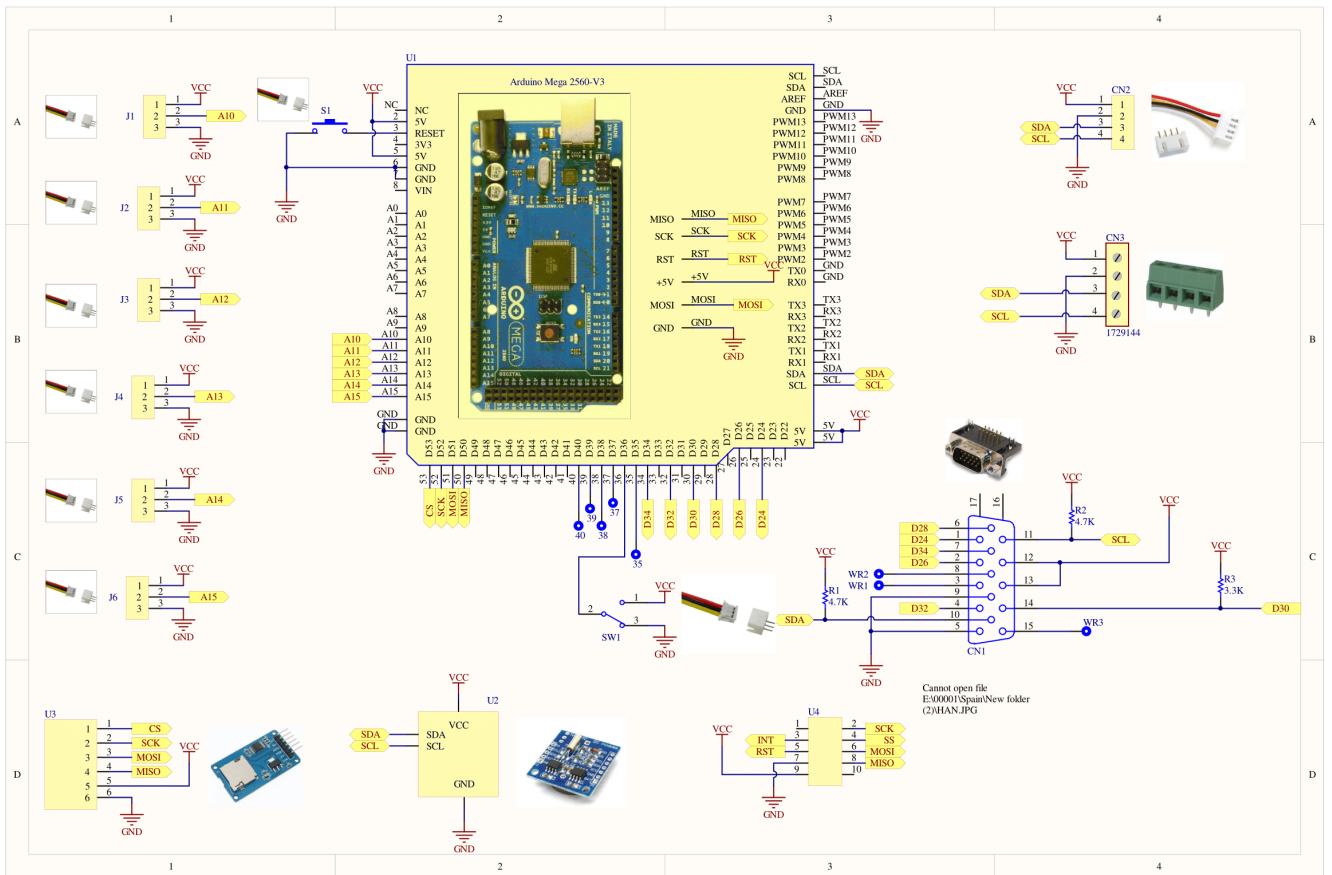
Il·lustració 19. Terminal block de 4 pins

- **Connector VGA PCB mascle:** Aquest tipus de connexió s'utilitza per unificar un conjunt de sensors externs a la caixa que protegeix el microcontrolador de possibles excessos d'humitat, esquitxades d'aigua, etc.

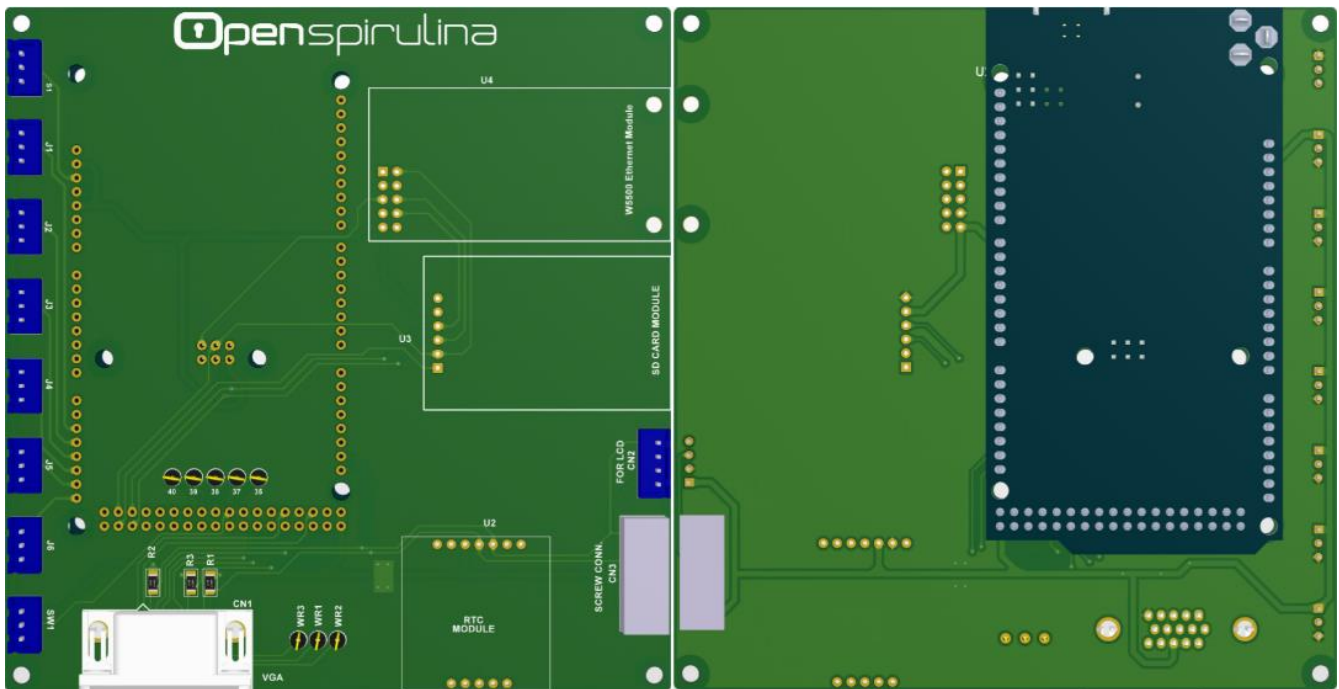


Il·lustració 20. Connector VGA mascle

A continuació es representa l'esquema elèctric juntament amb les interconnexions dels diferents mòduls que interactuen amb el microcontrolador Arduino Mega 2560:



Il·lustració 21. Escut (Shield) per Arduino Mega dissenyat per OpenSpirulina



Il·lustració 22. PCB escut dissenyat per OpenSpirulina

Durant el prototipat del projecte s'han utilitzat una sèrie de sensors de de diferents tipus per tal de validar el correcte funcionament del sistema en un entorn el més similar possible a un entorn productiu. A continuació es mostra una relació dels sensors utilitzats, juntament amb les seves característiques principal i la connexió utilitzada per a la realització de les proves:

Tipus	Marca	Model	Connector escut	Connexió
Sensors ja incorporats				
pH	HAOSHI	H-101	J1	Analògic
Lux	--	BH1750	VGA (pin7)	I2C
Temp. + humitat	--	DHT22	VGA (pin4)	DHT
Temp. líquids	Maxim Integrated	DS18B20	VGA (pin14)	OneWire
Temp. líquids				
Temp. líquids				
Temp. líquids				
Densitat Òptica	Propietari OpenSpirulina	BH1750	Red LED – VGA (pin 1) Green LED – VGA (pin 6) Blue LED – VGA (pin 2)	I2C
Nous sensors connectats				
Lux	HATOLY	MAX44009	J3	I2C
ORP	AtlasScientific EZO	ORP Probe	Tx/Rx	I2C
Corrent (Intensitat)	DF Robot	SCT-013	J4	Analògic
Corrent (Intensitat)	DF Robot	SCT-013	J5	Analògic

Taula 12. Relació de dispositius connectats a l'escut

5. Especificacions i característiques dels sensors

En aquest capítol es pretén donar cabuda als aspectes especialment no directes del projecte, però que fan prou importants la seva raó de fer-ho possible, que son els sensors per l'obtenció de dades.

Per tal de donar el màxim de flexibilitat a la solució presentada s'han afegit tots els sensors necessaris per controlar els aspectes més importants (i a la vegada crítics) del cultiu d'espíulina. A continuació es descriu el catàleg de sensors suportats per la nova solució, segons la funció que desenvolupen.

5.1. Sensors d'obtenció de dades de l'ambient

5.1.1. Sensor Temperatura i humitat (DHT22)

El sensor DHT22 llegeix els valors de temperatura i humitat de l'ambient. Habitualment s'ubica un sensor dins l'hivernacle.

<i>Voltatge operatiu</i>	3.5V fins 5.5V
<i>Corrent d'operació</i>	0.3mA (mesurant), 60uA (en repòs)
<i>Accés</i>	Dades en sèrie (protocol DHT)
<i>Rang de temp.</i>	0°C fins 50°C
<i>Rang d'humitat</i>	0% fins 100%
<i>Resolució</i>	Temperatura i humitat a 16-bits
<i>Precisió</i>	±0.5°C and ±1%



Il·lustració 23. Sensor DHT22 de temperatura i humitat

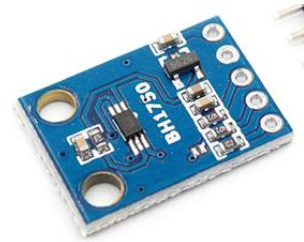
5.1.2. Sensors d'irradiància

La irradiància es un factor clau per calcular la velocitat de fotosíntesis, així com la fotòlisis (trencament de cèl·lules per excés d'il·luminació) o definició de l'agitació de la bassa per tal d'evitar la fotí inhibició (reducció de la velocitat de fotosíntesis a causa d'un excés de llum. Per tal d'obtenir aquest valor s'han utilitzat:

- **Sensor BH1750:**

S'ha utilitzat fins al moment, i dona bons resultats. Les desavantatges de l'ús d'aquest sensor és que el rang de mesura sols és fins a 65.535 lux (inferior a la màxima que dona el Sol que pot estar situat al voltant del 120.000 lux). També ens trobem amb l'inconvenient de que només hi ha dos adreces disponibles per cada màquina, i com aquest sensor també s'utilitzarà pel càlcul de la concentració de biomassa, està quedant en desús.

<i>Voltatge operatiu</i>	3V fins 5V
<i>Corrent d'operació</i>	Entre 120 i 190 μ A
<i>Accés</i>	Protocol I2C
<i>Rang de lectura</i>	1 fins 65535 lux
<i>Precisió</i>	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ fins $\pm 4\%$



Il·lustració 24. Sensor de lux model BH1750

- **Sensor MAX44009:**

La resposta espectral del xip fotodiode està optimitzada per a imitar la percepció de l'ull humà de la llum ambiental i incorpora la capacitat de bloqueig anar i UV. El bloc de guany adaptatiu selecciona automàticament la gamma de lux correcta per a optimitzar les lectures. Es planteja que en un futur aquest sensor substitueixi al model BH1750.

<i>Voltatge operatiu</i>	1.7V fins 3.6V
<i>Corrent d'operació</i>	0.65 en funcionament μ A
<i>Accés</i>	Protocol I2C
<i>Rang de lectura</i>	0.045 fins 188000 lux
<i>Rang de temp.</i>	-40°C fins 85°C
<i>Precisió</i>	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ fins $\pm 4\%$



Il·lustració 25. Sensor de lux model MAX44009

5.1.3. Sensor d'obtenció de dades dels cultius

- **Sondes de temperatura DA18B20**

Cada bassa incorpora dues sondes de temperatura submergibles. Una d'aquestes sondes s'ubica a la superfície de la bassa, submergida escassament 1 o 2 centímetres i l'altra s'ubica al fons de la bassa.

Amb les dues sondes s'obté dos valors importants:

Temperatura mitjana de la bassa: fruit de calcular la mitjana aritmètica dels dos valors de la sonda.

Gradient tèrmic: de la diferència dels dos valors de les sondes. Aquest valor mostra una idea de la qualitat de la mescla dins la pròpia bassa, ja que un gradient tèrmic elevat és fruit d'una mala mescla més una irradiància elevada, que fa augmentar la temperatura de la bassa des de la seva superfície.

<i>Voltatge operatiu</i>	3V fins 5V
--------------------------	------------

Corrent d'operació	1mA en funcionament
Accés	Protocol 1-Wire
Rang de lectura	-55°C fins +125°C
Precisió	±0.5°C fins ±4%



Il·lustració 26. Sensor de temperatura per a líquids

- **Sensor de pH**

El sensor de pH mostra els valors de pH del medi de cultiu. S'utilitza el sensor de la casa DfRobot. Aquest sensor s'ha de calibrar cada cert interval de temps (entre 15 dies i 2 mesos). Per fer-ho, el microcontrolador disposa d'un polsador connectat a l'escut de *OpenSpirulina* que al accionar-ho es deté el cicle de lectura de sensors per entrar en mode calibratge.

Voltatge operatiu	5V
Corrent d'operació	10 mA
Temp. operativa	0°C fins 60°C
Accés	Lectura analògica
Rang de lectura	0 fins 14 pH
Precisió	±0.1 pH (a 25°C)



Il·lustració 27. Sensor de pH

- **Sensor ORP**

El sensor de ORP mostra els potencial REDOX del medi de cultiu. S'utilitza el sensor de la casa Atlas-scientific (enllaç).

El potencial REDOX dóna una idea de la velocitat de reaccions químiques que estan havent al cultiu. Amb aquest valor, indirectament es pot mesurar la qualitat de la fotosíntesi. S'ha observat que quan el cultiu surt de la fase exponencial aquest valor canvia ràpidament tot i no observar-se variacions en el cultiu amb l'ull humà. Al igual que el sensor de pH, aquest s'ha de calibrar cada cert interval de temps (entre 15 dies i 2 mesos).

Voltatge operatiu	5V
Corrent d'operació	25mA en func., 5mA en repòs
Temp. operativa	1°C fins 80°C
Accés	Protocol I2C
Rang de lectura	±2000mV
Precisió	±1mV



Il·lustració 28. Sensor de ORP

- **Pinça amperimètrica**

L'agitació és un element clau del cultiu d'espíulina. Si per qualsevol causa externa l'agitació deixa de funcionar pot propiciar la mort del cultiu, ja que la espíulina pot estar poques hores sense agitació quan hi ha una forta irradiància exterior.

Per tal d'obtenir la lectura si hi ha agitació o no s'instal·la un pinça amperimètrica capaç de llegir quants ampers estan circulant pel cable elèctrica que alimenta el motor que agita la bassa.

Habitualment cada bassa té un únic motor, tot i que ara s'estan desenvolupant nous models amb varis motors per màquina. Aquests motors poden ser monofàsics o trifàsics. En qualsevol cas la pinça només agafa un únic cable.

<i>Voltatge operatiu</i>	3.3V fins 5.5V
<i>Corrent d'operació</i>	25mA en func., 5mA en repòs
<i>Temp. operativa</i>	-25°C fins 70°C
<i>Accés</i>	Lectura analògica
<i>Rang de lectura</i>	0A fins 20A
<i>Precisió</i>	±100mA

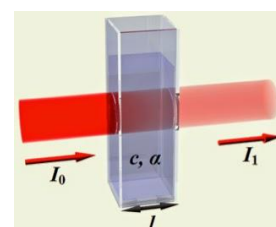


Il·lustració 29. Sensor amperímetre

- **Sensor propietari de densitat òptica (DO)**

El sensor de densitat òptica mesura la irradiància que rep un sensor de lux model BH1750 quan hi ha una feix de llum que s'emeta a través d'un díode (LED RGB).

Aquest feix de llum travessa una distància coneguda del cultiu i a través del mateix principi de funcionament que un espectrofotòmetre es pot obtenir la densitat òptica. Posteriorment a través de la densitat òptica es pot obtenir la concentració d'espíulina de la bassa.



Il·lustració 30. Sensor DO

Les especificacions tècniques son similars a la del sensor de lux BH1750 ja que aquest sensor propietari es basa en l'anteriorment especificat.

6. Viabilitat tècnica

Segons s'ha manifestat des de l'empresa OpenSpirulina, un dels requeriments inicials és el de continuar el projecte amb la utilització d'una placa de codi obert Arduino. En aquest aspecte ens trobem amb l'avantatge en que aquest dispositiu disposa d'una gran plataforma de suport en les xarxes, així com llibreries de control de ben be qualsevol dispositiu existent per Arduino. L'empresa interessada ens proporciona tot el material HW necessari per a complir els objectius fixats, inicialment no es requerirà d'altre HW addicional.

D'altre banda, les prestacions d'aquest tipus de placa (com ara la memòria, la velocitat de còmput, el nombre d'interrupcions de les quals es disposa) son en alguns casos escassos, segons quin model s'utilitzi. Actualment existeixen al mercat altres microcontroladors més moderns i amb més capacitat de càlcul, així com també poden incorporar implementacions de xarxa al mateix xip com podria ser el cas dels ESP8266, ESP32 o qualsevol de les alternatives valorades al apartat 2.1 d'estat de l'art.

6.1. Punts forts

Com a punts forts del sistema que s'ha desenvolupat es poden considerar els següents:

- Baix cost del material necessari si tenim en compte el preu que consta la alternativa comercial més similar a aquest projecte (revisar apartat 2.2 – estudi de mercat).
- Gran capacitat de configuració i ampliació de la solució.
- Facilitat d'adquisició i substitució en components defectuosos.
- Ús d'un model de MCU àmpliament reconegut en la comunitat d'Internet. Es pot tenir molt suport en front a problemes en implementacions o integracions de mòduls i/o sensors concrets.
- Projecte fàcilment adaptable a altres àmbits que requereixin d'un sistema de sondes remotes per al seu monitorat i control.

6.2. Punts dèbils

En contrapartida, també es d'un cert nombre de punts dèbils que cal tenir en compte, es descriuen a continuació:

- Sistema de MCU utilitzat poc potent i versàtil.
- Presentació final del producte MCU poc atractiva ja que la caixa protectora és genèrica. Es podria millorar dissenyant una caixa especialment per aquest assemblat de MCU + escut per millorar la afegit atractiu comercial i robustesa.

6.3. Anàlisi de riscos

- **Risc Funcional:**

Alguna de les llibreries Arduino utilitzades no proporcionen la funcionalitat requerida.

[Risc baix]

- **Acció preventiva:**
Realitzar proves unitàries dels diferents mòduls.
- **Acció correctiva:**
Cerca de noves alternatives de les llibreries requerides.

- **Risc tècnic:**

El mòdul *Ethernet* no gestiona correctament les peticions entrants per l'execució dels actuadors.

[Risc mig]

- **Acció preventiva:**
Realitzar prova aïllada del mòdul fent-lo funcionar com sols servidor.
- **Acció correctiva:**
Valorar metodologia alternativa per a la comunicació dels actuadors.

- **Risc tècnic:**

MCU no obté senyal de lectura del mòdul sensor o controlador de dades (Ethernet, SD, LCD, etc.).

[Risc alt]

- **Acció preventiva:**
Testejar els mòduls amb més d'un MCU si és possible.
- **Acció correctiva:**
Intentar adquirir altre mòdul idèntic en un distribuïdor de confiança que doni certes garanties de que el producte no serà defectuós, o posar-nos en contacte amb el client de OpenSpirulina per demanar si es poden enviar un altre unitat del mòdul amb problemes.

- **Risc de gestió del projecte:**

Els temps en alguna de les fases del projecte no es prou realista per poder garantir el complement de tots els objectius.

[Risc mig]

○ **Acció preventiva:**

Realitzar validacions periòdiques del progrés de totes les tasques implicades en els objectius de la fase actual.

○ **Acció correctiva:**

Valorar i reajustar els temps de les tasques i objectius pendents per tal de complir amb els objectius actuals abans de continuar amb la següent fase.

7. Valoració econòmica

En aquest apartat es realitzarà una valoració dels costos estimats sobre els diferents aspectes que contempla el desenvolupament des de zero del producte (conceptualització, disseny, prototipat, proves, cost dels materials, etc.), per tal de tenir una idea general de la viabilitat del projecte.

A continuació es presenta el cost del material necessari per el projecte, tenint en compte el nombre mínim de sensors necessaris per al monitorat d'un cultiu bàsic d'espíulina:

Producte	unitats	Preu/u.	Import
MCU - Arduino Mega 2560	1	33,00 €	34,00 €
Pantalla LCD - 2004A	1	16,88 €	17,88 €
Mòdul RTC - DS3231	1	6,79 €	7,79 €
Connector femella VGA	1	5,85 €	6,85 €
Mòdul Ethernet W5100 + SD	1	17,34 €	18,34 €
Sensor pH - HAOSHI H-101	1	102,55 €	103,55 €
Sensor lux - BH1750	2	2,75 €	4,75 €
Sensor temp.+ humitat - DHT22	1	3,15 €	4,15 €
Sensor temp.líquids - DS18B20	4	2,45 €	6,45 €
Sensor lux - MAX44009	1	2,96 €	3,96 €
Sensor ORP - AtlasScientific EZO	1	37,00 €	38,00 €
Sensor corrent - DF Robot	2	17,55 €	19,55 €
Mòdul Relé 10A 250V	3	2,76 €	5,76 €
Cable elèctric de 0,25mm (1 metre)	10	0,81 €	10,81 €
		Subtotal:	281,84 €
		IVA (21%)	59,19 €
Total import			341,03 €

Taula 13. Valoració de propost de material

El pressupost presentat és el real que s'ha obtingut en la compra de dels diferents articles però amb compres de poca quantitat d'unitats. En el cas de que el projecte es volgués distribuir de forma comercial es deurien de comprar grans quantitats de cada article per obtenir un preu més assequible, aconseguir baixar el preu final del producte i fer aquest més atractiu per al potencials clients del sector.

Realitzant una inspecció detallada de tots els articles s'ha observat que no tots els fabricant disposen d'una opció directe per a realitzar pressupostos de compres massives d'aquests articles, així doncs no es pot realitzar un càlcul real del preu per unitat en els cas de comprar grans quantitats. El que sí es pot realitzar és una estimació extrapolant un preu aproximat de descompte per compra massiva. Per aquesta estimació s'han consultat alguns dels articles que sí disposen de informació per compres d'aquest tipus i es realitza un càlcul estimat d'entre un 28% i un 35% de descompte comprant 200 unitats d'un mateix article. Es prendrà doncs com a estimació 31,5%:

Producte	unitats	Preu/u.	Import
MCU - Arduino Mega 2560	200	33,00 €	6.600,00 €
Pantalla LCD - 2004A	200	16,88 €	3.376,00 €
Mòdul RTC - DS3231	200	6,79 €	1.358,00 €
Connector femella VGA	200	5,85 €	1.170,00 €
Mòdul Ethernet W5100 + SD	200	17,34 €	3.468,00 €
Sensor pH - HAOSHI H-101	200	102,55 €	20.510,00 €
Sensor lux - BH1750	200	2,75 €	550,00 €
Sensor temp.+ humitat - DHT22	200	3,15 €	630,00 €
Sensor temp.líquids - DS18B20	200	2,45 €	490,00 €
Sensor lux - MAX44009	200	2,96 €	592,00 €
Sensor ORP - AtlasScientific EZO	200	37,00 €	7.400,00 €
Sensor corrent - DF Robot	200	17,55 €	3.510,00 €
Mòdul Relé 10A 250V	200	2,76 €	552,00 €
Cable elèctric de 0,25mm (1 metre)	200	0,81 €	162,00 €
		Subtotal:	50.368,00 €
		IVA (21%)	10.577,28 €
		Descompte (31,5%):	-19.197,76 €
Total import			41.747,52 €

Taula 14. Especificació dels costos dels materials necessaris

Tenint en compte que el projecte *OpenSpirulina* té una visió global de ser un sistema de control de cultius per a ús domèstic, no es creu necessari realitzar càlculs per a quantitats molt més elevades que les ja realitzades.

Tot i que el preu no es molt elevat tenint en compte que ja es disposaria de la totalitat dels materials necessaris per a la fabricació de la part del microcontrolador, encara s'ha de tenir en compte un aspecte també força important. Es tracta dels costos relacionats amb el desenvolupament de la solució, les proves (ja sigui en un laboratori controlat de la mateixa empresa productora o en un client pilot), costos de posar a la venda un nou producte tecnològic com pot set certificats de qualitat, registre del producte, etc.

En la següent taula es detallen les fases de desenvolupament de la aplicació, disseny de l'arquitectura, jocs de proves, etc. Incloent també la fase 4 de la memòria, ja es consideraria documentació necessària per a la finalització del projecte. El preu hora es prendrà de forma única a 30€/hora:

	Hores	Preu / h.	Import
Fase 1:	219	30,00 €	6.570,00 €
Cerca d'informació necessària Proves d'execució de la solució inicial Cerca d'informació del mòdul lector de targetes SD Implementació del codi funcional Execució dels jocs de proves Redactat document PAC2			
Fase 2:	231	30,00 €	6.930,00 €
Cerca d'informació necessària Cerca d'informació dels nous mòduls a implantar Implementació del codi funcional Implantació del sistema de recol·lecció, emmagatzematgei exploració de dades (MQTT Broker + Telegraf + InfluxDB + Grafana) Execució dels jocs de proves + proves mòdul Ethernet W5500 Redactat document PAC2			
Fase 3:	245	30,00 €	7.350,00 €
Cerca d'informació necessària Configuracions requerides del dashboard Grafana Cerca d'informació d'alternatives per als mòduls Ethernet i SD Proves aïllades amb diferents models de mòduls Ethernet com mòduls lectors de SD Implementació del codi funcional Implementació de servei d'actuador remot per tal d'enviar senyals als MCU Implementació servei de visualització de l'estat dels actuadors Redactat document PAC4			
Fase 4:	49	30,00 €	1.470,00 €
Obtenció de informació necessària Redacció de la documentació			
Subtotal:			22.320,00 €
IVA (21%)			4.687,20 €
Total import			27.007,20 €

Taula 15. Especificació des costos de desenvolupament del producte

Amb aquestes dues estimacions, el cost dels materials i el cost de desenvolupament, investigació, comercialització, etc. podríem realitzar una estimació del preu total per a una producció d'unes 200 unitats:

Estimació de cost total	
Cost dels materials (per 200 unitats)	41.747,52 €
Cost de desenvolupament	27.007,20 €
	IVA (21%):
Total import	68.754,72 €

Cost estimat per unitat:	343,77 €
---------------------------------	-----------------

Taula 16. Càlcul final de pressupost

Tot i que inicialment sembla un preu prou alt, s'ha de tenir en compte que aquest engloba el desenvolupament complet (que tan sols es faria un sol cop fins a treure el producte) i 200 unitats per comercialitzar. Aquesta estimació dona un preu base d'uns 343,77€ / unitat, que és un preu molt competitiu si ho comparem amb l'alternativa de la competència que es va analitzar en l'apartat 2.2 d'estudi de mercat.

8. Conclusions

Un cop finalitzat el projecte del treball final de grau es realitza una valoració general com també personal dels punts sobre aspectes a millorar en qualsevol futur projecte que s'hagi d'afrontar.

Tal com s'ha descrit en apartats anteriors, dels objectius planificats inicialment com a principals s'han assolit quasi la totalitat d'aquests, a excepció del darrer punt. Per tal de tenir una idea global objectius inicialment planificats, es presenta la relació amb l'estat actual:

Objectius principals:

Fase	Objectiu	Estat
1	Configuració de dispositius mitjançant targeta SD	Fet
2	Integració nous mòduls + sensors requerits per el client	Fet
	Implantació de sistema de gràfiques amb <i>Grafana</i> + protocol <i>MQTT</i>	Fet
3	Implementació a <i>Grafana</i> d'alarmes actualment ja operatives la solució actual	Fet
	Implementació a <i>Grafana</i> d'alarmes per la resta de sensors afegits	Fet
	Actuadors manuals remots, per controlar el hivernacle i l'agitador	Fet
	Implantació de sistema WDG per control d'errors	No fet

Taula 17. Taula d'objectius principals

Objectius extraordinaris:

#	Objectiu	Estat
A	Actuadors automàtics, fer certa intel·ligència en el sistema	No fet
B	Sistemes de comunicacions genèric	No fet
C	Comunicació d'accions entre múltiples microcontroladors	No fet

Taula 18. Taula d'objectius extraordinaris

L'objectiu final de implantació del sistema *Watchdog* (a partir d'ara *WDG*) no es va realitzar per raons de temps, tot i que es va afegir altre funcionalitat addicional com és el control d'actuadors remots mitjançant el servidor web que presenta el microcontrolador Arduino.

La decisió de no implementar el sistema *WDG* va ser perquè es va creure més necessari implementar de forma completa el sistema d'actuadors remots per tal de garantir la interacció de forma remota amb el cultiu. D'aquesta forma evitar, en cas de que aquest estigui en perill per qüestions de condicions ambiental adverses (com per exemple temperatura excessivament alta)

perdre la producció. A més, es va creure que amb el sistema de monitorat amb Grafana, certa part de control de bloqueig del MCU quedava coberta, ja que si durant un cert interval no es reben dades del cultiu, el sistema d'alertes de Grafana envia les notificacions pertinents als usuaris interessats i així poder actuar en conseqüència.

8.1. Quines lliçons s'han après del treball?

Gràcies al desenvolupament de forma íntegra en aquest projecte s'han après els següents aspectes:

- Realitzar una planificació d'un projecte des de zero sent més realista i curós amb la estimació de temps requerit. No és una tasca gens fàcil i de vegades una mala planificació, poc realista, pot comportar problemes en les dates d'entrega o inclús en el resultat producte final.
- Aprofundir més en l'àmbit del microcontroladors i els sistemes encastats. Com també la utilització de noves eines per al desenvolupament de tecnologies relacionades amb els MCU.
- Conèixer més en profunditat nous protocols de comunicació especialment dissenyats per a IoT, com per exemple MQTT.
- Aprendre a integrar un projecte completa utilitzant tan sols solucions i eines de codi obert i aconseguir una solució mínimament robusta, versàtil i econòmica.
- Saber trobar solucions alternatives a problemes que inicialment son bloquejant per a la continuació de la resta de tasques del projecte.

8.2. Autoavaluació

A continuació es realitza una valoració personal del cost del projecte i aspectes relacionats amb aquest.

8.2.1. Dedicació de temps

A continuació es representa un resum de les hores dedicades a cada una de les entregues fixades al TFG:

	Hores
PAC1 - Pla de treball	28h
PAC2 - Seguiment	219h
PAC3 - Seguiment + previa memoria	231h
Codi final	245h
Memòria	49h
	<i>Total hores dedicació:</i> 772h

Taula 19. Previsió de dedicació d'hores

8.2.2. Reflexió crítica i anàlisi

Tot i que quasi la totalitat dels objectius principals del projecte han estat assolits, penso que la planificació inicial deuria haver estat planificada per part meua d'altre manera. En un principi, suposo que per falta d'experiència en aquest tipus de projectes, es va realitzar una planificació repartint els temps de forma (al meu parer) massa uniforme. En realitat, els temps en desenvolupament i jocs proves han estat més amplis del que es pensava, suposo que en part per la poca experiència en la utilització de noves tecnologies com l'ús de protocol *MQTT*, nous entorns de desenvolupament, etc.

També, degut a bastants problemes de compatibilitat amb els diferents mòduls (com el de comunicació *Ethernet*) s'han agut de realitzar moltes tasques de proves que han endarrerit força les tasques a realitzar, fent que el temps jugui sempre una mala passada envers la tranquil·litat i professionalitat que crec s'ha de mantenir en qualsevol projecte que s'hagi d'afrontar. Personalment penso que, tot i que es una qüestió negativa a nivell personal, és un aspecte que a dia d'avui ens podem trobar a diari en l'àmbit professional i s'ha de saber afrontar els reptes de la millor forma possible.

Com a visió global, em quedo amb la part molt positiva, de la gran quantitat de coses que he après en la realització del projecte. No tan sols en la part de àmbit tecnològic, sinó també en les assolides en quant a l'administració del projecte, presa de decisions i coordinació de estratègies a seguir juntament a un equip (en aquest cas el consultor d'en projecte i el client).

8.3. Línies de futur

Un dels aspectes que durant el procés d'elaboració del projecte he pogut conèixer però no revisat en profunditat ha estat la possibilitat de migrar tecnologia del microcontrolador a altres arquitectes més actuals i sobre tots més potents i versàtils. Si que és cert que la plataforma Arduino està

força estesa però, al meu parer, és útil per a la realització de prototips i projectes amb poc abats i menys ambiciosos.

En el cas d'aquest projecte, tal com s'ha analitzat breument en l'apartat 2.1, hi ha altres opcions de microcontroladors en el mercat que poden assolir la funció dels requeriments d'aquest projecte de forma més elegant i amb possibilitat de afegit fàcilment funcionalitats actualment bàsiques com és la implementació de seguretat en les connexions, per la transmissió de dades sensibles.

Altre aspecte que m'ha cridat força l'atenció ha estat la possibilitat de dissenyar des de zero una placa propietària amb el components (connectors, MCU, etc.) ja implantats. Inicialment sembla una idea de projecte força ambiciosa, però tenint en compte que el client *OpenSpirulina* compta amb la col·laboració en altres àmbits és el de la enginyeria electrònica, seria una bona opció a tenir en compte i investigar.

9. Glossari

FAO: (Food and Agriculture Organization of the United Nations) és un organisme especialitzat de l'ONU que dirigeix les activitats internacionals encaminades a eradicar la fam.

GPIO: (General Purpose Input/Output, Entrada/Sortida de Propòsit General) és un pin genèric en un xip, el comportament del qual (incloent si és un pin d'entrada o sortida) es pot controlar (programar) per l'usuari en temps d'execució.

IIMSAM: Es la Institució Intergovernamental pro utilització de la microalga Espirulina per a corregir la malnutrició.

LED: (Light-Emitting Diode, díode emissor de llum) és un dispositiu semiconductor que emet llum incoherent d'espectre reduït.

MCU: Un microcontrolador (abreujat μC , uC o MCU) és un petit ordinador en un sol circuit integrat especialitzat a controlar equips electrònics, que inclou una CPU.

MQTT: Protocol de missatgeria basat en ISO estàndard de publicació-subscripció

ORP: El Potencial d'elèctrode , Potencial de reducció o potencial REDOX com se'l coneix és el que produeix una cel·la galvànica per la reacció d'una cel·la que no està en equilibri.

SD: És un format de targeta de memòria flash.

10. Bibliografia (Totes les fonts que hagueu consultat)

[1] MQTT Github Wiki, 2018 [en línia]:

MQTT Community Wiki by mqtt.org community members

<https://github.com/mqtt/mqtt.github.io/wiki>, [Visitat 21/03/2019]

[2] Arduino cc, 2017 [en línia]:

Arduino reference

<https://www.arduino.cc/reference/en/>, [visitat 28/03/2019]

[3] PlatformIO, 2019 [en línia]:

PlatformIO Github

<https://docs.platformio.org/en/latest/>, [visitat 29/03/2019]

[4] RandomNerdtutorials, 2017[en línia]:

RandomNerdtutorials

<https://randomnerdtutorials.com/21-arduino-modules-you-can-buy-for-less-than-2/>, [visitada 02/04/2019]

[5] InfluxDB, 2018 [en línia]

InfluxDB documentation

<https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.7/introduction/getting-started/>, [visitada 09/04/2019]

[6] Telegraf, 2019 [en línia]

Telegraf Github

<https://github.com/influxdata/telegraf>, [visitada 09/04/2019]

[7] Ethernet W5100, 2016 [en línia]

Ethernet W5100 reference

<https://www.wiznet.io/product-item/w5100/>, [visitada 05/05/2019]

[8] ArduinoLearning, 2019 [en línia]

Arduino learning reference

<http://arduinolearning.com/code/arduino-max44009-ambient-light-sensor-example.php>, [visitada 07/05/2019]