

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DE UN
FOTOBIORREACTOR AIRLIFT PARA EL CULTIVO DE MICROALGAS POR LOTES.

JHOJAN STIVEN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



PAMPLONA 2019



DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO DE UN
FOTOBIORREACTOR AIRLIFT PARA EL CULTIVO DE MICROALGAS POR LOTES.

JHOJAN STIVEN HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

DIRIGIDA POR:

Director
JULIO CESAR OSPINO ARIAS
Esp. Ing. Electrónico

Co-Directora
ALBA LUCÍA ROA PARRA
PhD. Bacterióloga

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



PAMPLONA 2019



DEDICATORIA

Primeramente, agradecer y dedicarle todos los méritos obtenidos a Dios, por haberme brindado la sabiduría e inteligencia durante el transcurso de mi carrera ingeniera electrónica, llenándome de fuerza y así forjarme en este proceso como un profesional de buenos valores y con toda la disposición de afrontar los nuevos retos de la vida.

A mi madre Ofelia Martínez quien me brindo la vida, me ha apoyado y acompañado en cada paso importante de mi vida, a cada uno de los integrantes de mi familia que han hecho mis sueños posibles y que cada uno de mis triunfos sean el gozo de todos aquellos que me han acompañado en este camino.

Jhojan Stiven Hernández Martínez.



AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mi madre por todo el apoyo y sabiduría brindada, cada consejo y sus palabras de ánimo en esta trayectoria que a pesar de ser dura es una de las etapas más lindas de mi vida.

A mi director de trabajo de grado Ing. Julio César Ospino por todo el apoyo prestado, por cada una de sus enseñanzas, el conocimiento compartido a través de este tiempo, por ser un gran amigo.

A mi co-directora de trabajo de grado PhD. Alba Lucía Roa por todo el apoyo prestado, porque a pesar del poco tiempo compartido deposito toda su confianza en mí, agradezco cada uno de sus conocimientos y correcciones aportadas a el trabajo de grado.

Le doy gracias a todas mis tías y tíos porque nunca me abandonaron en este proceso de aprendizaje, su apoyo y cada uno de los consejos brindados fueron de vital importancia para alcanzar cada una de las metas propuestas.

A mi compañero de trabajo Alexis Capacho por su tiempo y dedicación en la elaboración del prototipo y cada una de sus intervenciones a lo largo del proyecto.

A todos mis amigos que cultive a través de estos años, por cada una de las experiencias compartidas y enseñanzas aprendidas, para todos ellos mi inmensa gratitud.

A los docentes de Ingeniería Electrónica, por su sabiduría y todos los conocimientos que me brindaron durante este proceso educativo.

Le doy gracias a la Universidad de Pamplona por ser la institución que me ha permitido cumplir mis sueños, por ser el lugar donde me desarrolle como estudiante y profesional, por siempre mi respeto a la institución.



RESUMEN

Varias Instituciones tanto educativas como investigativas están tratando de contrarrestar los efectos adversos del cambio climático. Uno de estos aspectos a contrarrestar es la emisión de CO₂. Sin embargo, en la actualidad el pilar de esa investigación es la producción de biomasa microalgal, por esta razón todos los estudios se deben enfocar en el diseño de sistemas de medio de cultivos para microalgas que sean eficientes tanto en el aumento de biomasa, como en su calidad.

El objetivo de este proyecto es Desarrollar un sistema de control y monitoreo de un prototipo de fotobiorreactor airlift para el cultivo de microalgas por lotes. Con este fin, la pregunta de investigación es la siguiente: ¿El diseño de un fotobiorreactor airlift con control, y monitoreo del bioproceso permitirá obtener mejores rendimientos de la producción de biomasa microalgal?. En este contexto, Las variables que deben medirse y controlarse en el cultivo de microalgas son cada día más numerosas, del buen control de estas variables depende el desempeño del proceso.

El proyecto de investigación se responde a través de un diseño e implementación de un prototipo totalmente controlado y monitoreado. Con el prototipo se mitigo todo tipo de variable externa, para lo cual se tomaron 4 variables de influencia: Agitación, Temperatura, Luminosidad, pH. Las respuestas obtenidas en cuanto a producción fue un aumento de biomasa microalgal, así como el control del bioproceso, lo anterior se verifico tomando en comparación con un fotobiorreactor manual y realizando las cinemáticas de crecimiento de los dos prototipos.

Teniendo esto en cuenta, se recomienda que futuros grupos investigativos del área de biotecnología optimicen el control del bioproceso de cultivo de microalgas, y no trabajar solo a pequeña escala sino pasar a una gran producción de microalgas por lotes. Varias de las conclusiones obtenidas indican que se debe tomar la agitación como una variable de mayor influencia, así como realizar futuras investigaciones de cuáles son las microalgas más indicadas para este tipo de bioproceso.



ABSTRACT

Several educational and research institutions are trying to counteract the adverse effects of climate change. One of these aspects to counteract is the emission of CO₂. However, currently the mainstay of this research is the production of microalgae biomass, for this reason all studies should focus on the design of microalgae culture medium systems that are efficient both in the increase of biomass and in its quality.

The objective of this project is to develop a control and monitoring system for a prototype airlift photobioreactor for the cultivation of batch microalgae. To this end, the research question is as follows: Will the design of an airlift photobioreactor with control and monitoring of the bioprocess allow for better yields of microalgal biomass production?. In this context, the variables that must be measured and controlled in the cultivation of microalgae are increasingly numerous, the performance of the process depends on good control of these variables.

The research project is answered through a design and implementation of a fully controlled and monitored prototype. With the prototype, all types of external variables were mitigated, for which 4 variables of influence were taken: Agitation, Temperature, Luminosity, pH. The responses obtained in terms of production was an increase in microalgae biomass, as well as the control of the bioprocess, the previous thing being verified by comparing it with a manual photobioreactor and realizing the kinematics of growth of the two prototypes.

Bearing this in mind, it is recommended that future research groups in the biotechnology area optimize the control of the microalgae bioprocess, and not only work on a small scale but move on to a large production of microalgae in batches. Several of the conclusions obtained indicate that agitation should be taken as a variable of greater influence, as well as carrying out future investigations of which are the most suitable microalgae for this type of bioprocess.



TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTOS	5
RESUMEN	6
ABSTRACT.....	7
INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GENERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	17
4. MARCO TEÓRICO.....	18
4.1 MICROALGAS	18
4.2 CINÉTICA DE CRECIMIENTO DE MICROALGAS	19
4.3 FOTOBIOREACTOR.....	20
4.3.1 DISEÑO DE FOTOBIOREACTORES	20
4.3.2 FOTOBIOREACTORES AIRLIFT	21
4.3.3 CONFIGURACIONES DE FOTOBIOREACTORES AIRLIFT	23
4.4 TEMPERATURA.....	23
4.5 AGITACIÓN.....	24
4.6 pH	24
4.7 LUMINOSIDAD	24
4.8 SISTEMAS EMBEBIDOS	25
4.8.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS SISTEMAS EMBEBIDOS	25
4.9 CYPRESS SEMICONDUCTOR.....	25
4.10 PSoC 5LP.....	26
4.10.1 ASPECTOS DESTACADOS PSOC 5LP.....	26
4.10.2 ARQUITECTURA PSOC 5LP	27
4.11 PSoC CREATOR.....	28
4.12 LABVIEW.....	31
4.13 SISTEMAS DE CONTROL	32
4.13.1 SISTEMAS DE CONTROL REALIMENTADO.....	32
4.13.2 CONTROLADOR P.....	32



4.13.3 CONTROLADOR PD.....	33
4.13.4 CONTROLADOR PI.....	33
4.13.5 CONTROLADOR PID.....	33
4.13.6 CONTROLADOR ON-OFF	34
4.14 MODELADO DE SISTEMAS DE CONTROL	34
5. DISEÑO DEL PROTOTIPO	35
5.1 VARIABLES DE DISEÑO Y PARÁMETROS DEL PROTOTIPO.....	36
5.2 VARIABLES DE OPERACIÓN	37
5.3 VARIABLES DE RESPUESTA.....	37
5.4 RELACIONES DE DISEÑO Y ECUACIONES.....	37
5.5 MEDIDAS DEL MODELO CONSTRUIDO	38
5.6 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	42
5.6.1 CRITERIO DE SELECCIÓN DE MATERIALES Y COMPONENTES.....	43
5.7 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL FOTOBIORREACTOR AIRLIFT.....	50
5.7.1 MODELO DE CRECIMIENTO MICROALGAL	50
5.8 DISEÑO DE CONTROL DEL PROCESO	54
5.8.1 Adquisición, acondicionamiento de las señales y activación (Temperatura, pH, Iluminancia):.....	54
5.9 DISEÑO MONITOREO DEL PROCESO.....	58
5.10 DISEÑO CIRCUITOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA.....	60
5.10.1 ACTIVACIONES EN DC	60
5.10.2 ACTIVACIONES EN AC.....	64
6. RESULTADOS.....	74
6.1 RESULTADOS COMPORTAMIENTO CIRCUITOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA ...	74
6.2 RESULTADOS DE LAS VARIABLES ADQUIRIDAS Y ACONDICIONADAS.....	76
6.3 RESULTADOS COMPORTAMIENTO DE LOS CONTROLADORES EN EL PROCESO	78
6.4 RESULTADOS INTERFAZ DE MONITOREO EN LABVIEW	83
6.5 RESULTADOS ESTRUCTURA DEL PROTOTIPO, DISTRIBUCIÓN SENSORICA, DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA.....	84
6.6 EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO CONSTRUIDO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS DEL PROCESO BIOLÓGICO	87
CONCLUSIONES	95
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
ANEXOS	98



TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Micrografías de Chlorella Sorokiniana. Fuente: [Chisti, 2007].....	19
Ilustración 2. Curva de crecimiento cinético de la Microalga Fuente: [M. Díaz, 2004].....	20
Ilustración 3. Componentes del reto Multidisciplinario. Fuente: [C. Contreras, 2003]	20
Ilustración 4. Diferentes modelos de Fotobiorreactores.Fuente: [C. Contreras, 2003].....	21
Ilustración 5. Partes características de un reactor airlift. Fuente: [Becker, 1994].....	22
Ilustración 6. Configuraciones especiales de reactores airlift. Fuente: [Gluz, Bioreactors].....	23
Ilustración 7. Logo Cypress Semiconductor. Fuente: [Cypress, 2017]	26
Ilustración 8. Diseño tarjeta PSoC 5LP-097. Fuente: [Cypress, 2017].....	26
Ilustración 9. Arquitectura PSoC 5LP. Fuente: [Cypress, 2017].....	28
Ilustración 10. Logo IDE PSoC Creator V4.0. Fuente: [Semiconductor, 2015].....	29
Ilustración 11. Entorno de Programación PSoC Creator. Fuente: [El Autor]	30
Ilustración 12. Ventana Asignación y Configuración de pines E/S. Fuente: [El Autor]	30
Ilustración 13. Ventana de Programación por código. Fuente: [El Autor].....	31
Ilustración 14. Logo Software LabVIEW. Fuente: [INSTRUMENTS, 2017]	32
Ilustración 15. Ejemplo Modelado de un sistema, Función de Transferencia.Fuente:[H. I. SIERRA] ...	34
Ilustración 16. Áreas del diseño de reactores químicos. Fuente: [Chisti, 2007]	35
Ilustración 17. Metodología para el diseño del prototipo. Fuente: [El Autor].....	35
Ilustración 18. Diseño de planos cilindro en solidworks Fuente: [El Autor].....	39
Ilustración 19. Estructura del fotobiorreactor airlift. Fuente: [El Autor]	40
Ilustración 20. Diseño de planos armario de control en solidworks. Fuente: [El Autor]	40
Ilustración 21. Estructura armario de control para el bioproceso. Fuente: [El Autor].....	41
Ilustración 22. Cilindro hecho a base de acrílico transparente. Fuente: [El Autor].....	42
Ilustración 23. Tasa fotosintética vs Intensidad luminosa. Fuente: [Universidad de Almería].....	51
Ilustración 24. Proceso Obtención del Modelo de Crecimiento Microalgal. Fuente: [El Autor]	52
Ilustración 25. Productividad vs Crecimiento microalgal. Fuente: [Universidad de Almería].....	53
Ilustración 26. Esquema PT100 en PsoC 5LP. Fuente: [El Autor].....	54
Ilustración 27. Pines conexión PT100 PsoC 5LP. Fuente: [El Autor]	54
Ilustración 28. Esquema Termistor en PSoC CREATOR. Fuente: [El Autor]	55
Ilustración 29. Pines conexión Termistor PSoC. Fuente: [El Autor].....	55
Ilustración 30. Esquema sensor MSP430 en PSoC CREATOR. Fuente: [El Autor]	56
Ilustración 31. Conexión pines MSP430 con PSoC. Fuente: [El Autor].....	56
Ilustración 32. Esquema BH1750 en PSoC CREATOR. Fuente: [El Autor].....	57
Ilustración 33. Conexión pines BH1750 con PsoC 5LP. Fuente: [El Autor]	57
Ilustración 34. Secuencia adquisición y monitoreo de las variables. Fuente: [INSTRUMENTS,2017] .	58

Ilustración 35. Esquema Transmisión serial PSoC CREATOR. Fuente: [El Autor].....	58
Ilustración 36. Conexión por puerto serial Rx y Tx con LABview. Fuente: [El Autor].....	59
Ilustración 37. Programa en bloques, para recepción de datos por serial y su decodificación. Fuente: [El Autor].....	60
Ilustración 38. Esquema circuito activación DC, dos transistores independientes. Fuente: [El Autor]...	60
Ilustración 39. Diseño activación en DC con transistores BC547 y 2N2222A. Fuente: [El Autor]	63
Ilustración 40. Circuito típico Optoacoplador. Fuente: [El Autor].....	64
Ilustración 41. Esquema Optoacoplador ON y TRIAC OFF. Fuente: [El Autor].....	64
Ilustración 42. Señal de voltaje en alterna. Fuente: [RMS, UNICROM]	65
Ilustración 43. Diseño Circuito activación en AC. Fuente: [El Autor]	73
Ilustración 44. Visualización temperatura con PT100. Fuente: [El Autor]	76
Ilustración 45. Visualización temperatura con Termistor NTC 10KΩ. Fuente: [El Autor].....	76
Ilustración 46. Visualización valor Ph. Fuente: [El Autor].....	77
Ilustración 47. Visualización Intensidad Luminosa en el FBR. Fuente: [El Autor]	77
Ilustración 48. Prueba de agitación. Fuente: [El Autor].....	78
Ilustración 49. Resultados obtenidos de Agitación. Fuente: [El Autor]	79
Ilustración 50. Conexión controlador. Fuente: [El Autor].....	79
Ilustración 51. Gráfica Resistencia vs Temperatura. Fuente: [El Autor].....	81
Ilustración 52. Gráfica Voltaje vs Temperatura. Fuente: [El Autor]	81
Ilustración 53. Respuesta controladora PID. Fuente: [El Autor].....	82
Ilustración 55. Interfaz gráfica, estructura del FBR y diseño instrumentos medida. Fuente [El Autor]..	83
Ilustración 56. Interfaz de monitoreo FBR airlift automatizado. Fuente: [El Autor].....	83
Ilustración 57. Prototipo automatizado (internamente). Fuente: [El Autor].....	84
Ilustración 58. Prototipo Automatizado (externamente). Fuente: [El Autor]	85
Ilustración 59. Marcado cables de control y alimentación. Fuente: [El Autor].....	86
Ilustración 60. Marcado cables de control y alimentación. Fuente: [El Autor].....	86
Ilustración 61. Caja acrílica para: placas de control y potencia separadas por aislamiento óptico. Fuente: [El Autor].....	86
Ilustración 62. Esterilización fotobiorreactores con agua destilada caliente e hipoclorito. Fuente: [El Autor].....	87
Ilustración 63. Preparación del medio de cultivo. (Proteínas en agua destilada). Fuente: [El Autor]....	87
Ilustración 64. Esterilización del medio de cultivo. (autoenclavé). Fuente: [El Autor]	88
Ilustración 65. Puesta en marcha del prototipo (Ubicado en el laboratorio de Biotecnología). Fuente: [El Autor].....	88
Ilustración 66. Densidad óptica vs Peso seco. Fuente: [El Autor].....	89
Ilustración 67. Sistema de Cultivo concentrado y toma de muestras (Solución madre). Fuente: [El Autor].....	90



Ilustración 68. Diluciones seriadas 10 en 10. Fuente: [El Autor].....	90
Ilustración 69. Se cuantifico: conteo de células, Peso seco, Densidad óptica por separado. Fuente: [El Autor].....	90
Ilustración 70. Curva calibración: Relación densidad celular con densidad óptica. Fuente: [El Autor] .	92
Ilustración 71. Curva de calibración: Relación Peso seco con Densidad óptica. Fuente: [El Autor]	92
Ilustración 72. Evidencia primeros pasos del proyecto. Fuente: [El Autor]	98
Ilustración 73. Evidencia avances intermedios del proyecto. Fuente: [El Autor]	98
Ilustración 74. Etapa final del proyecto. Fuente: [El Autor]	99
Ilustración 75. Etapa final del proyecto (prototipo). Fuente: [El Autor].....	99
Ilustración 76. PCB Activación DC electroválvulas. Fuente: [El Autor].....	100
Ilustración 77. PCB Activación AC disipador área grande. Fuente: [El Autor].....	100
Ilustración 78. PCB Activación AC disipador área pequeña. Fuente: [El Autor]	100
Ilustración 79. PCB tarjeta de adquisición y control. Fuente: [El Autor]	100
Ilustración 80. Esquema de Implementación interno del Proyecto en PSoC 5LP representado en PSoC CREATOR. Fuente: [El Autor].....	101
Ilustración 81. Esquema programa del serial con LABview. Fuente: [El Autor].....	101
Ilustración 82. Fotobiorreactor manual para pruebas experimento 1. Fuente: [El Autor]	102
Ilustración 83. Fotobiorreactor Automatizado para pruebas experimento 2. Fuente: [El Autor]	102
Ilustración 84. Hoja de características BC547. Fuente: [Datasheet de Componentes Electrónicos] ...	103
Ilustración 85. Hoja característica de 2N2222A. Fuente: [Datasheet de Componentes Electrónicos]	103
Ilustración 86. Hoja característica Triac BTA08. Fuente: [Datasheet de Componentes Electrónicos]	104
Ilustración 87. Hoja característica Triac BTA06. Fuente: [Datasheet de Componentes Electrónicos]	105



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Contenido Lipídico de algunas cepas de microalgas	19
Tabla 2. Posibles configuraciones de las diferentes partes de un reactor airlift	23
Tabla 3. Dimensiones del prototipo fotobiorreactor airlift	38
Tabla 4. Características más relevantes PSOC5LP	48
Tabla 5. Características más destacadas de PSOC CREATOR	49
Tabla 6. Lista de materiales y gastos económicos	50
Tabla 7. Medidas electroválvula	74
Tabla 8. Valores medidos transistor BC547	74
Tabla 9. Valores medidos transistor 2N2222A	74
Tabla 10. Valores medidos TRIAC BTA06 a plena carga	75
Tabla 11. Temperatura del circuito iluminación	75
Tabla 12. Valores medidos TRIAC BTA08 a plena carga	75
Tabla 13. Temperatura del circuito calentador	75
Tabla 14. Resultados Control Agitación	78
Tabla 15. Caracterización de la planta variando temperatura de 0° a 40°	81
Tabla 16. Parámetros controlador	82
Tabla 17. Datos curvas de calibración	91
Tabla 18. Resultados experimento manual 1	93
Tabla 19. Condiciones de operación experimento 1	93
Tabla 20. Resultados experimento automático 1	93
Tabla 21. Condiciones de operación experimento 2	93
Tabla 22. Costo Mano de Obra Prototipo	94
Tabla 23. Tabla de consumo energético en 3 semanas	94



INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado en modalidad de tesis se llevó a cabo en la Universidad de Pamplona, Norte de Santander; donde se diseñó e implemento un prototipo de control y monitoreo automático para un fotobiorreactor de microalgas.

En este tipo de procesos es muy importante mantener el control sobre ciertas variables, en este caso a partir de algunas consultas y referenciado por diferentes autores se llegó a la conclusión de que las variables más influyentes son: Temperatura, PH, Luminosidad y Agitación;

En el libro se podrá precisar el porqué de trabajar este tipo de proyectos, así como los tipos de controles que se llevaron a cabo y el tipo de monitoreo implementado, ya son muchos los autores que han advertido sobre este tipo de trabajos, como es el caso de (Chisti, 2007) y (D. Dah-Wei, 2012, pág. 107) para introducir sus trabajos sobre microalgas.

No se quiere defender la exagerada pretensión de salvar al mundo con microalgas, sino de poner en consideración el uso de estas para ciertas aplicaciones que se encuentran en la vida cotidiana. Este trabajo se ocupa del biorreactor, como corazón del proceso biotecnológico, y se interesa con especial atención en el diseño, montaje y operación de una configuración de fotobiorreactor Airlift.



1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde hace algún tiempo se divulgó que el cultivo de microalgas en agua con nutrientes y luz podría ser una buena alternativa para producir proteínas de consumo humano, de igual forma son una fuente importante de biomasa rica en proteína para consumo animal. Desde entonces, la ingeniería se ha enfrentado al reto de diseñar, construir y operar fotobiorreactores para cultivarlas.

El problema en general que presentan estos fotobiorreactores para el cultivo de microalgas por lotes, es que en la mayoría de veces se presenta de una forma empírica donde el control de las variables físicas se desarrolla de forma experimental, donde cada cierto tiempo se toman muestras y medidas para saber cómo va el proceso.

De igual forma en la Universidad de Pamplona en el área de recursos naturales, exactamente en laboratorio de biotecnología se ha presentado problemas con el fotobiorreactor, ya que las personas a cargo realizan todo el proceso de forma manual y la producción de biomasa microalgal se ve afectada al no tener un control continuo y preciso sobre las variables físicas que la afectan, ya que de estas depende el aumento y la calidad de la biomasa. De igual forma se ha visto la necesidad de implementar el cultivo de microalgas para disminuir la concentración de CO₂ (principal compuesto causante del efecto invernadero) y producción de O₂ con miras a proporcionar ambientes más limpios.

PREGUNTA INVESTIGATIVA

¿El diseño de un fotobiorreactor airlift con control, y monitoreo del bioproceso permitirá obtener mejores rendimientos de la producción de biomasa microalgal?

1.2 JUSTIFICACIÓN

El trabajo con fotobiorreactores airlift para el cultivo de microalgas hace un tiempo ha tenido una gran aceptación por su rendimiento y acoplamiento a las condiciones de trabajo, por esta razón ha sido acogido por diferentes grupos investigativos los cuales buscan mejorar el diseño y dar un paso importante de la manipulación de las variables físicas de forma manual a sistemas que realicen esto de forma automática.

Por lo anterior este proyecto se basa en una misión importante de la Universidad de Pamplona, Colombia, donde se busca crear proyectos que aporten con el medio ambiente, por esta razón las tecnologías aplicadas al manejo de recursos naturales es una gran alternativa.



El proyecto investigativo Desarrollo de un Sistema de Control y Monitoreo de un Fotobiorreactor Airlift Para el Cultivo de Microalgas por Lotes determina y evidencia como el control y monitoreo del proceso biológico permite obtener una mayor eficiencia en la producción de biomasa microalgal, esta eficiencia se logra al tener un prototipo constantemente monitoreado respecto a sus variables más influyentes: Luminosidad, Temperatura, Agitación y pH, Sobre cada una de estas variables el desarrollo de un lazo de control independiente permite mejorar el comportamiento de cada una durante el proceso y estabilizarlas en un valor deseado obtenido a partir de recopilación investigativa.

El objetivo principal es implementar el prototipo para el cultivo de microalgas por lotes lo que simplifica el control de las variables, el monitoreo y control se desarrollan en base a una tarjeta de adquisición PSoC 5LP que incorpora novedosos métodos de adquisición, procesamiento y control de señales, donde a partir de un software LabVIEW se visualizara el comportamiento de estas variables realizando una comunicación serial con la tarjeta de adquisición. La incorporación de un sistema de control y monitoreo a un Fotobiorreactor Airlift tradicional aumenta su eficiencia de transferencia de masa para la obtención de biomasa microalgal en mayor cantidad y calidad lo cual se verifica a partir de procesos estandarizados como conteo directo y densidad óptica.

Todo lo anterior tiene como objetivo principal obtener un prototipo con el cual se aumente la calidad y cantidad de la biomasa microalgal, teniendo en cuenta que las microalgas se encuentran en gran variedad y cantidad, el cultivo de estas para obtener bienes y servicios como: gran fuente de alimento (Alimento para animales, proteínas), Captación de CO₂ (Ventanas o estructuras purificadoras de aire) uno de los principales causantes del efecto invernadero, por esta razón económicamente en la actualidad se paga muy bien por la venta de Biomasa microalgal y es un mercado nuevo en Colombia.



2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de control y monitoreo de un prototipo de fotobiorreactor airlift para el cultivo de microalgas por lotes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las variables de control del bioproceso para el cultivo de microalgas por lotes.
- Diseñar el sistema de control que permita manipular las variables del bioproceso.
- Diseñar el sistema de monitoreo, el cual se ajuste más a las necesidades del fotobiorreactor airlift.
- Implementar el sistema de control y monitoreo en el prototipo de biorreactor.
- Validar el funcionamiento del prototipo, para verificar el aumento de la producción de biomasa microalgal.

3. ALCANCES Y LIMITACIONES

El prototipo del fotobiorreactor airlift para el cultivo de microalgas se implementó en el laboratorio de Biotecnología CD 201 de la Universidad de Pamplona.

El prototipo tiene como finalidad mejorar la metodología del control de las variables de: Temperatura, pH, Luminosidad y Presión de aire(neumática).

EL prototipo del fotobiorreactor airlift es implementado para cultivos a escala media, en este caso 20 litros.

El prototipo diseñado e implementado, se realizó en un área cerrada y oscura (Armario), esto con el fin de facilitar el control sobre ciertas variables, y eliminar la influencia de los ciclos circadianos.

Después de verificar los sensores (Luxómetro, Datalogger) implementados en el laboratorio CD 201, se tomó la decisión de usarlos como patrones de comparación con respecto a otros sensores (PT100, Termistor, BH1750) que logramos implementar más fácilmente con la tarjeta de desarrollo PSoC 5LP.

El monitoreo se realizó a través del software LabVIEW 2018, a pesar de que es una tarea muy sencilla para el software, las limitaciones económicas me llevaron a implementar este tipo de propuesta.



4. MARCO TEÓRICO

4.1 MICROALGAS

Las microalgas constituyen un grupo de organismos unicelulares muy diverso que, gracias a su alta eficiencia fotosintética, gran plasticidad y diversidad metabólica, han colonizado una amplia variedad de ecosistemas acuáticos y terrestres. La alta diversidad que presentan no ha sido aún bien estudiada, pues de las aproximadamente 150.000 especies que se estima existen, el 90 % está aún por valorar. Se calcula que existen de 30.000 a 100.000 especies de microalgas que incluyen representantes tanto eucarióticos como procarióticos (cianobacterias o algas verdeazuladas). (Bioplat, 2010, pág. 8)

Ante esta gran diversidad de microalgas, nace la inquietud de aislar y evaluar aquellas cuyo crecimiento presenta interés biotecnológico. En este sentido, en la Tabla 1, se hace un resumen del contenido lipídico de diferentes cepas de microalgas, por cuanto dicho contenido está estrechamente vinculado con la posibilidad de obtener lípidos para biodiesel.

Los microalgas fueron de los primeros microorganismos que evolucionaron para aprovechar la luz solar, metabolizar CO_2 y producir O_2 . A este amplio grupo de organismos foto autótrofos se le atribuye la composición oxidante de la atmósfera que permitió la evolución de los seres heterótrofos. Las microalgas, aunque son organismos más primitivos tienen, con respecto a las plantas superiores, una mayor eficiencia fotosintética, lo que les permite generar cantidades de biomasa iguales en menor terreno cultivado (Chisti, 2007, pág. 297). Estas características de las microalgas las hacen candidatas especiales para la captura de CO_2 en fotobiorreactores.

La Ilustración 1 muestra micrografías de *Chlorella sorokiniana*.

MICROALGA	CONTENIDO LIPÍDICO (% peso seco)
<i>Botryococcus braunii</i>	25 - 75
<i>Chlorella</i> sp.	28 – 32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca</i> sp.	16 – 37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis</i> sp.	25 – 33
<i>Monallanthus salina</i>	20
<i>Nannochloris</i> sp.	20 – 35
<i>Nannochloropsis</i> sp.	31 – 68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35 – 54
<i>Nitzschia</i> sp.	45 – 47

Phaeodactylum tricornutum	20 – 30
Schizochytrium sp.	50 – 77
Tetraselmis sueica	15 – 23

Tabla 1. Contenido Lipídico de algunas cepas de microalgas

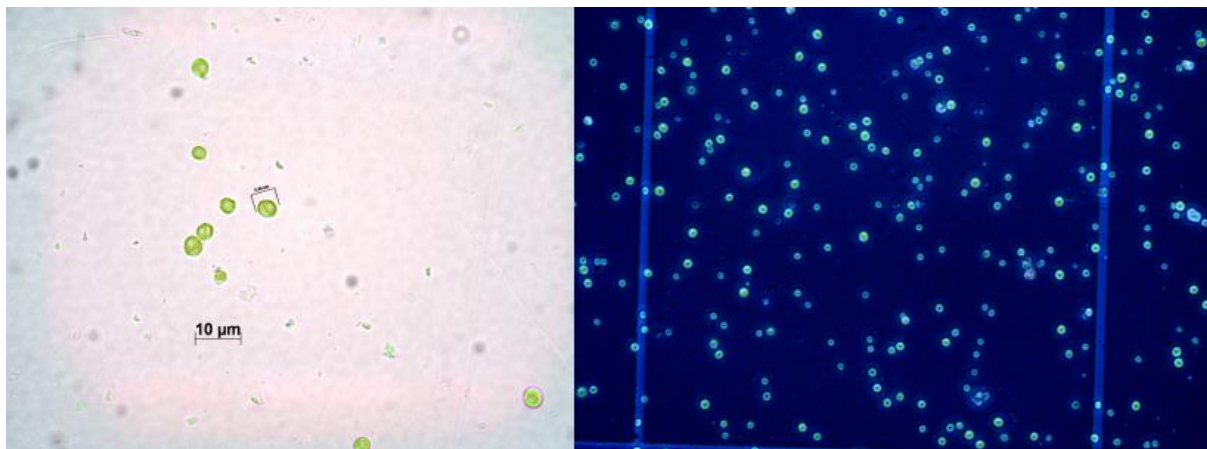


Ilustración 1. Micrográficas de *Chlorella Sorokiniana*. Fuente: [Chisti, 2007]

4.2 CINÉTICA DE CRECIMIENTO DE MICROALGAS

El proceso metabólico de las microalgas concede el incremento de su tamaño, en efecto las células se dividen y la población aumenta progresivamente. La cinética de crecimiento de la microalga consta de cinco fases: adaptación, crecimiento exponencial, crecimiento lineal, estacionaria y de muerte, como se muestra en la Ilustración 2.

Durante la fase inicial, la microalga muestra la necesidad de adaptarse a las nuevas condiciones del cultivo y la tasa de crecimiento es cercana a cero. Posteriormente, en la segunda fase se produce una aceleración y un incremento gradual de la biomasa, de manera que existe un crecimiento balanceado. En la tercera etapa la multiplicación celular se extiende hasta que la producción de biomasa se reduce y llega a ser lineal, que corresponde a la cuarta fase, en ese sentido la población de microalgas permanece metabólicamente activa, aunque el crecimiento ha cesado. Finalmente, las células mueren debido a que culmina su ciclo y por las desfavorables condiciones del ambiente: por la ausencia de luz y nutrientes, y/o por la presencia de bacterias que han contaminado el cultivo. (M. Díaz, 2004, pág. 385)

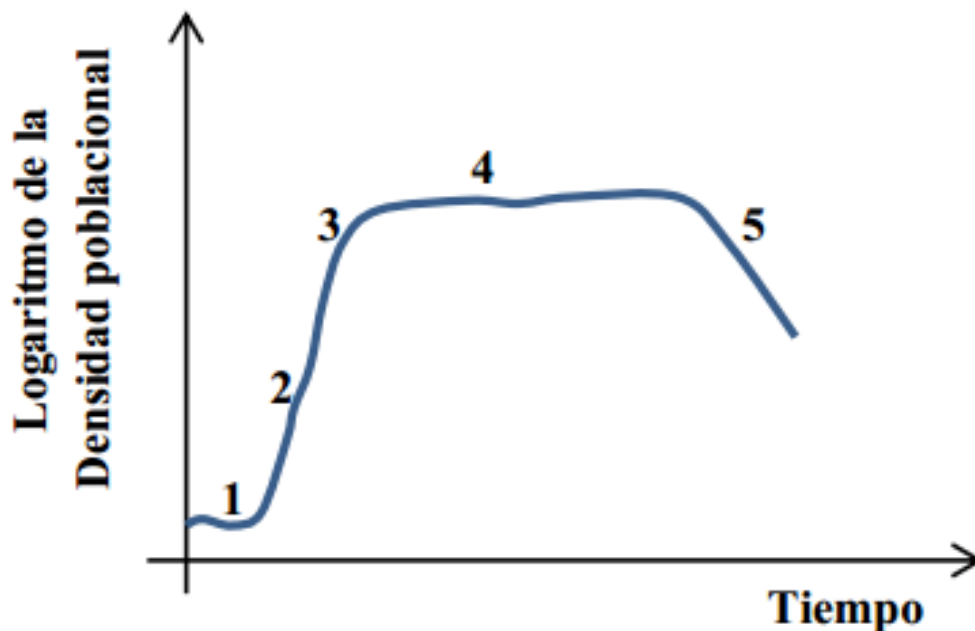


Ilustración 2. Curva de crecimiento cinético de la Microalga Fuente: [M. Díaz, 2004]

Nota: 1 Fase de adaptación, 2 Fase de crecimiento exponencial, 3 Fase de crecimiento lineal, 4 Fase estacionaria, 5 Fase de muerte.

4.3 FOTOBIORREACTOR

4.3.1 DISEÑO DE FOTOBIORREACTORES

El diseño de reactores químicos es un área en la que convergen varias ramas de la ingeniería y del conocimiento como lo muestra la Ilustración 3. (C. Contreras, 2003, pág. 450)



Ilustración 3. Componentes del reto Multidisciplinario. Fuente: [C. Contreras, 2003]

Los fotobiorreactores son una clase especial de reactores. La palabra que los denomina está compuesta por dos prefijos griegos: foto (luz) y bio (vida); con lo cual se alude al hecho de que son reactores que proporcionan o que están expuestos a la luz para hacer crecer en su interior organismos que realizan fotosíntesis. Actualmente se conocen múltiples modelos de fotobiorreactores. La Ilustración 4 muestra algunos de ellos: (C. Contreras, 2003)

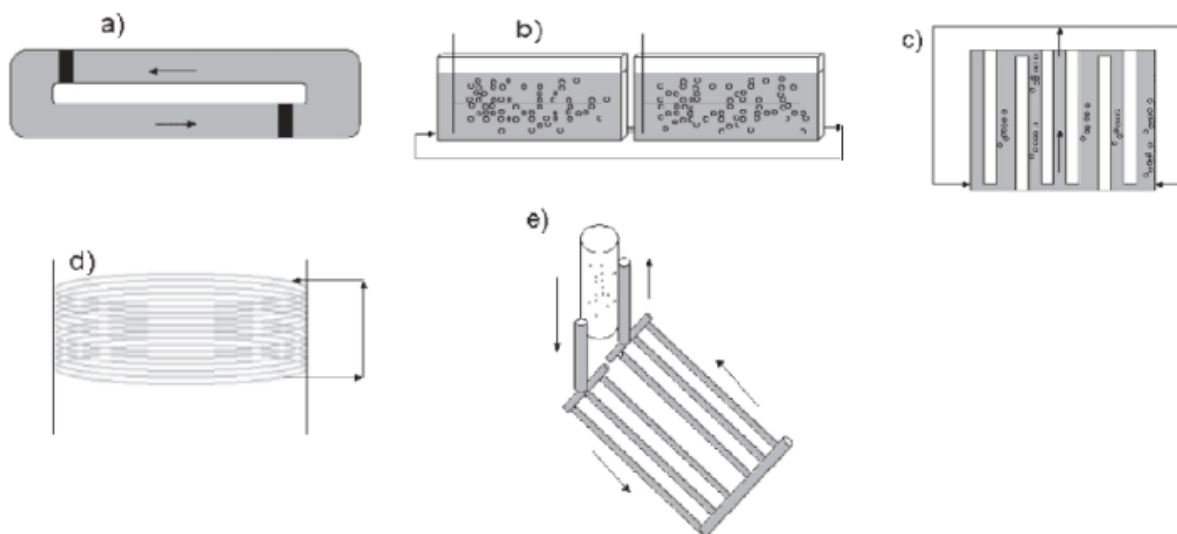


Ilustración 4. Diferentes modelos de Fotobiorreactores. Fuente: [C. Contreras, 2003]

Autores como (Doran, 1998) o (C. Contreras, 2003) recomiendan las siguientes consideraciones heurísticas a la hora de diseñar un fotobiorreactor:

- ✓ La trayectoria de la luz debe ser pequeña ($< 10\text{cm}$)
- ✓ Mantener una alta densidad celular ($> 8 - 15\text{g}=\text{L}$ base húmeda)
- ✓ Un mezclado vigoroso para asegurar ciclos de recirculación de alta frecuencia y garantizar la exposición lumínica frecuente de todas las células.
- ✓ Usar tramos cortos de tubería (20-30m) para evitar inhibición del crecimiento por acumulación de O_2 .
- ✓ Evitar acumulación de sustancias inhibitorias.
- ✓ Mantener temperatura y pH óptimos.
- ✓ Si el reactor es en columna de burbujeo, la altura de la columna debe ser por lo menos 2 veces mayor que su diámetro.

4.3.2 FOTOBIORREACTORES AIRLIFT

Los reactores *airlift* (reactores de tiro o corriente de aire) constituyen una amplia familia de reactores de al menos dos fases: una fase líquida a través de la cual se burbujea aire.

Frecuentemente cuentan con sólidos suspendidos. Muchos contienen sólidos en suspensión. (Doran, 1998, pág. 457), (Becker, 1994, pág. 293).

Los reactores *airlift* se diferencian de los de columnas de burbujeo, porque en ellos las corrientes de flujo ascendentes se separan físicamente de las descendentes. Para ello, los reactores *airlift* cuentan con varias estructuras bien definidas:

- ✓ Columna de burbujeo (*riser* o *upflow*): guía las burbujas hacia el separador de gases. En ella, el flujo es ascendente.
- ✓ Columna de flujo descendente (*downcomer* o *downflow*): sin burbujas; como su nombre lo indica, en esta parte se establece un flujo descendente debido a una mayor densidad aparente que en el *riser*.
- ✓ Separador de gases: ubicado en el extremo superior del reactor, es el lugar donde ocurre la separación de las burbujas que llegan por el *riser*, este se une con el *downcomer*.
- ✓ Base: parte inferior del reactor, allí se unen, una vez más, el *riser* y el *downcomer*. En esta parte se introducen las burbujas por el *riser*.

El riser, el separador de gases, el downcomer y la base enmarcan de esta manera una continua corriente interna de mezclado. La Ilustración 5 nombra estas partes en un *airlift* tubular de riser concéntrico (a) y en otro con downcomer concéntrico (b).

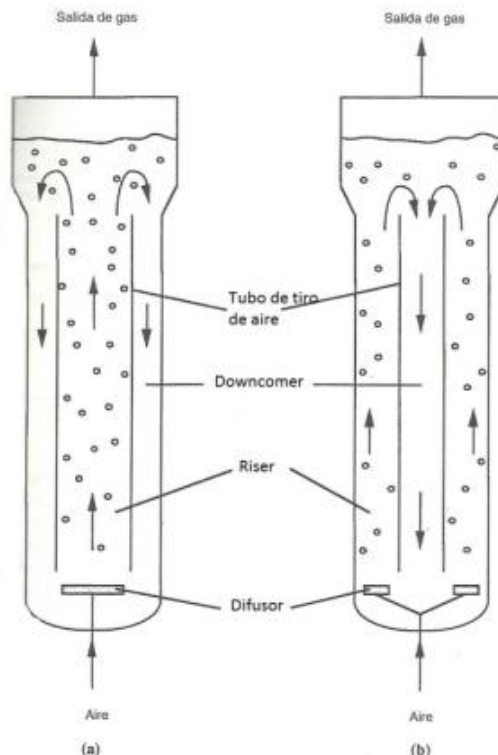


Ilustración 5. Partes características de un reactor airlift. Fuente: [Becker, 1994]

4.3.3 CONFIGURACIONES DE FOTOBIOREACTORES AIRLIFT

Como se mencionó anteriormente, los reactores *airlift* cuentan con las siguientes partes: *riser*, *downcomer*, base, separador de gases y difusor. La elección del tipo de cada una de ellas determina la configuración del reactor. Por ejemplo, la separación que se elige entre el *riser* y el *downcomer* establece dos grandes categorías de reactores *airlift*: reactores de bucle interno (el *riser* se separa del *downcomer* por tubos o superficies sumergidas) y reactores de bucle externo (el *riser* y el *downcomer* son independientes). La Tabla 2 expone las diferentes opciones para cada estructura. (Gluz, Bioreactors. Airlift reactors, 2010, págs. 320-353)

Riser	Liso o con baffles. Con múltiples perforaciones Ilustración 6 a) I o sin ellas. Con o sin agitación adicional Ilustración 6 b) I
Downcomer	Con o sin empaque. Con baffles o sin ellos Ilustración 6 f) I
Base	Redondeada, cónica, con agitación mecánica, con sistema de levantamiento adicional Ilustración 6 a) I
Separador de gas	Agitado o sin agitar. Ver Ilustración 6 II
Difusor	Difusor poroso, difusor de orificio, difusor de boquillas, difusor agitados, difusor eyector-inyector

Tabla 2. Posibles configuraciones de las diferentes partes de un reactor airlift

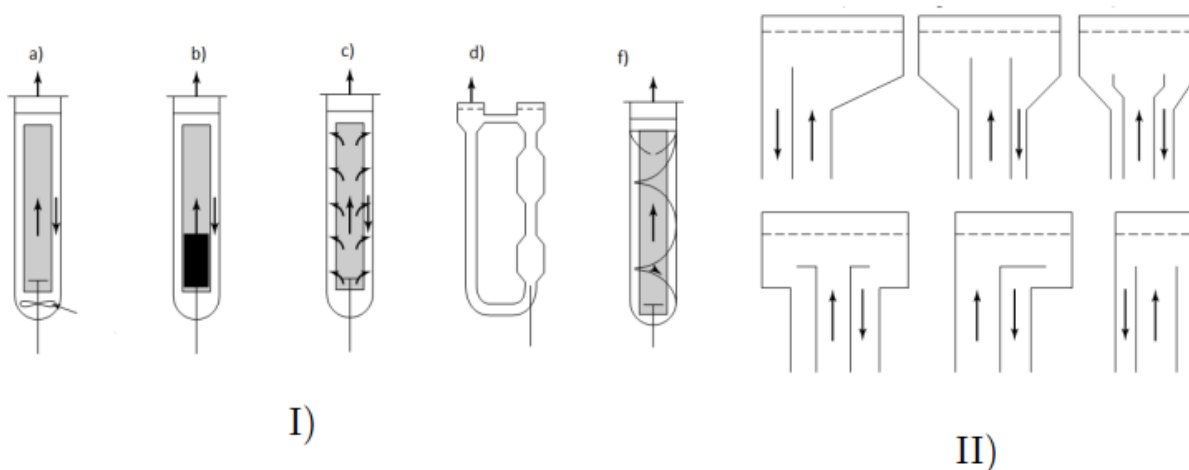


Ilustración 6. Configuraciones especiales de reactores airlift. Fuente: [Gluz, Bioreactors]

4.4 TEMPERATURA

La temperatura es una magnitud referida a las nociones comunes de calor medible mediante un termómetro. En física, se define como una magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica. Más específicamente, está relacionada directamente con la parte de la

energía interna conocida como energía cinética, que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, sea en un sentido traslacional, rotacional, o en forma de vibraciones. A medida que sea mayor la energía cinética de un sistema, se observa que este se encuentra más «caliente»; es decir, que su temperatura es mayor. (Yanus, 2009)

4.5 AGITACIÓN

La agitación relacionada con las burbujas influye sobre el kLa ; factor del que depende la transferencia de masa de CO_2 desde la fase gaseosa a la fase líquida, que es la que ofrece la mayor resistencia al paso del gas a la célula y afecta el metabolismo y crecimiento de la Microalga. Se determinó que con un buen sistema de agitación se incrementa el tiempo de retención del gas de las burbujas de CO_2 y, por lo tanto, se modifica el coeficiente de transferencia de masa.

En los fotobiorreactores tipo airlift, que se caracterizan por dar prelación a la transferencia de masa, se aumenta la retención del gas con la modificación del riser y downcomer respecto a la relación de áreas; de esto se advierte que es necesario controlar la proporción $[ATd/ATR]$ y de esta forma aumentar el coeficiente de transferencia de masa y la concentración del cultivo. A su vez, se estableció la importancia de dar prelación a la cantidad y tamaño de los aspersores en el difusor, para evitar tamaños inadecuados que desde la generación de la burbuja perjudiquen el aprovechamiento que pueda obtener la Microalga del CO_2 . (Moreno, 2017)

4.6 pH

El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución. El pH indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en determinadas disoluciones. La sigla significa potencial de hidrógeno o potencial de hidrogeniones.

En disolución acuosa, la escala de pH varía, típicamente, de 0 a 14. Son ácidas las disoluciones con pH menores que 7 (el valor del exponente de la concentración es mayor, porque hay más iones hidrógeno en la disolución). Por otro lado, las disoluciones alcalinas tienen un pH superior a 7. La disolución se considera neutra cuando su pH es igual a 7, por ejemplo, el agua. (Wang, 2008, pág. 79)

4.7 LUMINOSIDAD

Todos los organismos requieren de una fuente de energía para su crecimiento. Los organismos fotótrofos son los que utilizan la luz como fuente de energía. La luz a radiación visible, es la radiación electromagnética en el rango de 400 a 700 nm, la cual es sensible al ojo humano, razón por la cual, es usada por las algas y plantas para la fotosíntesis. La radiación visible también es llamada radiación fotosintética activa (PAR por sus siglas en inglés).



La fotosíntesis es el proceso en el cual los fotótrofos capturan y convierten la energía de fotones (cantidad de energía electromagnética) a energía utilizada bioquímicamente y es a través de la fotosíntesis que los fotótrofos obtienen la energía y poder reductor necesario para incorporar CO₂ y la fabricación de moléculas orgánicas que se requieren para el crecimiento. (F. Lopez, 2010)

4.8 SISTEMAS EMBEBIDOS

Se trata de un sistema de computación diseñado para realizar una o algunas funciones dedicadas frecuentemente en un sistema de computación en tiempo real. Al contrario de lo que ocurre con los ordenadores de propósito general (como por ejemplo una computadora personal o PC) que están diseñados para cubrir un amplio rango de necesidades, los sistemas embebidos se diseñan para cubrir necesidades específicas. (Valvano, 2010)

4.8.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS SISTEMAS EMBEBIDOS

Las características básicas de los sistemas embebidos son las siguientes: (Valvano, 2010)

- ✓ Deben ser confiables.
- ✓ La confiabilidad, en inglés reliability $R(t)$, es la probabilidad de que el sistema trabaje correctamente dado que está funcionando en $t=0$.
- ✓ La mantenibilidad, en inglés Maintainability $M(d)$, es la probabilidad de que el sistema vuelva a trabajar correctamente a unidades de tiempo después de un fallo.
- ✓ La disponibilidad, en inglés Availability $A(t)$, es la probabilidad de que el sistema esté funcionando en el tiempo t .
- ✓ La seguridad informática: consiste en disponer de una comunicación confidencial y autenticada.
- ✓ La creación de un sistema confiable debe ser considerada desde un comienzo, no como una consideración posterior.
- ✓ Deben ser eficientes en cuanto a la energía, al tamaño de código, al peso y al costo.
- ✓ Están dedicados a ciertas aplicaciones.
- ✓ Interfaces de usuario dedicadas (sin ratón, keyboard y pantalla)

4.9 CYPRESS SEMICONDUCTOR

Es una empresa estadounidense de diseño y fabricación de semiconductores. Ofrece memorias flash NOR, microcontroladores F-RAM y SRAM Traveo, las únicas soluciones programables de sistema en chip de PSoC, circuitos analógicos y de gestión de potencia PMIC, controladores de sensibilidad táctil CapSense, soluciones de conectividad inalámbrica BLE Bluetooth Low-Energy y USB. (Cypress, 2017)





Ilustración 7. Logo Cypress Semiconductor. Fuente: [Cypress, 2017]

4.10 PSoC 5LP

PSoC 5LP ofrece un rendimiento de procesamiento paralelo inigualable con un Bloque de filtro digital (DFB) de 24 bits, 24 UDB y un controlador DMA de alto rendimiento. El PSoC 5LP le permite reducir el costo de la lista de materiales (BOM) al integrar un Analog Front End (AFE) configurable, la lógica digital y los circuitos integrados de interfaz de usuario, con una CPU ARM Cortex-M3 en una solución de un solo chip. PSoC 5LP está disponible en encapsulados del tipo Chip Scale Packages (CSP), lo que le permite diseñar con la flexibilidad de PSoC en aplicaciones de factor de forma pequeño como dispositivos portátiles, productos de acondicionamiento físico y dispositivos móviles. (Cypress, 2017)

PSoC 5LP también lo ayuda a simplificar el diseño de la arquitectura de alimentación de su sistema al admitir el rango de voltaje operativo más amplio y múltiples dominios de alimentación en un solo SoC.

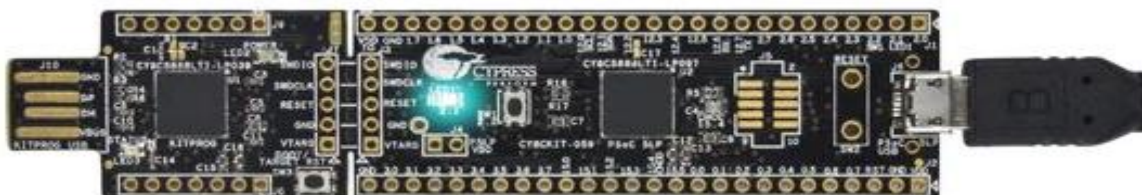


Ilustración 8. Diseño tarjeta PSoC 5LP-097. Fuente: [Cypress, 2017]

4.10.1 ASPECTOS DESTACADOS PSOC 5LP

- CPU ARM Cortex-M3 de 32 bits, 32 entradas de interrupción
- Controlador de acceso directo a memoria (DMA) de 24 canales, con transferencia de datos entre ambos periféricos y memoria
- Procesador de filtro digital de punto fijo de 24 bits (DFB) con 64 derivaciones.
- 20+ bloques de construcción universales y periféricos analógicos precisos
- Hasta 62 sensores CapSense® con autoajuste SmartSense™

- AFE multiplexado con Opamps programables, ADC SAR de 12 bits y DAC de 8 bits
- Unidad LCD de 736 segmentos para pantallas personalizadas
- Paquetes: QFN de 68 pines, WLCSP de 99 pines, TQFP de 100 pines

4.10.2 ARQUITECTURA PSOC 5LP

Enrutamiento e interconexión programable

Esto le permite reencaminar las señales a los pines seleccionados por el usuario, eliminando las restricciones de un controlador de periféricos fijos. Además, los buses globales permiten la multiplexación de señales y las operaciones lógicas, eliminando la necesidad de un diseño de compuerta de lógica digital complicado. (Cypress, 2017)

Bloques analógicos y digitales configurables

La combinación de circuitos analógicos y digitales configurables es la base de la plataforma PSoC. Puede configurar estos bloques utilizando funciones de biblioteca pre-construidas o creando las suyas propias. Al combinar varios bloques digitales, puede crear recursos lógicos de 16, 24 o incluso 32 bits de ancho. Los bloques analógicos están compuestos por una variedad de bloques de condensador, amplificador operacional, comparador, ADC, DAC y filtro digital, lo que permite flujos de señales analógicas complejas. (Cypress, 2017)

Subsistema de CPU

PSoC ofrece un sofisticado subsistema de CPU con SRAM, EE PROM y memoria flash, múltiples opciones de núcleo y una variedad de recursos esenciales del sistema que incluyen: (Cypress, 2017)

- Oscilador interno principal y de baja velocidad.
- Conectividad a un oscilador de cristal externo para precisión, temporización programable
- Temporizadores de dormir y vigilancia
- Múltiples fuentes de reloj que incluyen un PLL



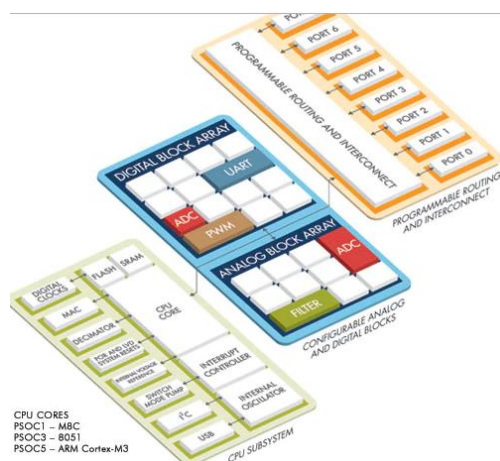


Ilustración 9. Arquitectura PSoc 5LP. Fuente: [Cypress, 2017]

4.11 PSoC CREATOR

PSoC Creator es un entorno de diseño integrado (IDE) que permite la edición simultánea de hardware y firmware, compilación y depuración de sistemas PSoC y FM0+. Las aplicaciones se crean mediante la captura esquemática y más de 120 componentes periféricos pre-verificados y preparados para la producción. Los componentes son periféricos analógicos y digitales representados por un símbolo que los usuarios arrastran y sueltan en sus diseños y configuran para adaptarse a una amplia gama de requisitos de aplicación.

Cada componente en el rico catálogo que ofrece Cypress, se configura con un diálogo de personalización e incluye un conjunto completo de bibliotecas de API generadas dinámicamente. Después de configurar todos los periféricos, el firmware puede ser escrito, compilado y depurado dentro de PSoC Creator o exportado a IDEs de terceros líderes como IAR Embedded Workbench®, ARM® Microcontroller Development Kit y Eclipse™. Los sistemas PSoC y FM0+, optimizan la energía más allá de una MCU típica porque PSoC Creator optimiza los diseños para permitir sólo la funcionalidad requerida. Los usuarios pueden incluso crear componentes personalizados utilizando diagramas de máquina de estado o Verilog para optimizar aún más el uso de hardware y energía. (Semiconductor, 2015)

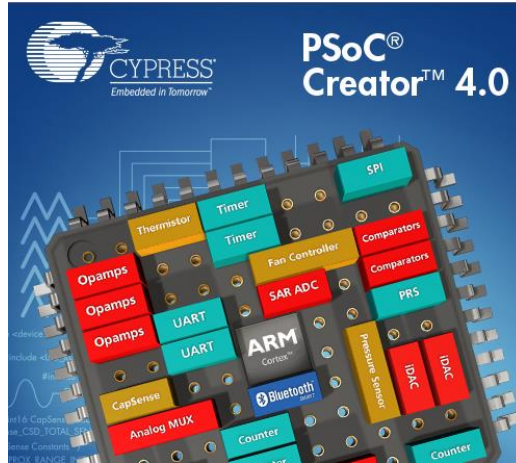


Ilustración 10. Logo IDE PSoC Creator V4.0. Fuente: [Semiconductor, 2015]

PSoC Creator

- Diseño de hardware con captura esquemática completa y herramienta de cableado fácil de usar.
- Más de 150 componentes pre-verificados y listos para la producción.
- Biblioteca de comunicaciones completa incluyendo I2C, USB, UART, SPI, CAN, LIN y Bluetooth Low Energy.
- Periféricos digitales con potentes herramientas de configuración gráfica.
- Amplio soporte de cadena de señal analógica con amplificadores, filtros, ADC y DAC.
- Bibliotecas de API generadas dinámicamente.
- C compilador de código fuente gratuito sin limitaciones de tamaño de código. (Semiconductor, 2015)

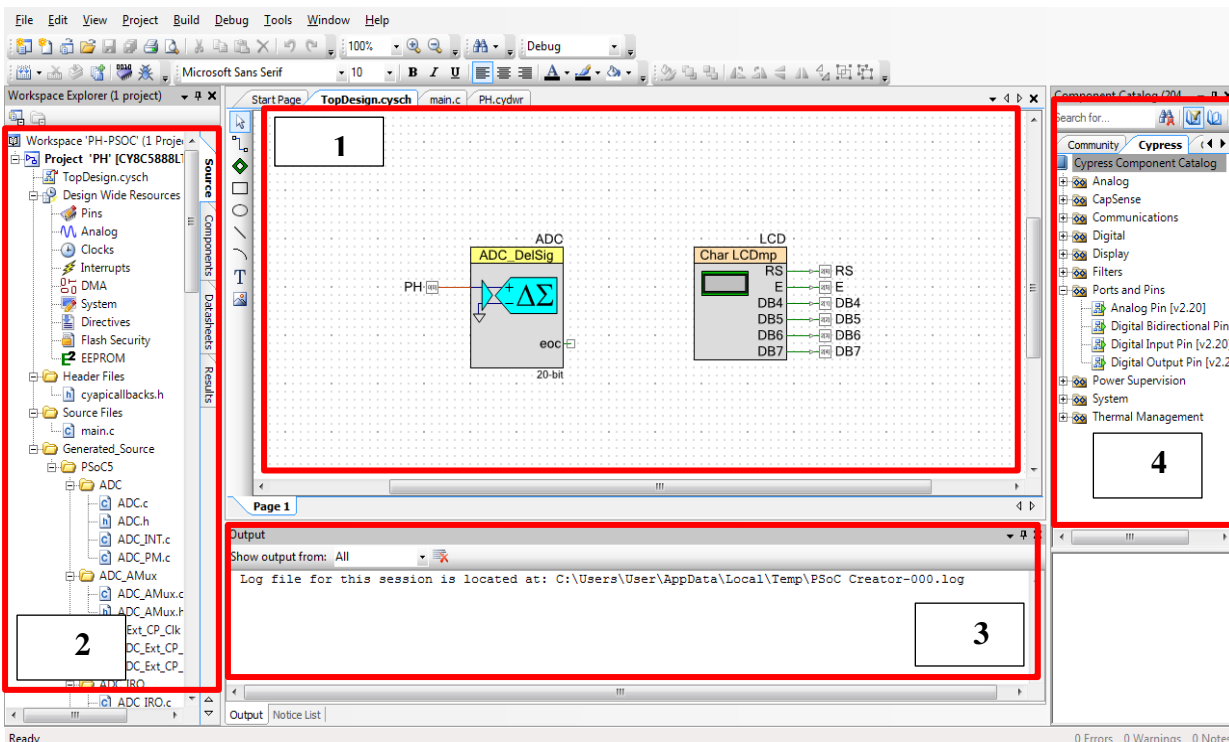


Ilustración 11. Entorno de Programación PSoC Creator. Fuente: [El Autor]

1. Programación a partir de los bloques digitales y analógicos.
2. Firmware de su aplicación con el hardware PSoC
3. Ventana de mensajes de error y precaución, así como visualización de compilación
4. Biblioteca de componentes, bloques, pines, etc.

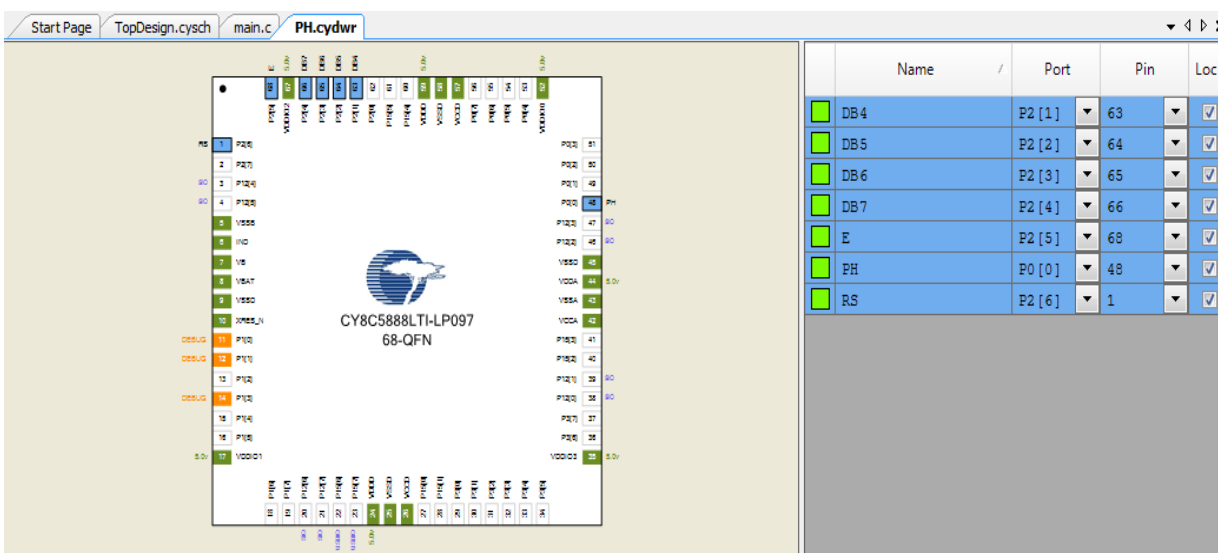


Ilustración 12. Ventana Asignación y Configuración de pines E/S. Fuente: [El Autor]

```

1  //=====
2  *
3  * Copyright YOUR COMPANY, THE YEAR
4  * All Rights Reserved
5  * UNPUBLISHED, LICENSED SOFTWARE.
6  *
7  * CONFIDENTIAL AND PROPRIETARY INFORMATION
8  * WHICH IS THE PROPERTY OF your company.
9  *
10 //=====
11
12 #include "project.h"
13 #include "stdio.h"
14 #include "math.h"
15
16 int32 enteros;
17 float32 VoltsADC;
18 double volt;
19 float ph;
20 char str1[12],str2[12];
21
22 int main(void)
23 {

```

Code Explorer (main.c)

- Include directives:
 - project.h
 - stdio.h
 - math.h
- Global Variables:
 - enteros : int32
 - VoltsADC : float32
 - volt : double
 - ph : float
 - str1 : char [12]
 - str2 : char [12]
- Function definitions:
 - main() : int

Ilustración 13. Ventana de Programación por código. Fuente: [El Autor]

4.12 LABVIEW

LabVIEW es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico pensado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido. (INSTRUMENTS, 2017)

Este programa fue creado por National Instruments (1976) para funcionar en máquinas MAC, salió al mercado por primera vez en 1986, teniendo versiones disponibles para las plataformas Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux actualmente. La penúltima versión es la 2013, con la increíble demostración de poderse usar simultáneamente para el diseño del firmware de un instrumento RF de última generación, a la programación de alto nivel del mismo instrumento, todo ello con código abierto. Y posteriormente la versión 2014 disponible en versión demo para estudiantes y profesional, la versión demo se puede descargar directamente de la página National Instruments. (INSTRUMENTS, 2017)

Su principal característica es la facilidad de uso, válido para programadores profesionales como para personas con pocos conocimientos en programación pueden hacer programas relativamente complejos, imposibles para ellos de hacer con lenguajes tradicionales. También es muy rápido hacer programas con LabVIEW y cualquier programador, por experimentado que sea, puede beneficiarse de él. Los programas en LabView son llamados instrumentos virtuales (VIs).



Ilustración 14. Logo Software LabVIEW. Fuente: [INSTRUMENTS, 2017]

4.13 SISTEMAS DE CONTROL

El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. El control automático se ha convertido en una parte importante e integral en los sistemas de vehículos espaciales, en los sistemas robóticos, en los procesos modernos de fabricación y en cualquier operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, Flujo, etc. Es deseable que la mayoría de los ingenieros y científicos estén familiarizados con la y la práctica del control automático. (Ogata, 2010)

4.13.1 SISTEMAS DE CONTROL REALIMENTADO.

Un sistema que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina sistema de control realimentado. Un ejemplo sería el sistema de control de temperatura de una habitación. Midiendo la temperatura real y comparándola con la temperatura de referencia (temperatura deseada), el termostato activa o desactiva el equipo de calefacción o de enfriamiento para asegurar que la temperatura de la habitación se mantiene en un nivel confortable independientemente de las condiciones externas. (Ogata, 2010)

4.13.2 CONTROLADOR P

En ciertos tipos de procesos es posible trabajar con una ganancia elevada sin tener ningún problema de estabilidad en el controlador. Muchos procesos que poseen una constante de tiempo dominante o son integradores puros caen en esta categoría. Una alta ganancia en un controlador P significa que el error en estado estacionario será pequeño y no se necesitaría incluir la acción integral. Un ejemplo característico en el que no es muy relevante el error en régimen permanente es el bucle interno de un controlador en cascada; el que la variable que se ha tomado como secundaria no alcance su valor no debe preocupar excesivamente. (Cantarero, 2013)

4.13.3 CONTROLADOR PD

En líneas generales, el control PD puede ser apropiado cuando el proceso a controlar incorpore ya un integrador. Por ejemplo, un proceso térmico con un buen aislamiento opera de forma análoga a un integrador. Casi toda la energía que se le suministra se emplea en elevar la temperatura del horno ya que las pérdidas son despreciables. Con esta clase de procesos es posible trabajar con ganancias elevadas en el controlador sin que sea necesario introducir la acción integral. La acción derivada es sensible al ruido ya que a altas frecuencias tiene una ganancia relativamente elevada, por lo tanto, en presencia de altos niveles de ruido se debe limitar dicha ganancia, o prescindir de la acción derivativa. Asimismo, en procesos con grandes tiempos muertos la acción anticipativa del término derivativo deja de ser efectiva ya que la aproximación lineal.

$$e(t + T_d) \approx e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}$$

tan sólo tiene validez para pequeños valores de T_d . Debido a los tiempos muertos hay un retardo antes de que los efectos de cualquier acción de control se puedan detectar sobre la variable de proceso. Es, por lo tanto, considerablemente mejor con esta clase de procesos intentar predecir su acción. (Cantarero, 2013)

4.13.4 CONTROLADOR PI

Es la estructura más usual del controlador. La introducción de la acción integral es la forma más simple de eliminar el error en régimen permanente. Otro caso en el que es común utilizar la estructura PI es cuando el desfase que introduce el proceso es moderado. La acción derivativa más que una mejora en esta situación es un problema ya que amplifica el ruido existente. También se recomienda la acción PI cuando hay retardos en el proceso, ya que como se ha visto en el punto anterior, la acción derivativa no resulta apropiada en este tipo de sistemas. Un tercer caso en el que se debería desconectar la acción derivativa es cuando el proceso está contaminado con niveles de ruido elevados. Como primera medida, se debería filtrar el ruido existente, pero en algunas ocasiones esto no es suficiente. (Cantarero, 2013)

4.13.5 CONTROLADOR PID

Un controlador PID (Controlador Proporcional, Integral y Derivativo) es un mecanismo de control simultáneo por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial. Este calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado.

El algoritmo del control PID consiste de tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor Proporcional depende del error actual. El Integral depende de los errores pasados y el Derivativo es una predicción de los errores futuros. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso por medio de un elemento de control como la posición de una válvula de control o la potencia suministrada a un calentador. (Cantarero, 2013)



4.13.6 CONTROLADOR ON-OFF

La salida del controlador ON-OFF, o de dos posiciones, solo puede cambiar entre dos valores al igual que dos estados de un interruptor. El controlador no tiene la capacidad para producir un valor exacto en la variable controlada para un valor de referencia dado pues el controlador produce una continua desviación del valor de referencia. El controlador mecánico de dos posiciones normalmente posee algo de histéresis, por el contrario, los controladores electrónicos usualmente funcionan sin histéresis. (Cantarero, 2013)

4.14 MODELADO DE SISTEMAS DE CONTROL

El objetivo de modelar un sistema, de caracterizarlo matemáticamente consiste en llegar a describirlo en la forma más completa, exacta y sencilla posible, para posteriormente analizarlo y poder realizar diseños de controladores de tal manera que su funcionamiento se adecue a los requerimientos de diseño. El modelo matemático se basa en una o varias ecuaciones que representan el comportamiento del sistema, pero no representan un único modelo, pues se pueden lograr representaciones diferentes del mismo sistema que no contradicen una a la otra. Sin embargo, es útil encontrar el modelo que proporcione información de interés para cada problema en particular. Las consideraciones y aproximaciones se realizan con base en las simulaciones iterativas de las respuestas que el modelo presenta con respecto a las que debería tener el sistema real. De la escogencia de estas se obtiene un modelo del sistema sobre el cual se realizará un controlador que tendrá éxito según la exactitud del modelo especificado. (H. I. SIERRA, 2010)

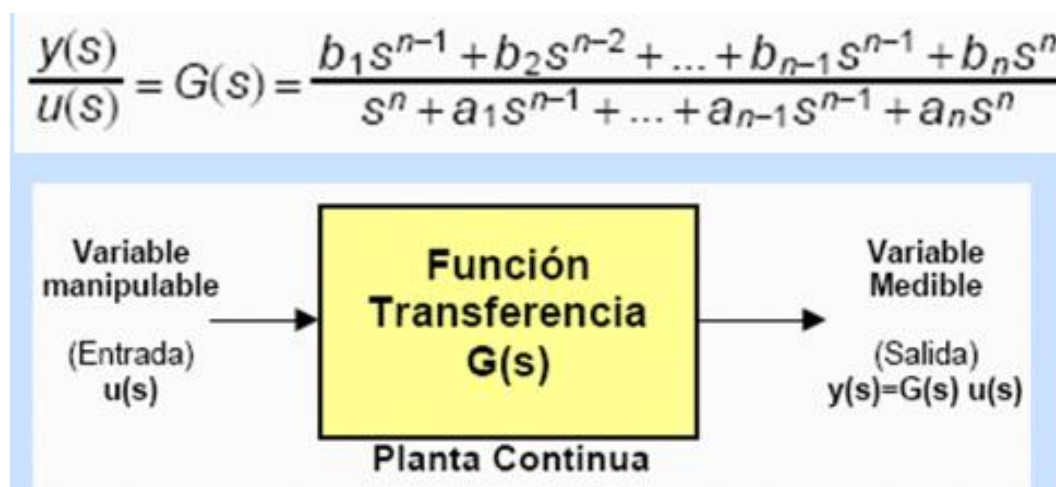
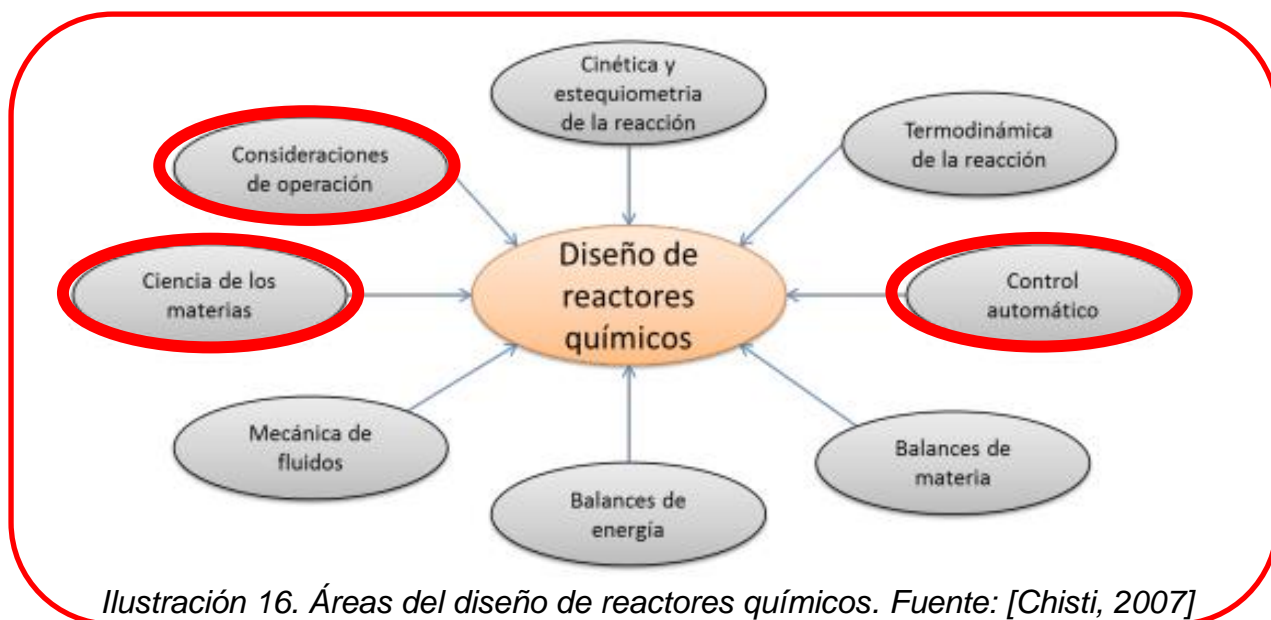


Ilustración 15. Ejemplo Modelado de un sistema, Función de Transferencia. Fuente: [H. I. SIERRA, 2010]

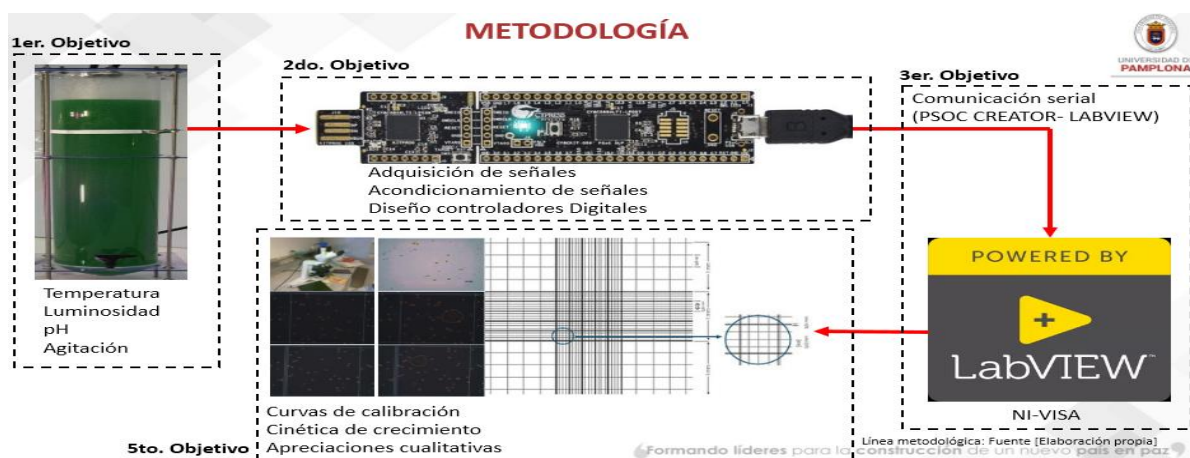
5. DISEÑO DEL PROTOTIPO

En esta sección del libro se podrá observar, cada una de las tareas llevadas a cabo para cumplir con los objetivos del proyecto, donde el diseño es parte fundamental para el buen funcionamiento del control y monitoreo, ya que de estos dos aspectos depende la producción de biomasa microalgal.

El diseño de fotobiorreactores es un área en la que convergen varias ramas de la ingeniería y del conocimiento (Chisti, 2007), como lo muestra la ilustración 16, por lo cual solo nos centraremos en tres aspectos muy importantes:



La metodología que se llevara a cabo es el desarrollo por etapas, donde cada etapa nos ayuda a cumplir con un objetivo propuesto, en la ilustración 17 se observara la metodología correspondiente:



Primer objetivo: A partir de la revisión bibliográfica, escoger aquellas variables que sean más relevantes en el proceso del fotobiorreactor, así mismo como establecer sus parámetros de funcionamiento.

Segundo objetivo: Establecer el corazón central del controlador, para lo cual se deberá adquirir las señales de cada sensor, acondicionamiento de estas señales y finalmente diseñar el controlador que más se ajuste a las variaciones de cada señal.

Tercer objetivo: Establecer una comunicación serial entre la tarjeta de adquisición y el software donde se desarrollará el monitoreo, de igual forma se debe realizar una interfaz gráfica que sea amigable con el usuario.

Cuarto objetivo: En esta parte se deberá implementar los resultados obtenidos del diseño de controladores y monitoreo (Objetivo 1, Objetivo 2).

Quinto objetivo: Este objetivo no hará parte del diseño, por el contrario, entrará en la etapa de análisis y evaluación de resultados, que tendrá que contar con: curvas de calibración, cinética de crecimiento, y apreciaciones cualitativas.

5.1 VARIABLES DE DISEÑO Y PARÁMETROS DEL PROTOTIPO

Las variables a controlar y monitorear son las siguientes:

- Temperatura.
- Luminosidad.
- pH.
- Agitación.

Los parámetros sobre los cuales se deben estabilizar y controlar cada variable son los siguientes:

Temperatura: Para la medición de esta variable, se plantea realizar una diferencia entre la temperatura del armario y la temperatura interna del fotobiorreactor, así mismo será una variable de medición continua, con la cual se desarrollará su debido controlador.

$$Temp = 28^{\circ}C - 30^{\circ}C$$

Luminosidad: La cantidad de luz sobre la superficie del fotobiorreactor debe ser uniforme, será una variable de medición continua, y contará con su debido controlador.

$$Potencia Tubos Led = 6 W - 9 W$$

$$Distancia Tubo Led - Fotobiorreactor = 20cm$$



pH: El potencial de Hidrogeno al ser una propiedad variable de la sustancia dentro del fotobiorreactor, debe ser una medición continua, y contará con su debido controlador.

$$pH = 7 \rightarrow \text{Microalga: } Chlorella \text{ sorokiniana}$$

Agitación: Sera por presión neumática, ya que por aireación se obtiene una buena agitación y esencialmente se evita dañar las células microalgal, tendrá dos entradas de aire cada una controlada por un rotámetro, por lo cual no habrá un control digital.

$$\text{Presión} = 3.5 \text{ PSI} \rightarrow \text{Caudal} = 2 \text{ LPM}$$

5.2 VARIABLES DE OPERACIÓN

Una vez construidos los fotobiorreactores, el correcto funcionamiento y desempeño de estos depende de las siguientes variables de operación: (Fernández, 2016)

- Relación volumétrica o de masa del gas burbujeado con respecto a la cantidad de medio.
- Nivel del líquido por encima del riser.
- Duración de los fotoperiodos.
- Intensidad lumínica suministrada.

5.3 VARIABLES DE RESPUESTA

Las siguientes variables preocupan y determinan en gran medida el diseño y la operación de fotobiorreactores airlift: (Fernández, 2016)

- Tiempo de contacto entre la burbuja y el medio de cultivo.
- Tránsito de masa.
- Velocidad de circulación del medio.
- Disponibilidad de nutrientes.
- Disponibilidad lumínica.

5.4 RELACIONES DE DISEÑO Y ECUACIONES

(Gluz, Bioreactors, airlift reactors., 2010) propone una gran cantidad de ecuaciones empíricas para determinar el levantamiento de reactores airlift de bucle internos y de esta manera su fluido mecánico:



$$\Delta P = \varphi L G (\varphi r - \varphi d)$$

$$J_{Gr} = \frac{Q_{in} + Q_d}{A_r}$$

$$\varphi r = 0.441 J_{Gr}^{0.841} \mu_{ap}^{-0.135}$$

$$\varphi d = 0.297 J_{Gr}^{0.935} \mu_{ap}^{-0.107}$$

La diferencia de presión entre el *riser* y el *downcomer* (ΔP) está dada por la densidad del líquido φL , la gravedad g y la diferencia en el levantamiento entre las dos secciones ($\varphi r - \varphi d$) El levantamiento depende a su vez de la velocidad J_{Gr} en el *riser*. ($Q_{in} + Q_d$) son los caudales de área burbujeado y recirculado. (Gluz, Bioreactors. Airlift reactors, 2010)

5.5 MEDIDAS DEL MODELO CONSTRUIDO

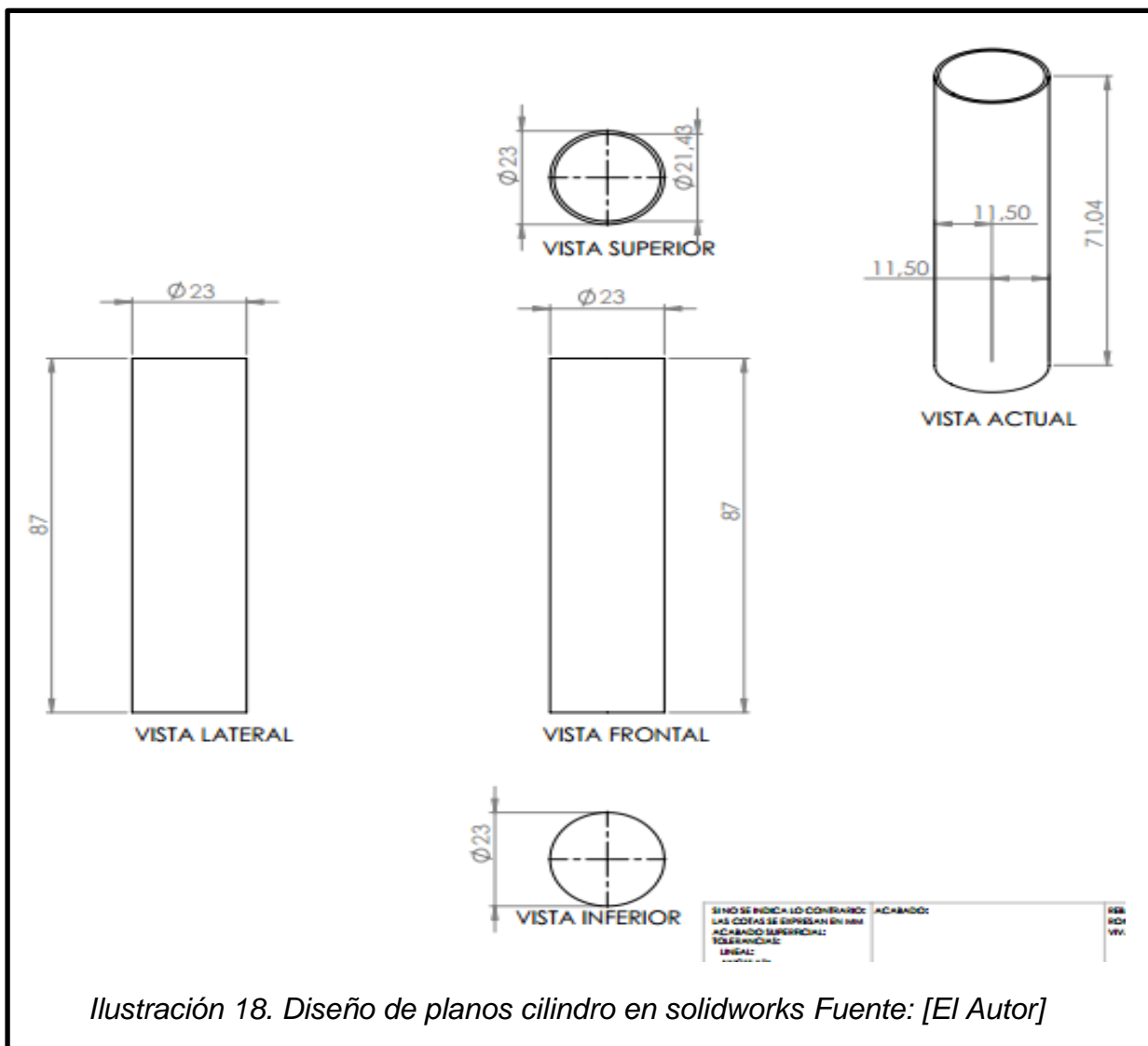
En la Tabla 3 se podrá observar cada una de las medidas del diseño con el cual se construyó el prototipo.

DIMENSIONES DEL FOTOBIORREACTOR AIRLIFT	
Altura del cilindro (cm)	87
Altura columna de burbujeo (cm)	58
Diámetro del reactor (cm)	23
DIMENSIONES DEL ARMARIO DE CONTROL	
Altura del armario (cm)	120
Ancho del armario (cm)	43
Profundidad del armario (cm)	43
CAPACIDAD DEL FOTOBIORREACTOR AIRLIFT	
Altura nivel del cultivo (cm)	61
Volumen total (Litros)	20

Tabla 3. Dimensiones del prototipo fotobiorreactor airlift



A continuación, se presentará una secuencia de imágenes y planos que muestran el diseño y estructura tanto del cilindro del fotobiorreactor como el armario de control:



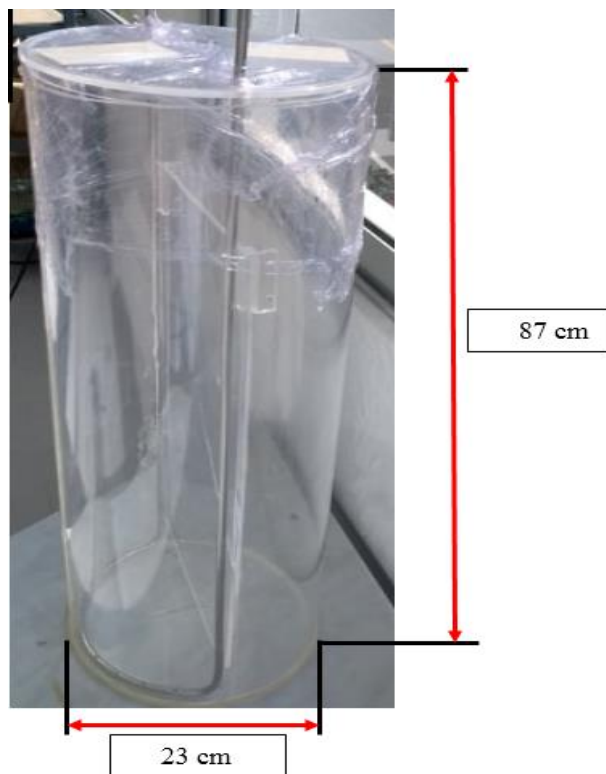


Ilustración 19. Estructura del fotobiorreactor airlift. Fuente: [El Autor]

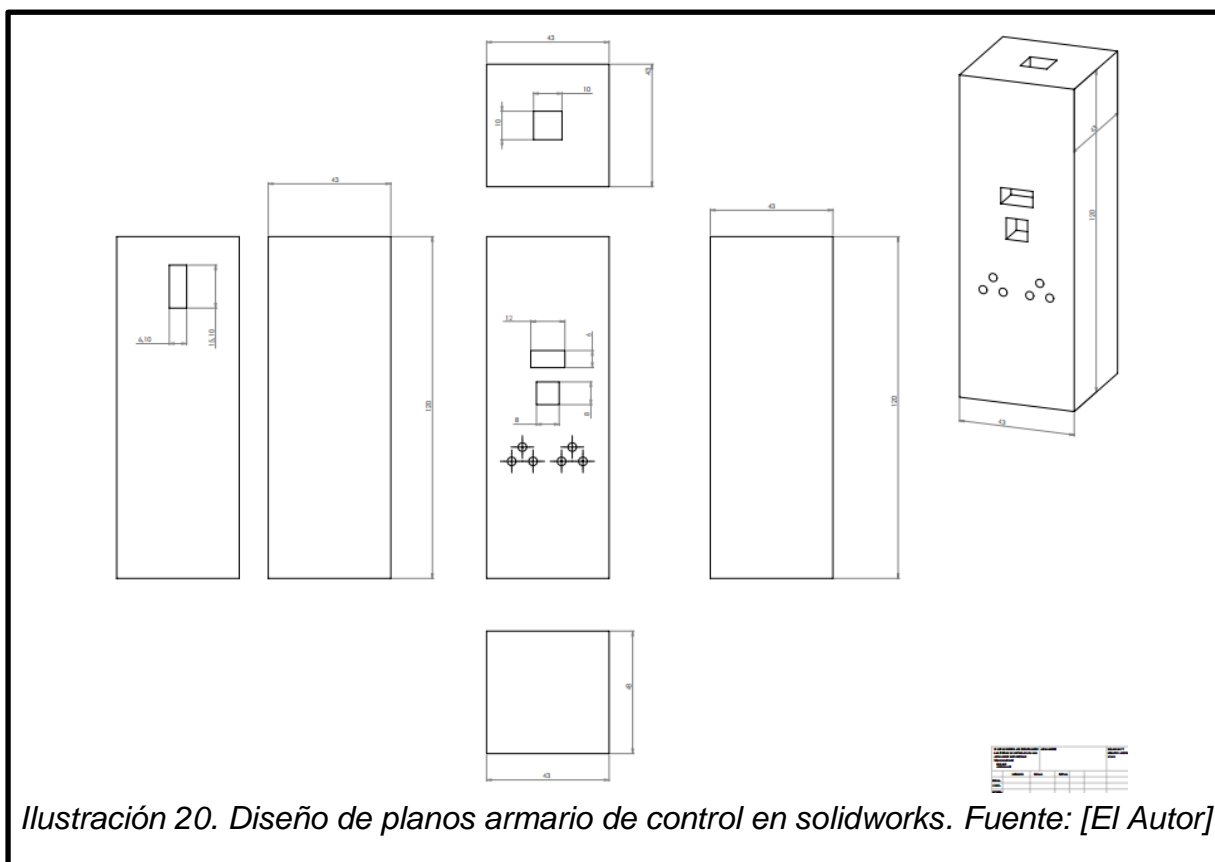


Ilustración 20. Diseño de planos armario de control en solidworks. Fuente: [El Autor]

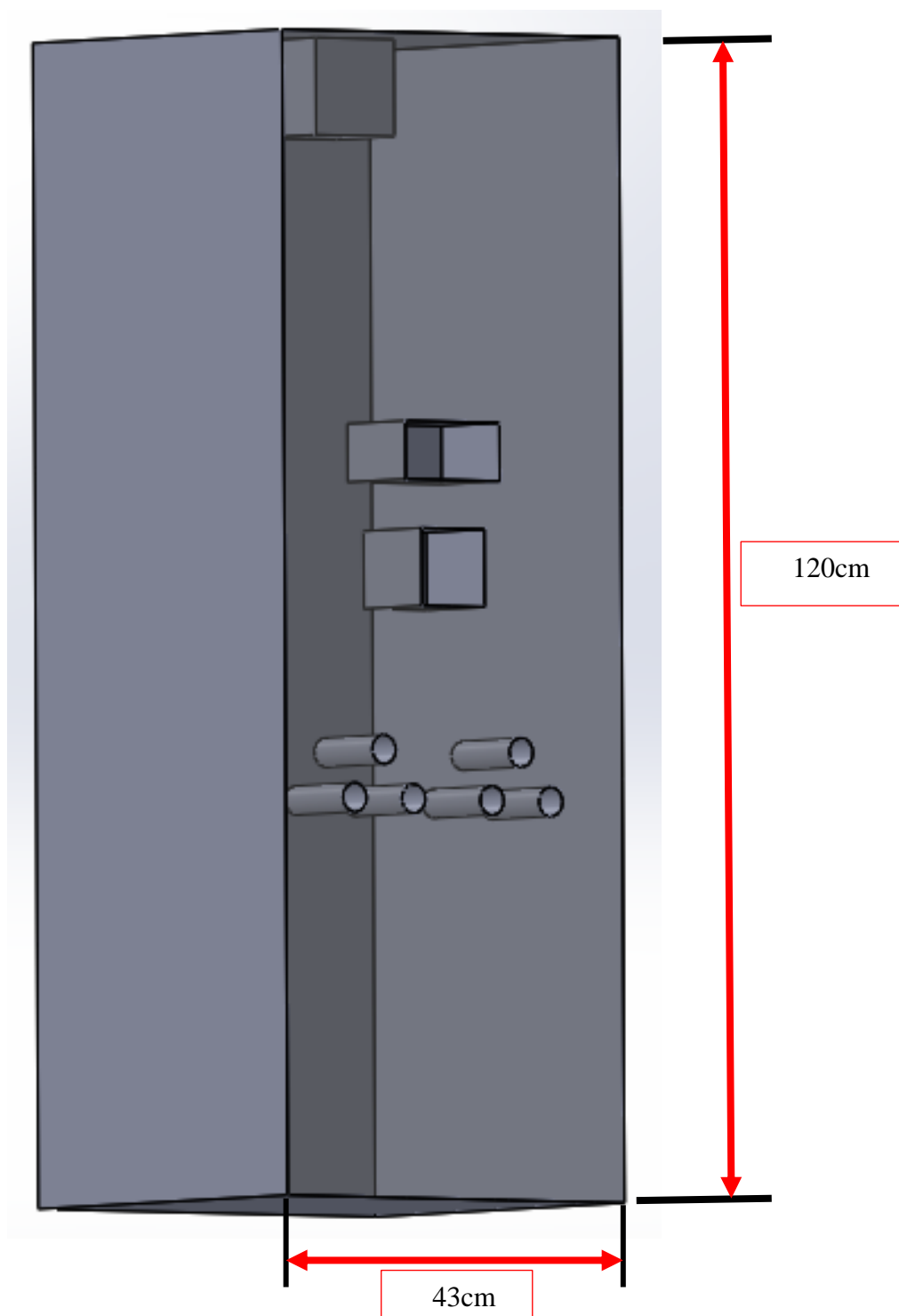


Ilustración 21. Estructura armario de control para el bioproceso. Fuente: [El Autor]

5.6 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Los avances en ingeniería de los materiales y ciencia de los materiales han multiplicado las opciones a la hora de escoger un material para cumplir con las especificaciones que requiere una aplicación. Existen diferentes metodologías para la selección de un material (desde graficas hasta bases de datos) pero todas estas parten de una hoja de especificación que responde a muchas de las siguientes preguntas: (Fernández, 2016)

- ¿A qué condiciones de temperatura estará sometido el material?
- ¿El material tendrá contacto con sustancias corrosivas o con las que pueda reaccionar?
- ¿El material debe ser impermeable y resistente al agua?
- ¿A qué tipo de solicitaciones (compresión, tracción, flexión) estará sometido el material y en qué magnitud?

En efecto, a menos que la fuente de luz sea interna al reactor el material de un fotorreactor debe filtrar o dejar pasar los rayos de luz. (Fernández, 2016)



Ilustración 22. Cilindro hecho a base de acrílico transparente. Fuente: [El Autor]

5.6.1 CRITERIO DE SELECCIÓN DE MATERIALES Y COMPONENTES ARMARIO DE CONTROL

¿Por qué encerrar el fotobiorreactor airlift?

Como proyecto investigativo, se requiere hacer algo diferente a lo ya existente, según nuestros conceptos será más fácil controlar las variables dentro del armario que con las influencias externas.

¿Explicar estructura y diseño?

Por razones económicas se hará en material tipo madera, su parte frontal con acrílico para observar lo que sucede con el proceso, a la estructura se fijaran los tubos led, el calentador y electroválvulas, externamente se ubicara la bomba de aire y la fuente de alimentación. En la parte frontal contara con un panel de control y una LCD para visualizar el comportamiento de las variables.

FOTOBIORREACTOR

¿Por qué usar una configuración Airlift?

Según ciertas referencias y practicas experimentales, concluimos que tiene una alta eficiencia energéticas, así mismo una alta tasa de transmisión de masa, como característica importante no daña las células como puede suceder con un agitador mecánico.

¿Por qué trabajar con un cilindro de 20 litros?

En el proceso de las microalgas se ven involucrados una gran cantidad de cultivos en una misma línea de tiempo, partiendo de las cepas e inóculos, hasta llegar a cultivos de escala media o alta, nos centramos en los cultivos a media escala (20 litros) justificado por el alto porcentaje de viabilidad del proyecto, no se trabaja a una escala mayor por razones de espacio. (Becker, 1994)

CAUDALIMETRO DE POLICARBONATO

¿Por qué usar un LPM Air cole parmer?

La agitación es una variable importante en este tipo de procesos, pero de fácil control, ya que su aireación es continua y estable, por esta razón decidimos que el control sea manual por medio de rotámetros, en este caso un sensor de caudal que nos convierte nuestra variable de presión PSI a caudal LPM.



¿Características del caudalímetro?

Precisión: +- 4%

Presión máx. (psi): 100

Caudal min (LPM)=0.4

Caudal máx. (LPM)=5

PSI: Presión: libra de fuerza por pulgada cuadrada

LPM: Caudal: Litros por minuto

BOMBA DE AIRE

¿Por qué usar una bomba de aire en vez de un compresor?

Primero que todo este tipo de proyectos esta direccionado en la línea de recursos naturales y medio ambiente, por lo cual generar una gran cantidad de gasto de energía eléctrica no sería justificable, por esta razón al no necesitar presiones de aire tan altas hago uso de una bomba de aire de acuario y no de un compresor el cual consume una gran cantidad de energía. (Chisti, 2007)

¿Cuáles son las ventajas de la bomba SOBO SB-348A?

Es una fuente de aire para acuario.

Bajo consumo de energía 5W.

Presión de aire suficiente para el proceso 3.5 PSI

Baja vibración y ruido.

Estructuras de 80 a 150 litros.

Doble salida de flujo.

SENSOR DE TEMPERATURA – PT100

¿Por qué usar una PT100 en vez de otro tipo de sensor?

Este tipo de sensor RTD se basa en la variación de su resistencia respecto a la temperatura.

Primero que todo es un sensor de alta precisión ideal para procesos con líquidos gracias a su estructura y material, segundo el componente PSoC posee un bloque RTD que acondiciona su señal sin necesidad de un circuito de acondicionamiento, lo cual facilita su implementación. (Cypress, 2017)

Rango: -50° a 400°C

Resistencias: 100Ω a 0°C



SENSOR DE TEMPERATURA – TERMISTOR

¿Cualidades de este sensor que lo hacen esencial para este tipo de trabajos?

Es un sensor totalmente sellado, aislado contra todo tipo de golpe, usualmente usado en los controles de temperatura de aire acondicionado y refrigeradores. Además, PSOC posee un bloque calculador Thermistor lo cual facilita la programación. (Cypress, 2017)

Rango: -40° a 120°C

Precisión: Alta

¿Por qué usar dos sensores de temperatura en el mismo proceso?

La estructura cuenta con dos etapas:

Etapas 1: Armario de control, donde se mide la variable de temperatura con el termistor.

Etapas 2: Fotobiorreactor, donde se mide la temperatura del proceso (liquido).

Como un plus del sistema de monitoreo y control podremos visualizar en tiempo real estas dos temperaturas y la desviación entre ellas.

SENSOR DE PH – MSP430

¿Por qué usar un sensor PH MSP430 en vez de otro tipo de sensor?

Tener en cuenta que este es un proyecto investigativo a nivel educativo, por lo cual se trata de disminuir la inversión económica, este sensor se encuentra en el mercado a muy buen precio, su rango y precisión no es tan buena como otros sensores más robustos, pero tienes las características necesarias para el proceso.

Rango pH: 0-14

Error: 0.3Ph

SENSOR DE LUMINOSIDAD – BH1750

¿Por qué es mejor este sensor respecto a otros que miden la luminosidad?

Al trabajar con PSoC 5LP, requerimos sensores cuyos protocolos de comunicación y adquisición sean compatibles con la tarjeta, este sensor tiene un protocolo I²C ideal para comunicar con PSoC, y su precisión es alta, cerca de igualar a un luxómetro.



ELECTROVÁLVULAS

¿Por qué usar electroválvulas para el suministro de base o ácido?

Como una variable importante a controlar se encuentra el pH, dependiendo de cómo esté la sustancia líquida se debe agregar sustancias base o sustancias ácidas, la forma más fácil es a partir de la activación de electroválvulas que permiten el flujo de estas según los tiempos requeridos.

Especificaciones de la electroválvula

Corriente es de 200mA → Esta varía según la presión del caudal, 200mA Nominal

Voltaje: DC 12 V

potencia: 8 W

Entrada y salida: para manguera de 1/2 " (diámetro exterior) de la manguera

Presión: 0.02-0.8Mpa

Temperatura máxima del líquido: 100 ° C

Modo de funcionamiento: normalmente cerrado

Tipo de válvula: diafragma (operado por Servo)

Uso: agua y fluidos de baja viscosidad

CALEFACTOR – CALENTADOR HANDY HEATER

¿Por qué generar más calor que el presente en el ambiente?

La etapa de investigación arrojo datos importantes, como los valores de las variables donde el cultivo de microalgas mejor se desarrolla, la temperatura ideal para este tipo de procesos se encuentra entre 28°C a 30°C.

En la ciudad de Pamplona exactamente en la Universidad de Pamplona en el laboratorio de Biología, la temperatura ambiente en el día solo alcanza valores cercanos a los 25°C después de una serie de datos tomados, en la noche la temperatura llega a valores de 9°C y a veces mucho menos, por lo cual es importante mantener la temperatura en el rango requerido.

¿Por qué usar este calentador y no de otro tipo?

El calentador HARDY HEATER es un calentador eléctrico de pared, lo cual lo hace perfecto por su tamaño al incorporarlo en la estructura del Armario de control.

Respecto a otros calentadores tiene una potencia baja de 400W, y nos permite regular su temperatura en un rango de 15°C a 32°C, perfecto para los valores requeridos.



SOFTWARE DE INTERFAZ GRÁFICA – LABVIEW

¿Por qué usar LABview para el diseño de la interfaz gráfica?

Elegí el software para el desarrollo de la interfaz porque a través de la materia de inteligencia artificial adquirí ciertos conocimientos que me motivaron hacer uso de este software por su programación didáctica por bloques e interfaces súper interesantes y amigables con el usuario, para ello descargué diferentes librerías para decorar cada uno de los elementos que componen la interfaz.

Es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico pensado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido. Por otra parte, no se deseó adquirir un tipo de HMI que tuviera su propio entorno de diseño, ya que los costos de estas son muy elevados y no accesibles para mi proyecto.

SISTEMA EMBEBIDO – PSoC 5LP

¿Por qué usar esta tarjeta y no otro tipo de embebido?

La razón más importante de usar este sistema embebido, es que el proyecto se lleva realizando aproximadamente desde principios del 2018 como un convenio multidisciplinario entre el semillero de recursos naturales y el semillero de sistemas embebidos, en este último se ha enfocado a la solución de problemas de adquisición de datos y control de sistemas químicos, biológicos, etc, a partir de la tarjeta PSoC 5LP.

La segunda razón es que a diferencia de otras tarjetas PsoC 5LP incorpora diferentes bloques de adquisición tanto análogos como digitales, todo esto a un precio muy bajo.

Para comparar la PSoC 5LP creo que el escenario perfecto sería contra una Arduino MEGA2560 ya que son tarjetas de la misma gama y económicamente precios similares, esta última muy usada a nivel mecatrónico y electrónico, y la adquisición de señales y desarrollo de programas relativamente fácil, por lo cual se puede deducir que el lenguaje de programación usado en PSOC CREATOR para la PSOC 5LP es un lenguaje de nivel alto.

PSoC 5LP

El PSoC® ofrece diversas opciones de CPU (M8C y 8051 de 8 bits, Cortex-M0 y Cortex-M3 de 32 bits) con SRAM, EEPROM y Memoria Flash, y una variedad de recursos del sistema esenciales, incluyendo:

- Oscilador principal y de baja velocidad interna.



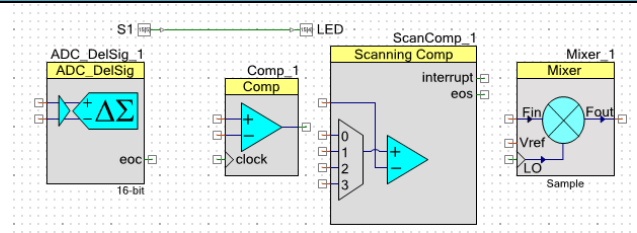
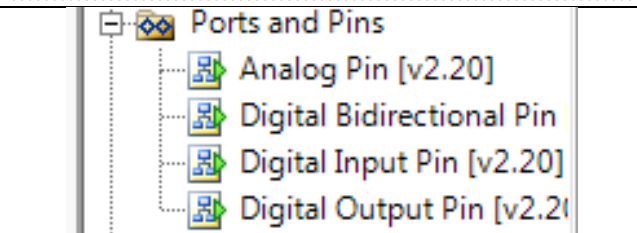
- Conectividad con oscilador externo o cristal externo de alta precisión, sincronización, programable.
- Modos de bajo consumo de energía y watchdog timer.
- Fuentes de reloj múltiples que incluyen un PLL.

Los PSoC® también incluyen las interfaces de comunicación I²C, Full-Speed USB 2.0, CAN 2.0, driver para manejo directo de LCD y capacidades de depuración en chip usando JTAG y depuración en serie.

	PSOC 5LP
CPU	ARM CortexM3 de 32 bits de alto rendimiento
OSCILADOR	Máximo 80MHz, 100 MIPS
MEMORIA	Flash de 32KB a 256KB SRAM de 16KB a 64KB
ALIMENTACIÓN	Operación desde 2.7 a 5.5V
CONSUMO	Activo: 2mA, Pausado: 2µA, Hibernado: 300nA
ADC	1 ADC DeltaSigma (8 a 20 bits) 2 ADCs SAR (12 bits) 192 ksps ;12 bits; 1 Msps; 12 bits Precisión de voltaje de ±1.0%
DAC	4 DACs (8 bits)
COMUNICACIÓN	FS USB 2.0, I2C, SPI, UART, LIN, I2S
SISTEMA DE PROGRAMACIÓN	JTAG on-chip, depura y simula; SWD, SWV
PINES DE E/S	Hasta 72

Tabla 4. Características más relevantes PSOC5LP

ENTORNO DE DESARROLLO PSOC CREATOR

	PSOC 5LP
	Programación Gráfica (por bloques)
	Pines de entrada y salida tanto digitales como análogos

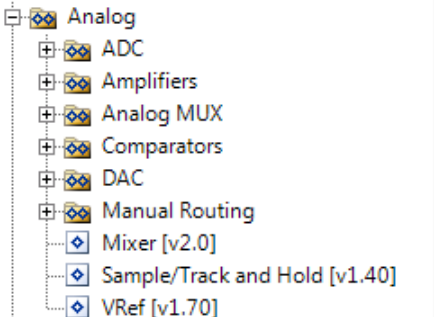
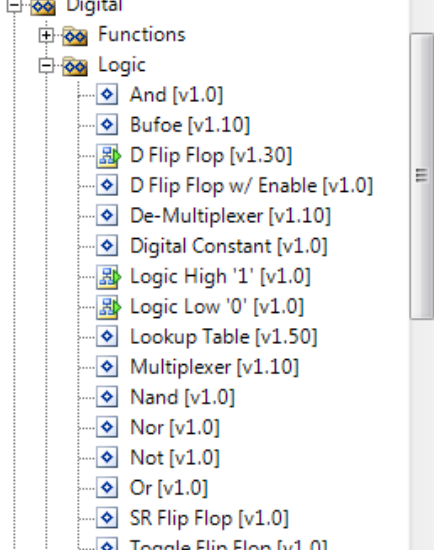
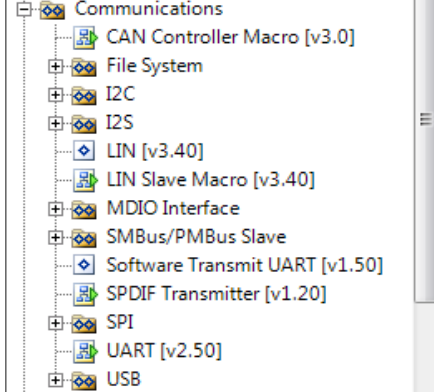
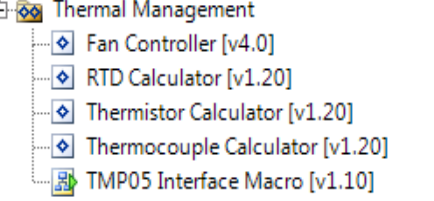
 <ul style="list-style-type: none"> [-] Analog <ul style="list-style-type: none"> [+] ADC [+] Amplifiers [+] Analog MUX [+] Comparators [+] DAC [+] Manual Routing [+] Mixer [v2.0] [+] Sample/Track and Hold [v1.40] [+] VRef [v1.70] 	<p>Disposición de diferentes bloques analógicos (ADC, MUX, DAC,)</p>
 <ul style="list-style-type: none"> [-] Digital <ul style="list-style-type: none"> [+] Functions [-] Logic <ul style="list-style-type: none"> [+] And [v1.0] [+] Bufoe [v1.10] [+] D Flip Flop [v1.30] [+] D Flip Flop w/ Enable [v1.0] [+] De-Multiplexer [v1.10] [+] Digital Constant [v1.0] [+] Logic High '1' [v1.0] [+] Logic Low '0' [v1.0] [+] Lookup Table [v1.50] [+] Multiplexer [v1.10] [+] Nand [v1.0] [+] Nor [v1.0] [+] Not [v1.0] [+] Or [v1.0] [+] SR Flip Flop [v1.0] [+] Toggle Flip Flop [v1.0] 	<p>Disposición de diferentes bloques digitales (COMPUERTAS, FLIP FLOP, CONTROL DE REGISTROS)</p>
 <ul style="list-style-type: none"> [-] Communications <ul style="list-style-type: none"> [+] CAN Controller Macro [v3.0] [+] File System [+] I2C [+] I2S [+] LIN [v3.40] [+] LIN Slave Macro [v3.40] [+] MDIO Interface [+] SMBus/PMBus Slave [+] Software Transmit UART [v1.50] [+] SPDIF Transmitter [v1.20] [+] SPI [+] UART [v2.50] [+] USB 	<p>Varios bloques de protocolos de comunicación (USB, I2C,CAN)</p>
 <ul style="list-style-type: none"> [-] Thermal Management <ul style="list-style-type: none"> [+] Fan Controller [v4.0] [+] RTD Calculator [v1.20] [+] Thermistor Calculator [v1.20] [+] Thermocouple Calculator [v1.20] [+] TMP05 Interface Macro [v1.10] 	<p>Novedad más importante son sus bloques de acondicionamiento de sensores (PT100, TERMISTOR,TERMOCUPLA)</p>

Tabla 5. Características más destacadas de PSOC CREATOR

LISTA DE MATERIALES Y COMPONENTES

CANTIDAD	COMPONENTE O MATERIAL	PRECIO
1	Estructura fotobiorreactor	150.000
1	Base fotobiorreactor	10.000
1	Armario fotobiorreactor	200.000
1	Fuente de energía DC	45.000
1	Bomba de aire	65.000
2	Caudalimetro de policarbonato	50.000c/u
1	PT100	120.000
1	TERMISTOR	8.000
1	PH MSP430	180.000
1	LUZ BH1750	15.000
2	Electroválvula	27.000 c/u
1	Calentador	40.000
1	PSOC 5LP	72.000
2	Tubos Led	14.000 c/u
x	Circuitería externa	100.000
	TOTAL	\$ 1'187.000

Tabla 6. Lista de materiales y gastos económicos

5.7 MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL FOTOBIORREACTOR AIRLIFT

Para el modelado del fotobiorreactor airlift, nos centraremos en: Modelado del crecimiento microalgal.

Lo que se observara a continuación son conocimientos adquiridos en un curso debidamente pagado en YouTube.

Fuente: Universidad de Almería en España, Departamento de Biología, Reconocimiento internacional por el trabajo con microalgas y fotobiorreactores.

5.7.1 MODELO DE CRECIMIENTO MICROALGAL

Fotosintético:



Biomasa organica



Generación de biomasa:

$$\frac{gr \text{ Biomasa}}{gr \text{ Biomasa} \cdot s} = \frac{1}{s}$$

Generación máxima de Biomasa:

$$\mu_{max}$$

“Un factor limitante habitual es la luz, por eso su importancia en el diseño de los fotobiorreactores”

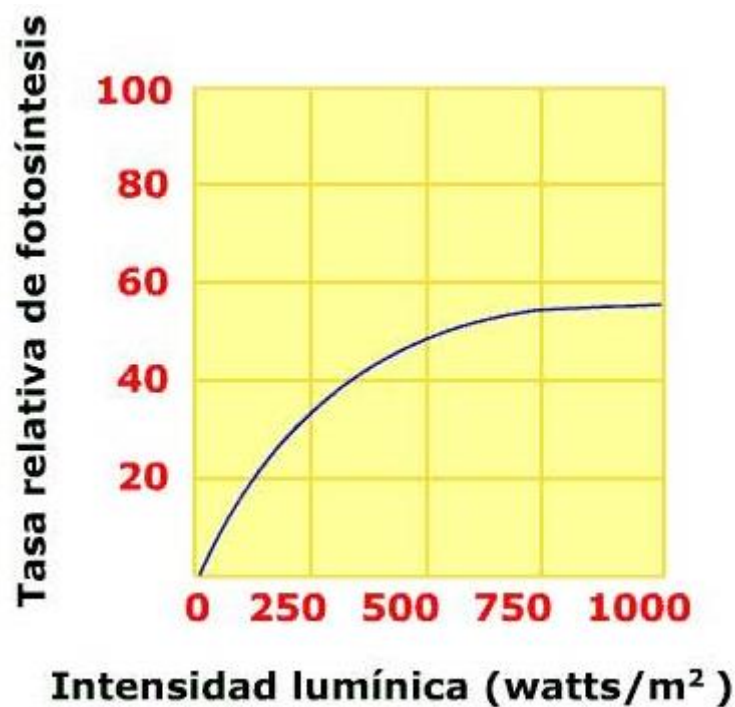


Ilustración 23. Tasa fotosintética vs Intensidad luminosa. Fuente: [Universidad de Almería]

“La curva de la ilustración 23 es la que deseamos representar como una curva de crecimiento”

Como obtener la curva:

Midiendo crecimiento biomasa C_B vs tiempo:

Cultivo continuo:

$$D = \mu$$

“Experimentos bajo diferentes irradiancias”

$$\mu = \frac{1}{C} \cdot \frac{dC}{dt}$$

Nota: Encontraremos diferentes modelos estáticos (luz continua), pero solo nos centraremos en dos:

Tamiya:

$$\mu = \frac{\mu_{max} \cdot I}{I_K + I}$$

Van Oneshot:

$$\mu = \mu_{max}(1 - e^{-I/I_K})$$

Secuencia para obtener el modelo:

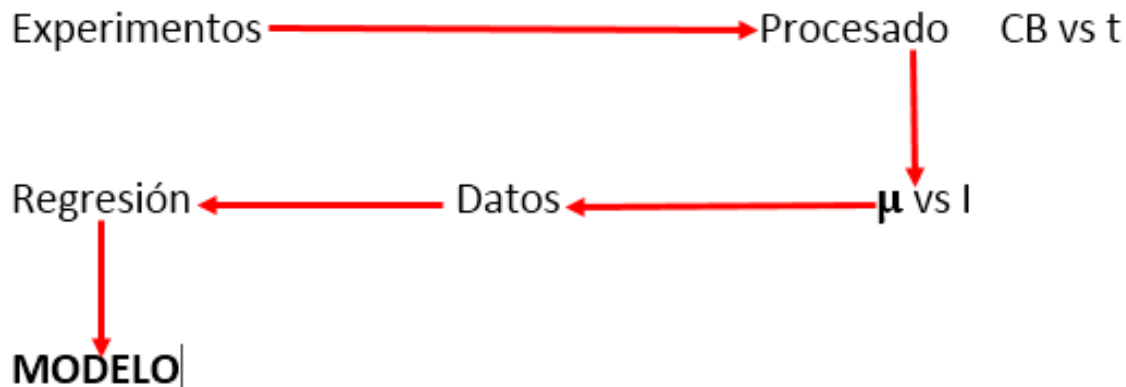


Ilustración 24. Proceso Obtención del Modelo de Crecimiento Microalgal. Fuente: [El Autor]

Luz: Coexiste zonas sobresaturadas con zonas oscuras.

MODELO DE CRECIMIENTO: [EL CONCEPTO CLAVE ES PROMEDIAR]

Mezcla pobre: μ es diferente en cada zona, hay que promediar:

$$\mu(x) = \frac{\mu_{max} \cdot I(x)}{I_K + I(x)} = \frac{\mu_{max} \cdot I_0 \cdot e^{-Cb_k x}}{I_K + I_0 \cdot e^{-Cb_k x}}$$

Mezcla intensa: La luz se ve como un promedio:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-Cb k x} = \frac{\mu_{max} \cdot I_0 \cdot e^{-Cb k x}}{I_K + I_0 \cdot e^{-Cb k x}}$$

$$\mu(x) = \frac{\mu_{max} \cdot I_{av}}{I_K + I_{av}}$$

Así obtenemos: **[La Intensidad de la fotosíntesis en el fotobiorreactor bien mezclado]**

$$I_{av} = \frac{I_0}{Cb k L} (1 - e^{-Cb k L})$$

$$\mu = \frac{\mu_{max} \cdot I_{av}}{I_K + I_{av}}$$

Siempre tendremos dos casos en el crecimiento de biomasa microalgal:

FBR bien mezclado:

$$I_{av} = \frac{\mu_{max} \cdot I_0}{\alpha Cb k L} (1 - e^{-Cb k L})$$

$$\mu = \mu_{max}$$

FBR mal mezclado:

$$\mu_{av} = \frac{\mu_{max}}{Cb k L} (\ln(I_0/\alpha) + 1 - \frac{I_0}{\alpha} e^{-Cb k L})$$

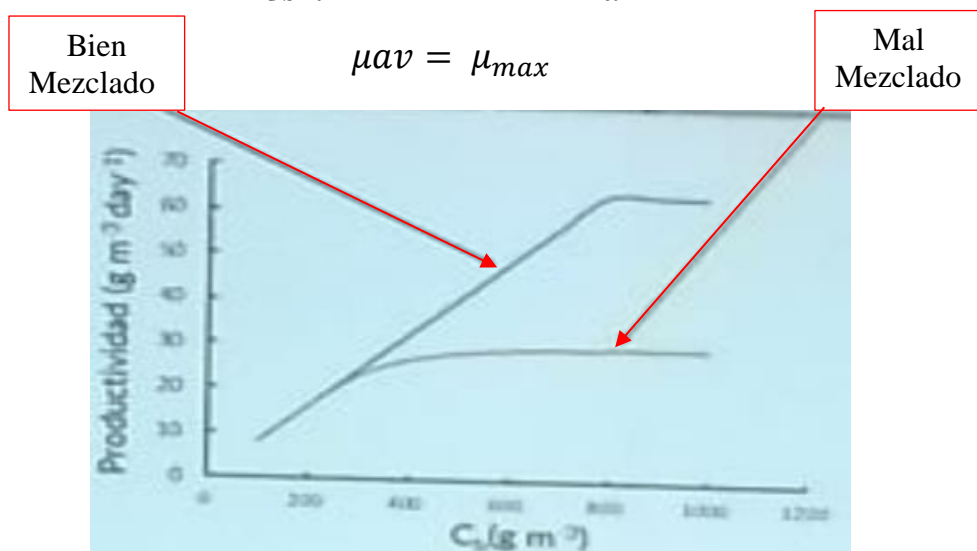


Ilustración 25. Productividad vs Crecimiento microalgal. Fuente: [Universidad de Almería]

5.8 DISEÑO DE CONTROL DEL PROCESO

5.8.1 Adquisición, acondicionamiento de las señales y activación (Temperatura, pH, Iluminancia):

A continuación, se presentará los programas implementados en PSOC CREATOR v4 para la adquisición y acondicionamiento de las señales, sus debidas conexiones y pines usados. Con anterioridad ya se había explicado cada una de las ventanas de este entorno eso con el fin de que se entienda lo que se observara a continuación:

Temperatura (PT100): Ver Código anexo 1

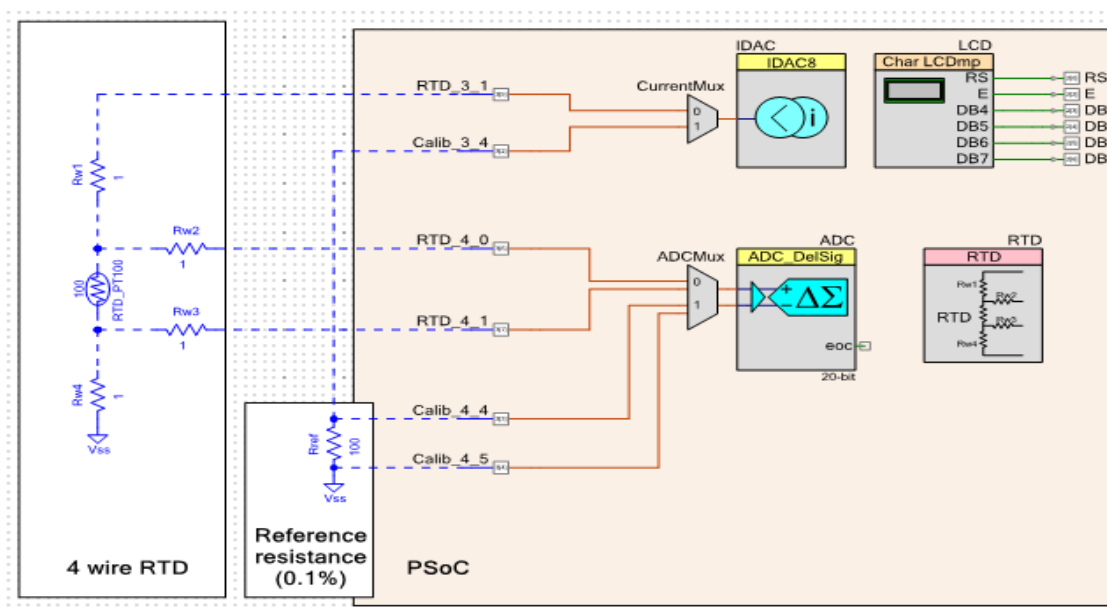


Ilustración 26. Esquema PT100 en PsoC 5LP. Fuente: [El Autor]

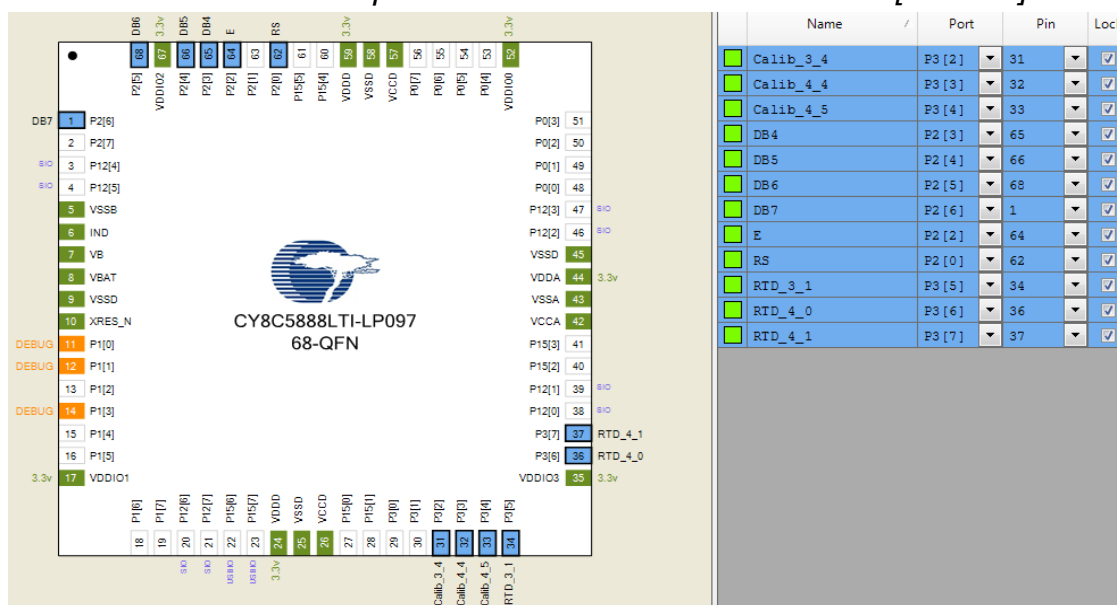


Ilustración 27. Pines conexión PT100 PsoC 5LP. Fuente: [El Autor]

Temperatura (Termistor NTC 10KΩ): Ver Código anexo 2

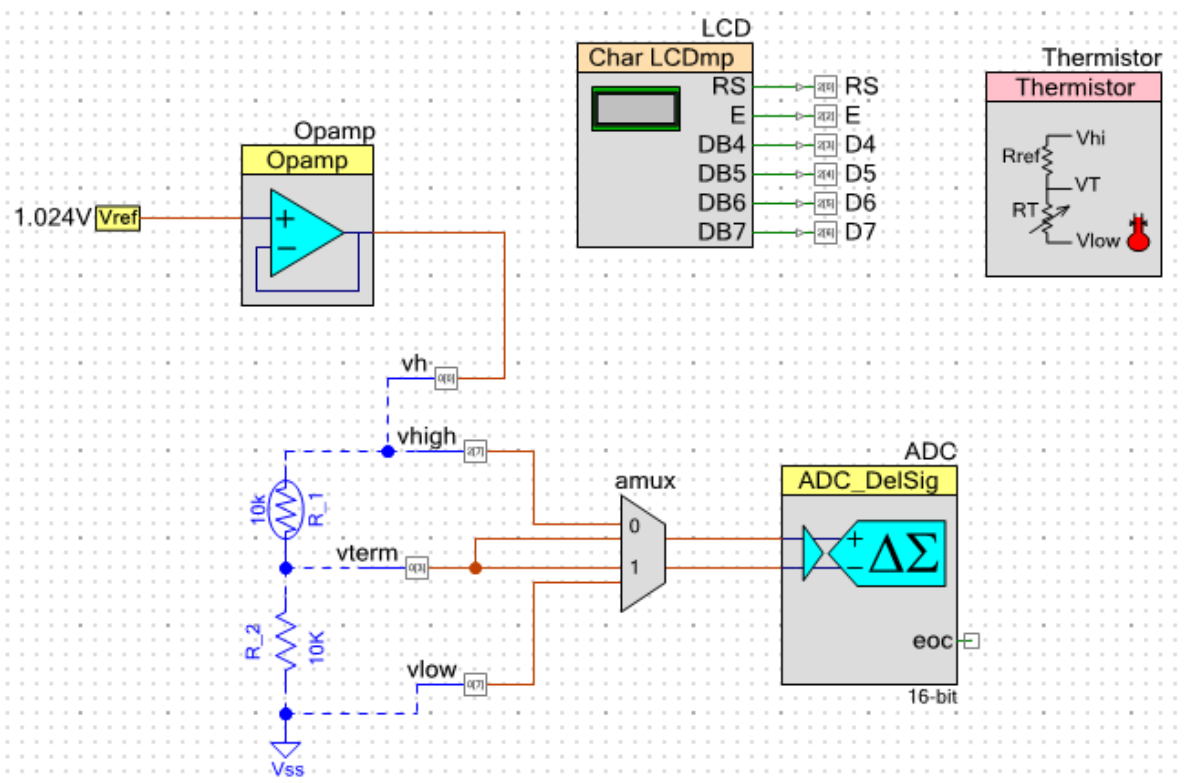


Ilustración 28. Esquema Termistor en PSoC CREATOR. Fuente: [El Autor]

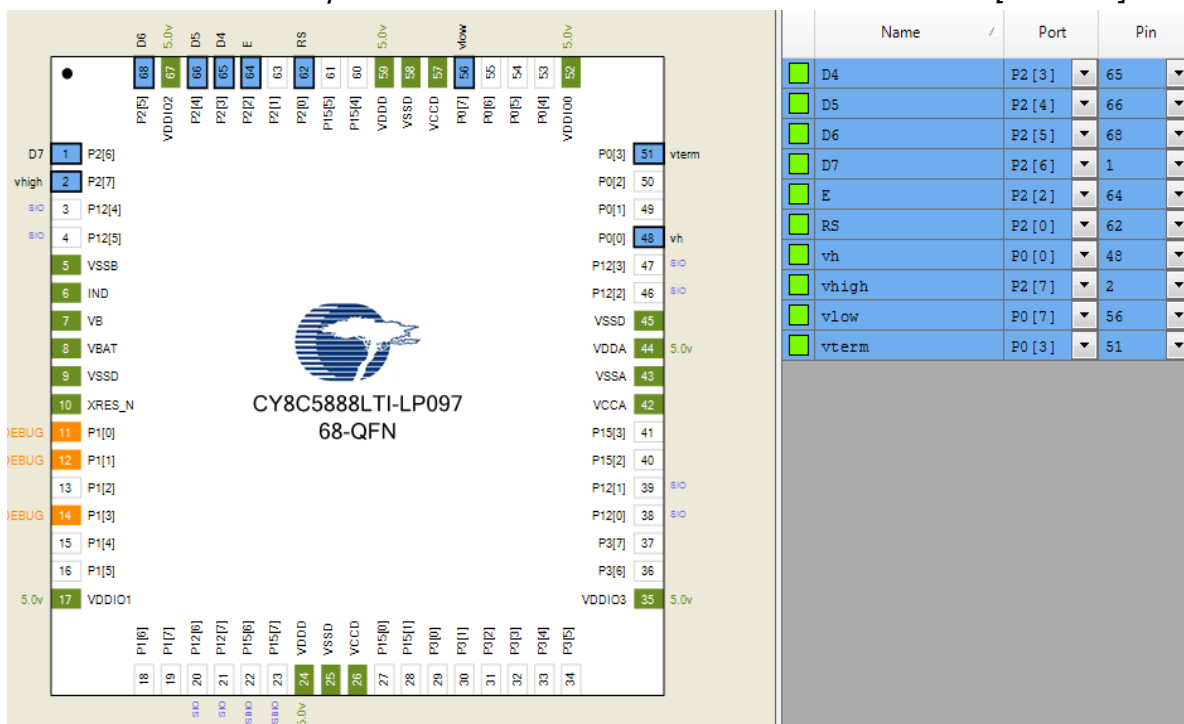


Ilustración 29. Pines conexión Termistor PSoC. Fuente: [El Autor]

Potencial de Hidrógeno pH (MSP430): Ver Código anexo 3

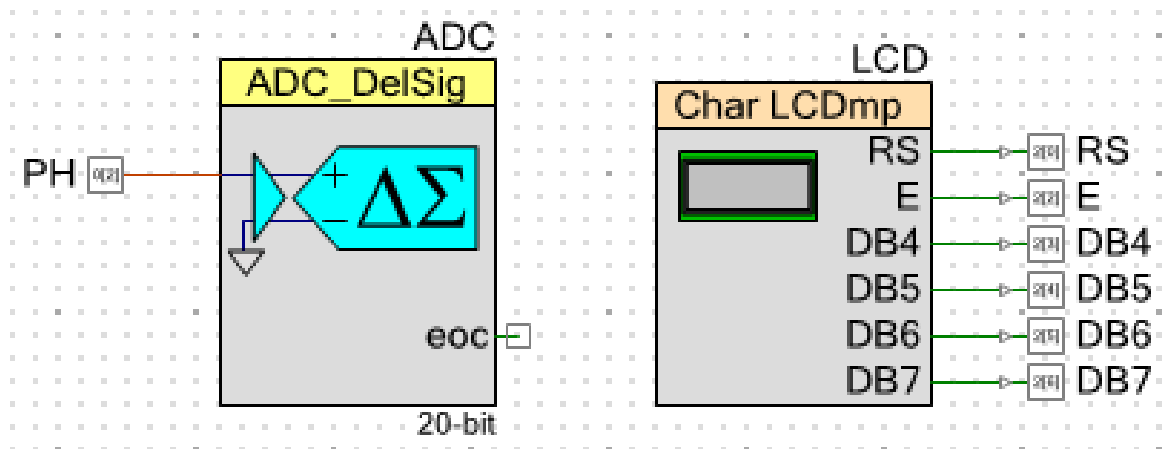


Ilustración 30. Esquema sensor MSP430 en PSoC CREATOR. Fuente: [El Autor]

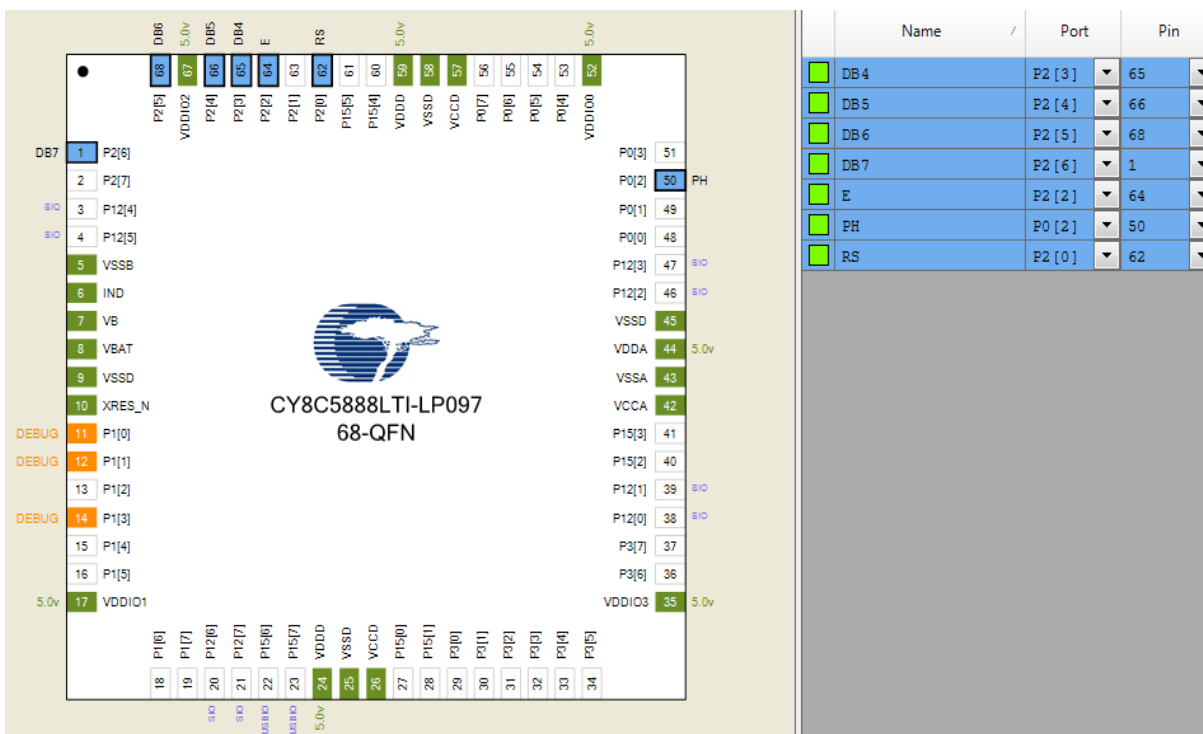


Ilustración 31. Conexión pines MSP430 con PSoC. Fuente: [El Autor]

Intensidad lumínica (BH1750): Ver Código anexo 4

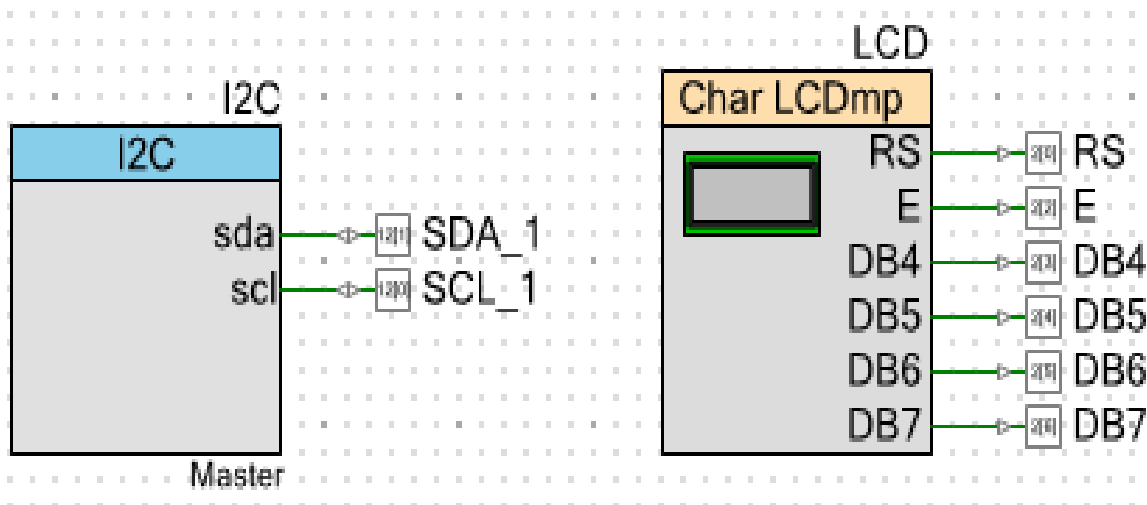


Ilustración 32. Esquema BH1750 en PSoC CREATOR. Fuente: [El Autor]

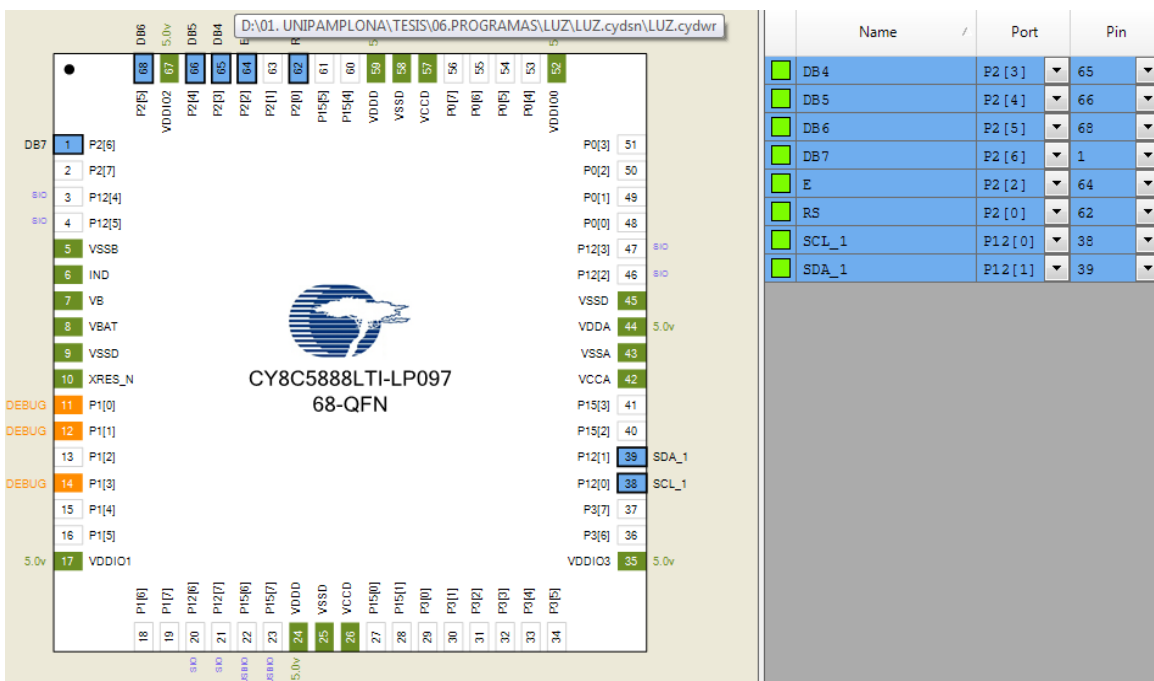


Ilustración 33. Conexión pines BH1750 con PsoC 5LP. Fuente: [El Autor]

5.9 DISEÑO MONITOREO DEL PROCESO

Protocolo de comunicación: Serial.



Ilustración 34. Secuencia adquisición y monitoreo de las variables. Fuente: [INSTRUMENTS,2017]

Código PSoC CREATOR:

El siguiente código es de fuente: elaboración propia, donde se hará uso del bloque multiplexor con 4 canales ya que son las variables que deseamos monitorear: Temperatura PT100, temperatura Termistor, pH, Intensidad lumínica, todas se filtraran por el bloque ADC que tiene una resolución de 20 bits, esta información se enviara por el protocolo Serial USB, a través del bloque UART configurado como full UART (transmisión y recepción) y una velocidad de 115200 bps.

Adquisición de las variables del proceso: Ver Código anexo 5

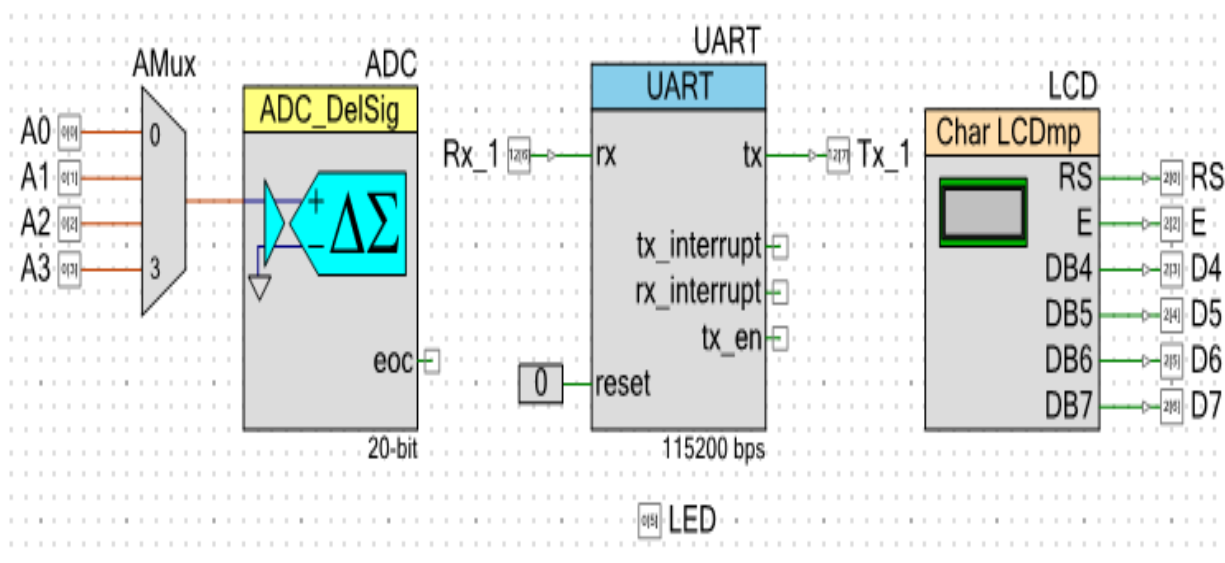


Ilustración 35. Esquema Transmisión serial PSoC CREATOR. Fuente: [El Autor]

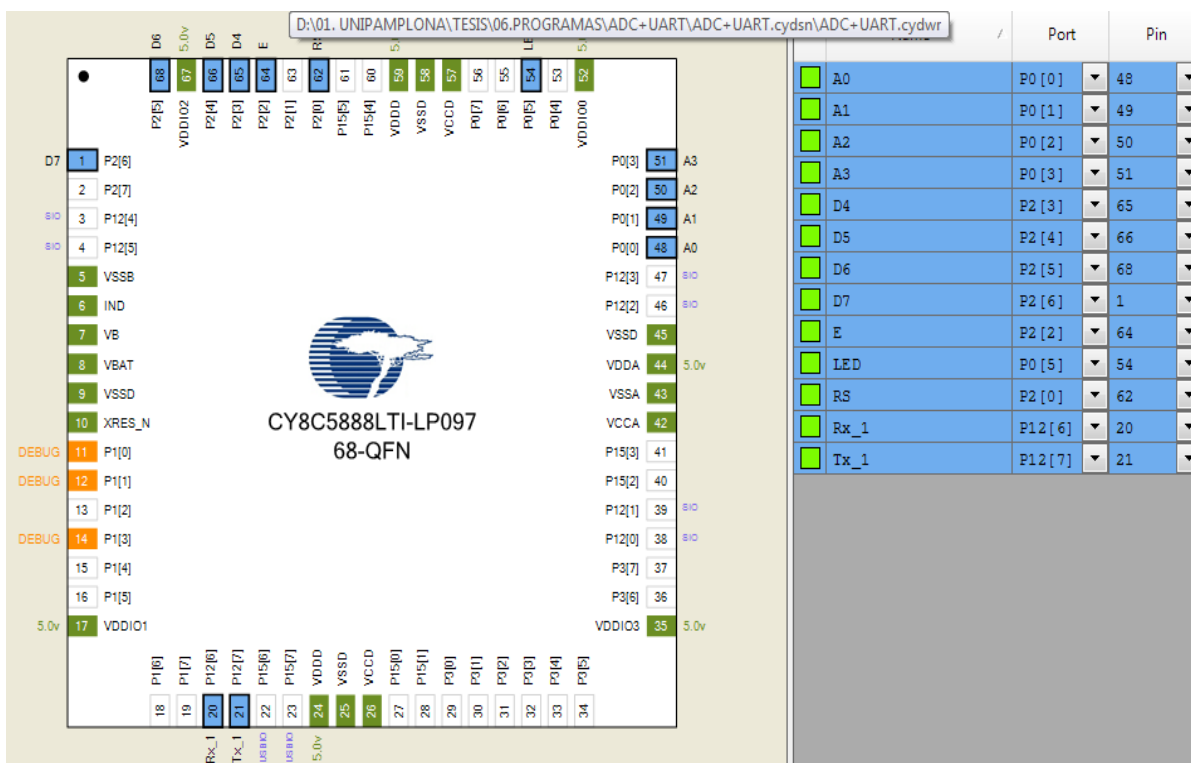


Ilustración 36. Conexión por puerto serial Rx y Tx con LABview. Fuente: [El Autor]

Monitoreo de las variables de proceso, a través de **LABview** con su herramienta **visa serial**:

- Configurar el puerto serial: con una velocidad de 9600 bps, puerto COM reconocido de la PSOC.
- Arreglo por bytes y lectura de buffer.
- Descomponer las tramas, por posiciones en el vector para encontrar cada variable.
- Para obtener buenas lecturas y no se confundan los datos, se debe colocar un tiempo aproximadamente de 500ms.
- Para realizar el debido monitoreo continuo de las variables, colocar el programa de bloques dentro de un ciclo while, el cual tendrá en su estructura el pulsador de stop.
- Se deja propuesto un bloque de escritura en caso que deseemos enviar información de LABview a la tarjeta PSOC 5LP.

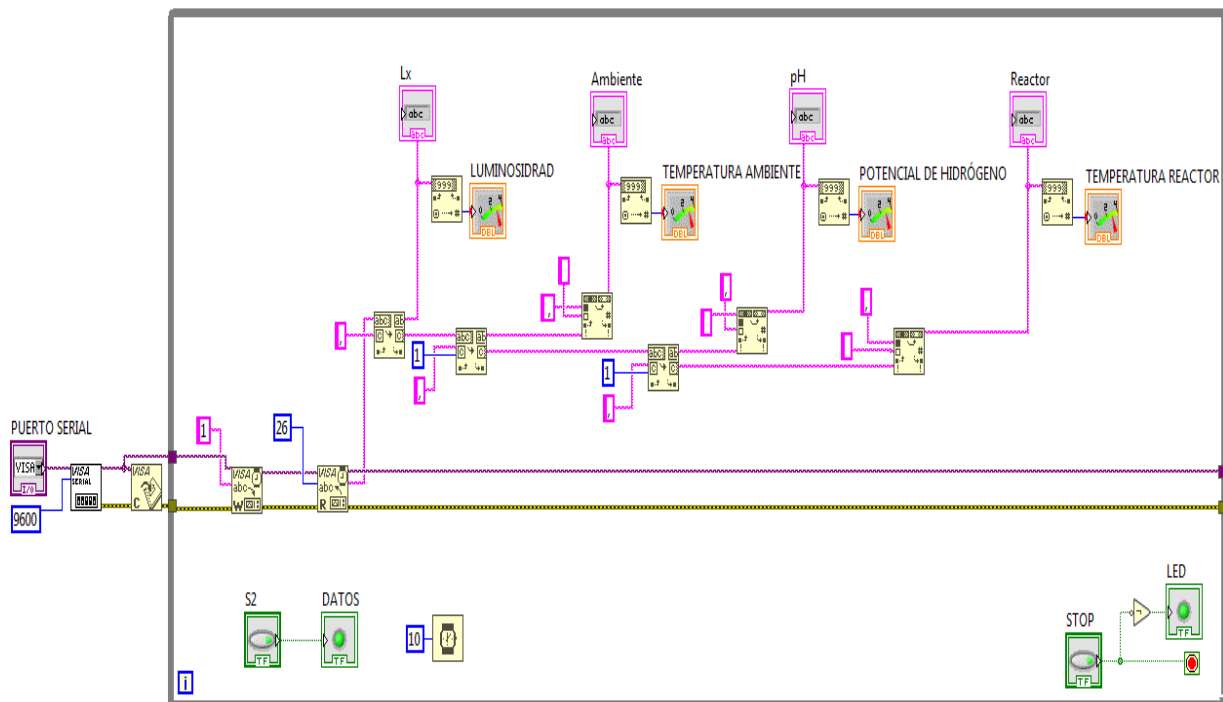


Ilustración 37. Programa en bloques, para recepción de datos por serial y su decodificación. Fuente: [El Autor]

5.10 DISEÑO CIRCUITOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA

5.10.1 ACTIVACIONES EN DC

PREDISEÑO ACTIVACIÓN CON TRANSISTOR DARLINGTON CON DOS TRANSISTORES INDEPENDIENTES:

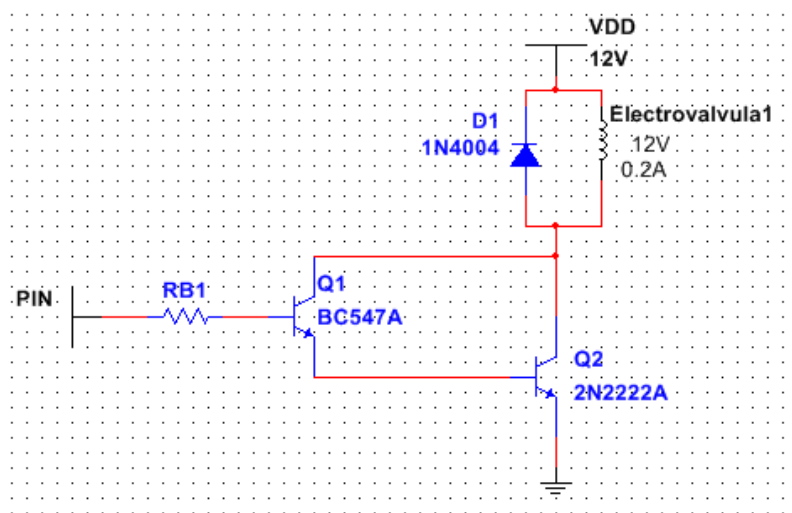


Ilustración 38. Esquema circuito activación DC con dos transistores independientes. Fuente: [El Autor]

PREDISEÑO: (OSPINO, 2016)

1) REFERENCIAS:

Q1: Transistor BC547

$$\beta_1 = 400$$

Q2: Transistor 2N2222A

$$\beta_2 = 100$$

ANÁLISIS TÉRMICO Q1: (OSPINO, 2016): Ver Datasheet Anexo 1

SIN DISIPADOR

$$T_j - T_a = PD * R_{\theta JA} \quad (1)$$

$$T_a = 5^\circ C + T_{maxh} \quad (2)$$

$$T_a = 5^\circ C + 27^\circ C$$

$$T_a = 32^\circ C$$

$$PD = V_{CE sat} * I_C \quad (3)$$

$$I_C = I_{Electrovalvula} = 0.2A \quad (4)$$

$$PD = 250mV * 0.2A$$

$$PD = 0.05W = 50mW$$

Despejamos T_j en (1)

$$T_j = T_a + PD * R_{\theta JA}$$

$$T_j = (32^\circ C) + (0.05W) * (200 \frac{^\circ C}{W})$$

$$T_j = 42^\circ C$$

Hallamos la constante K

$$K = \frac{T_j}{T_{jmax}} \quad (5)$$

$$K = \frac{42^\circ C}{150^\circ C}$$



$$K = 0.28$$

Si $K > 0.5 \rightarrow$ Requiere disipador

$$0.28 < 0.5$$

No se requiere disipador de calor.

ANÁLISIS TÉRMICO Q2: Ver Datasheet Anexo 2

No requiere disipador.

DISEÑO:

$$2.4V \leq V_{OH} \leq 12V$$

$$0mA \leq I_{OH} \leq 0,4mA$$

Q1 y Q2 deben conducir operando ligeramente en modo activo directo para que se cumpla la siguiente relación: (OSPINO, 2016)

$$\frac{I_L}{I_{B1}} = \beta_1 + \beta_2(\beta_1 + 1) \quad (1)$$

Condición necesaria para Q1 y Q2 en modo activo directo: (OSPINO, 2016)

$$V_{CE sat1} < V_{CE1} < V_{CE0} \quad (2)$$

$$V_{CE sat2} < V_{CE2} < V_{CE0} \quad (3)$$

LVK MALLA 2

$$-V^+ + V_{Elec} + V_{CE2} = 0$$

$$V_{CE2} = V^+ - V_{Elec} \quad (4)$$

(4) EN (3)

$$V_{CE sat2} < V^+ - V_{Elec} < V_{CE0}$$

$$V_{CE sat2} + V_{Elec} < V^+ < V_{CE0} + V_{Elec} \quad (5)$$

LVK MALLA 2

$$-V_{OH} + I_{B1} R_B + V_{BE1} + V_{BE2} = 0 \quad (6)$$

LCK EN EL NODO 1

$$I_{OH} = I_{B1} \quad (7)$$



(1) EN (6)

$$\frac{I_L}{I_{OH}} = \beta_1 + \beta_2(\beta_1 + 1)$$

$$I_{OH} = \frac{I_L}{\beta_1 + \beta_2(\beta_1 + 1)} = \frac{I_{Elec v}}{\beta_1 + \beta_2(\beta_1 + 1)}$$

Si el resultado de IOH está en el rango de lo que brinda el PIN de la PSOC el diseño está perfecto. (OSPINO, 2016)

LVK MALLA 3

$$-V_{CE1} - V_{BC2} = 0$$

$$V_{BC2} = -V_{CE1}$$

Q2 está activo, mas no como cuasi interruptor

Criterios de funcionamiento: (Los dos criterios se deben cumplir). (OSPINO, 2016)

- El voltaje de ruptura de D1 debe ser mayor que al voltaje V+
- La Imax en DC de D1 sea mayor a la IElecv.

DIODO: 1N4004

$$V_+ = V_{Elec v}.$$

$$\text{Voltaje de ruptura de D1} > \text{voltaje } V_+$$

$$600V > 12V$$

$$I_{MAX} \text{ D1 en directa} > I \text{ Electrovalvula}$$

$$3A > 0.2A$$

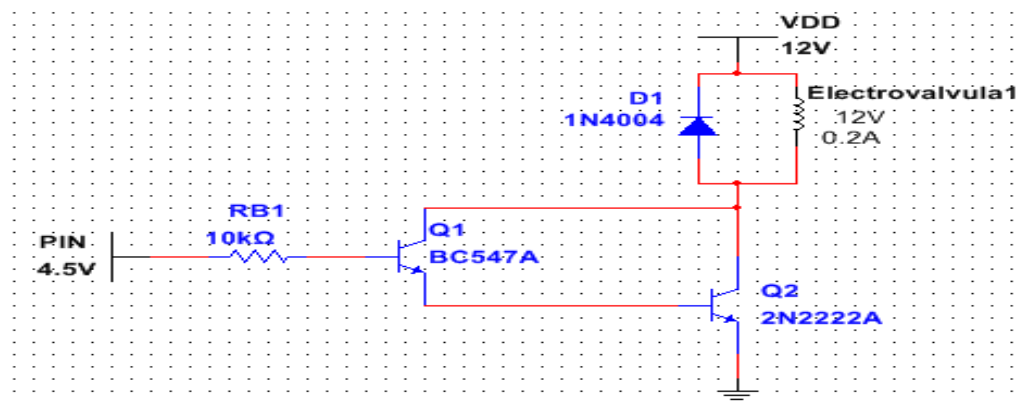


Ilustración 39. Diseño activación en DC con transistores BC547 y 2N2222A. Fuente: [El Autor]

5.10.2 ACTIVACIONES EN AC

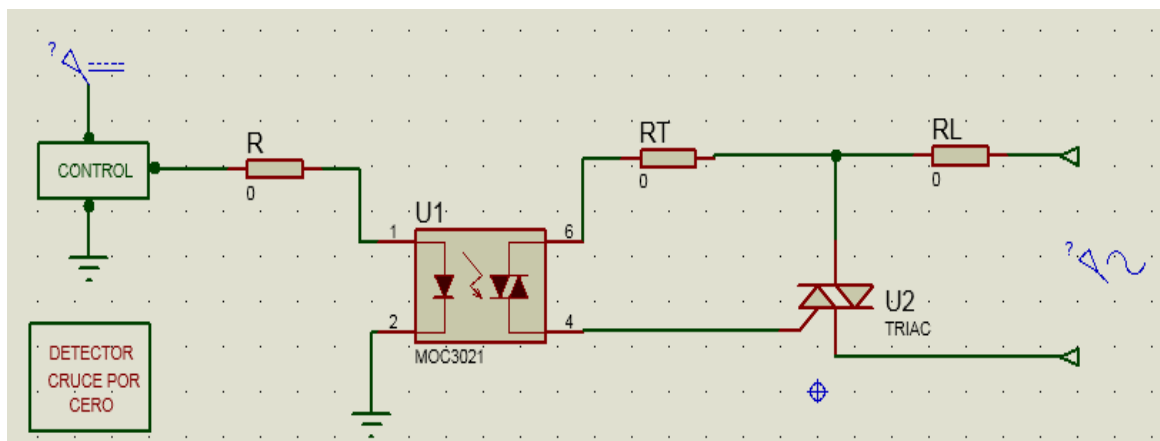


Ilustración 40. Circuito típico Optoacoplador. Fuente: [El Autor]

OPTOTRIAC: (OSPINO, 2016)

(1) Criterio para hallar R_T :

R_T se establece para el peor escenario de consumo de corriente para el optotriac.

OPTOACOPLADOR = ON

TRIAC = OFF

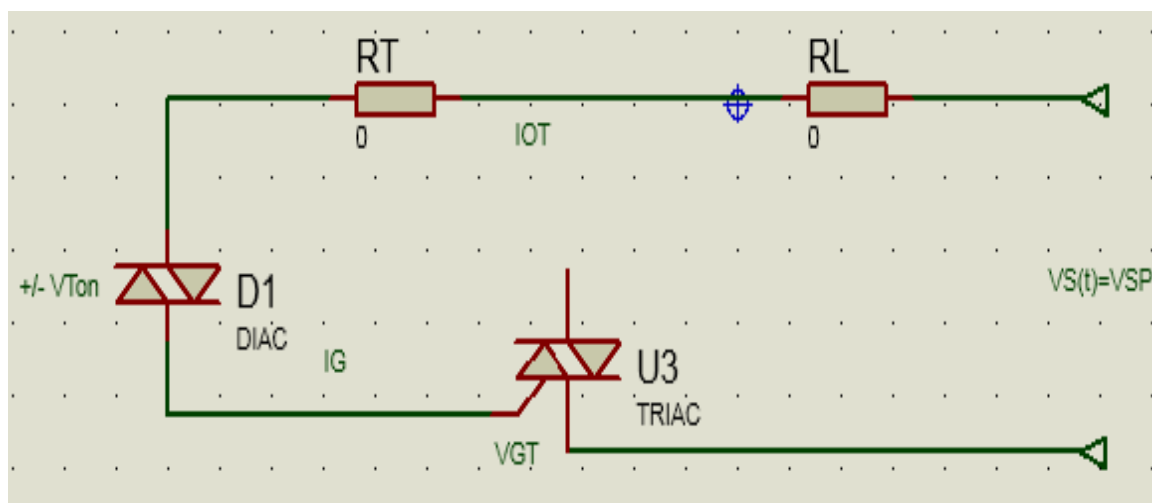


Ilustración 41. Esquema Optoacoplador ON y TRIAC OFF. Fuente: [El Autor]

LVK MALLA 1

$$-VSP + IOT RL + IOT RT + VTon + VGT = 0$$

$$RT = \frac{VSP - VTon - VGT - IOT RL}{IOT}$$

$$RT = 220\Omega$$

$$PRT = IOT^2RT$$

$$IOH < IOT < IT \text{ max}$$

$$VGT < IOT < IG \text{ max}$$

“Manejan 1A Max y la IH es de 100mA aproximadamente”

PREDISEÑO: (OSPINO, 2016)

PIN PSOC:

$$PIN = 15.5 \text{ y } 15.1$$

$$PIN = GPIO$$

$$4.5V \text{ y } 0.4A$$

TRIAC:

$$I \text{ TRIAC} > I \text{ CARGAS}$$

$$BTA08 = 8A \text{ y } BTA06 = 6A$$

ZONA AC:

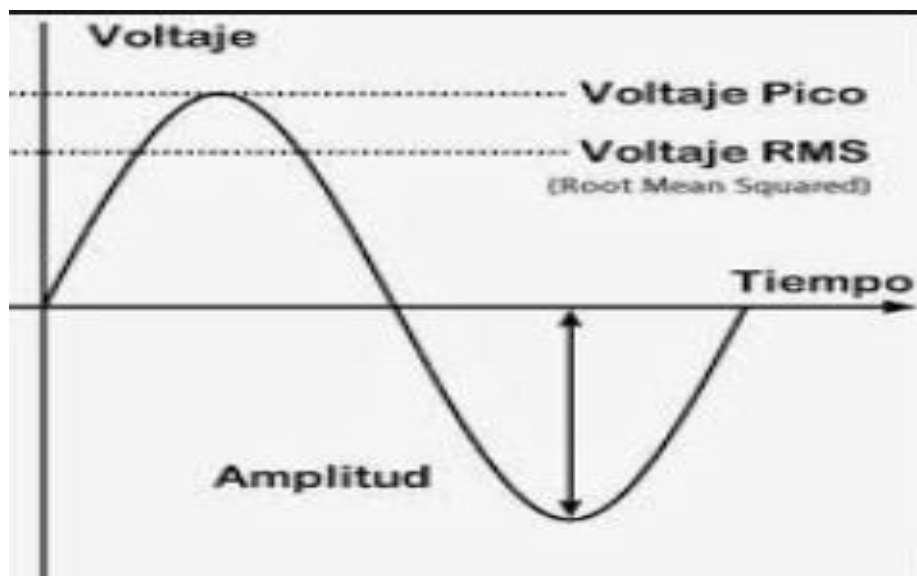


Ilustración 42. Señal de voltaje en alterna. Fuente: [RMS, UNICROM]

$$V_{rms} = 130V$$

$$V_p = 130V/0.707$$

$$V_p = 183.84V$$

LVK MALLA 2

$$-V_{SP} + I_G R_1 + V_{T_{on}} + V_{GT} = 0$$

$$R_1 = \frac{V_{SP} - V_{T_{on}} - V_{GT}}{I_G}$$

$$R_1 = \frac{183.84V - 5V - 1.5V}{35mA}$$

$$R_1 = 5.1K\Omega$$

$$I_G (AV)_{Max} = \frac{P_G (AV)_{Max}}{V_{GT}}$$

$$I_G (AV)_{Max} = \frac{0.5W}{1.5V}$$

$$I_G (AV)_{Max} = 0.33A$$

$$I_{GT} < I_G < I_G (AV)_{Max}$$

$$0.035A < I_G < 0.33A$$

$$P_{R1} = I_G^2 R_1$$

$$P_{R1} = 555.39W$$

CALENTADOR AMBIENTE:

$$R_L = \frac{V^2_{RMS}}{P_D}$$

$$R_L = \frac{130V^2}{400W}$$

$$R_L = 42.25\Omega$$

(Calentador)

$$V_{SP} = V_{RMS} * \sqrt{2}$$

$$V_{SP} = 130V * \sqrt{2}$$



$$VSP = 183.84V$$

$$tH = \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{I^H RL + VT_{on}}{VSP}\right)}{120\pi \text{ rad/s}}][\text{rad}]$$

$$tH = \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{(15mA)(42.25\Omega) + 5V}{184.84V}\right)}{120\pi \text{ rad/s}}][\text{rad}]$$

$$tH = 80.86\mu S$$

$$T = \frac{1}{60Hz}$$

$$T = 0,0166s$$

$$toff = \frac{T}{2} - tH$$

$$toff = \frac{0,0166s}{2} - 80.86\mu s$$

$$toff = 8,2ms$$

HANDY HEATER = CALEFACTOR

$$P = 400W$$

$$V_{rms} = 130V$$

$$P = V \cdot I$$

$$I_{rms} = \frac{400W}{130}$$

$$I_{rms} = 3.078A$$

$$V_p = 130V/0.707$$

$$V_p = 183.84V$$

$$P = V \cdot I$$

$$I_p = \frac{400W}{183.87V}$$

$$I_p = 2.17A$$

TRIAC BTA08:

$$I_{TRIAC} > I_{CALEFACTOR}$$

$$8A > 3.078$$

ANÁLISIS TÉRMICO BTA08. (OSPINO, 2016): Ver Datasheet Anexo 3

$$V_{Ton} = 5V$$

$$I_{TP} = \frac{V_{SP} - V_{Ton}}{R_L}$$

$$I_{TP} = \frac{189.84V - 5V}{42.25\Omega}$$

$$I_{TP} = 4.37A$$

$$PD_{max} = \frac{1}{T} \int_{t_H}^{toff} V_{Ton} * I_{TP} \text{Sen}120\pi t dt$$

$$PD_{max} = \frac{V_{Ton} * I_{TP}}{T} \int_{t_H}^{toff} \text{Sen}120\pi t dt$$

$$PD_{max} = \frac{5V * 4.37}{0,0166s} \int_{80.86\mu s}^{8,2ms} \text{Sen}120\pi t dt$$

$$PD_{max} = 3.12W$$

SIN DISIPADOR

$$T_j - T_a = PD_{max} * R_{\theta JA}$$

$$T_a = 5^\circ C + T_{maxh}$$

$$T_a = 5^\circ C + 27^\circ C$$

$$T_a = 32^\circ C$$



DESPEJAMOS T_J

$$T_j = T_a + PD_{max} * R_{\theta JA}$$

$$T_j = 32^{\circ}\text{C} + 3.12\text{W} * 60 \frac{\text{C}}{\text{W}}$$

$$T_j = 219.2^{\circ}\text{C}$$

HALLAMOS LA CONSTANTE

$$K = \frac{T_j}{T_{jmax}}$$

$$K = \frac{219.2^{\circ}\text{C}}{150^{\circ}\text{C}}$$

$$K = 1.46$$

SI LA CONSTANTE $K > 0,5 \rightarrow$ REQUIERE DISIPADOR

$$1.46 > 0,5$$

CON DISIPADOR REAL

$$T_{jd} - T_a = PD * [R_{\theta JC} + [R_{\theta CA} || (R_{\theta CD} + R_{\theta DA})]]$$

$$R_{\theta CA} = R_{\theta JA} - R_{\theta JC}$$

$$R_{\theta CA} = 60 \frac{\text{C}}{\text{W}} - 2.5 \frac{\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_{\theta CA} = 57.5 \frac{\text{C}}{\text{W}}$$

$$0.5 < K_d < 0.7$$

$$0.5 < \frac{T_{jd}}{T_{jmax}} < 0.7$$

$$T_{jd} = K_d * T_{jmax}$$

$$T_{jd} = 0.7 * 150^{\circ}\text{C}$$

$$T_{jd} = 105^{\circ}\text{C}$$

Reemplazamos valores:

$$105^{\circ}\text{C} - 32^{\circ}\text{C} = 3.12\text{W} * [2.5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} + [60 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} || (\text{R}_{\theta\text{CD}} + \text{R}_{\theta\text{DA}})]]$$

$$23.4 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} - 2.5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} = \frac{60 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} * (\text{R}_{\theta\text{CD}} + \text{R}_{\theta\text{DA}})}{60 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} + (\text{R}_{\theta\text{CD}} + \text{R}_{\theta\text{DA}})}$$

$$20.9 = \frac{60 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} * (\text{R}_{\theta\text{CD}} + \text{R}_{\theta\text{DA}})}{60 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} + (\text{R}_{\theta\text{CD}} + \text{R}_{\theta\text{DA}})}$$

$$0.35 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} = \frac{(\text{R}_{\theta\text{CD}} + \text{R}_{\theta\text{DA}})}{60 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} + (\text{R}_{\theta\text{CD}} + \text{R}_{\theta\text{DA}})}$$

$$21 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} + 0.35\text{R}_{\theta\text{CD}} + 0.35\text{R}_{\theta\text{DA}} = \text{R}_{\theta\text{CD}} + \text{R}_{\theta\text{DA}}$$

$$21 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} + 0.35\text{R}_{\theta\text{CD}} - \text{R}_{\theta\text{CD}} = \text{R}_{\theta\text{DA}} - 0.35\text{R}_{\theta\text{DA}}$$

$$\text{R}_{\theta\text{DA}} = 499.8 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$\text{RD} \leq \text{R}_{\theta\text{DA}}$$

K=0.7 → Disipador de área Grande

TUBOS LED:

DOS TUBOS EN PARALELO:

$$\text{LED1} = 10\text{W}$$

$$\text{LED2} = 9\text{W}$$

$$P = 19\text{W}$$

$$V_{\text{rms}} = 130\text{V}$$

$$P = V \cdot I$$

$$I_{\text{rms}} = \frac{19\text{W}}{130}$$

$$I_{\text{rms}} = 0.146\text{A}$$



$$V_p = 130V/0.707$$

$$V_p = 183.84V$$

$$P = V \cdot I$$

$$I_p = \frac{19W}{183.84V}$$

$$I_p = 0.103A$$

$$RL = \frac{V^2_{RMS}}{PD}$$

$$RL = \frac{130V^2}{19W}$$

$$RL = 889.47\Omega$$

(Tubos led)

$$VSP = 130V * \sqrt{2}$$

$$VSP = 183.84V$$

$$tH = \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{I_H RL + V_{Ton}}{VSP}\right)}{120\pi \text{ rad/s}}][rad]$$

$$tH = \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{(15mA)(889.47\Omega) + 5V}{183.84V}\right)}{120\pi \text{ rad/s}}][rad]$$

$$tH = 16.87mS$$

$$T = \frac{1}{60Hz}$$

$$T = 0,0166s$$

$$toff = \frac{T}{2} - tH$$

$$toff = \frac{0,0166s}{2} - 16.87ms$$

$$toff = -8.6ms$$

TRIAC BTA06:

$$I_{TRIAC} > I_{TUBOS LED}$$

$$6A > 0.146A$$

ANÁLISIS TÉRMICO BTA06. (OSPINO, 2016): Ver Datasheet Anexo 4

$$V_{Ton} = 5V$$

$$I_{TP} = \frac{V_{SP} - V_{Ton}}{R_L}$$

$$I_{TP} = \frac{189.84V - 5V}{889.47\Omega}$$

$$I_{TP} = 0.208A$$

$$PD_{max} = \frac{1}{T} \int_{t_H}^{t_{off}} V_{Ton} * I_{TP} \text{Sen}120\pi t dt$$

$$PD_{max} = \frac{V_{Ton} * I_{TP}}{T} \int_{t_H}^{t_{off}} \text{Sen}120\pi t dt$$

$$PD_{max} = \frac{5V * 0.208}{0,0166s} \int_{16.87ms}^{-8,6ms} \text{Sen}120\pi t dt$$

$$PD_{max} = 466.3mW$$

SIN DISIPADOR

$$T_j - T_a = PD_{max} * R_{\theta JA}$$

$$T_a = 5^\circ C + T_{maxh}$$

$$T_a = 5^\circ C + 27^\circ C$$

$$T_a = 32^\circ C$$

DESPEJAMOS T_J

$$T_j = T_a + PD_{max} * R_{\theta JA}$$

$$T_j = 32^\circ C + 466.3mW * 60 \frac{^\circ C}{W}$$

$$T_j = 59.98^\circ C$$



HALLAMOS LA CONSTANTE

$$K = \frac{T_j}{T_{jmax}}$$

$$K = \frac{59.98^\circ\text{C}}{150^\circ\text{C}}$$

$$K = 0.399$$

SI LA CONSTANTE $K < 0,5 \rightarrow$ NO REQUIERE DISIPADOR

$$0.399 < 0,5$$

De igual forma para evitar daños en el componente, ya que los tubos led se usarán a plena carga, y la mayor parte del día, **se acoplará un disipador de área pequeña al BT06.** (OSPINO, 2016)

DISEÑO:

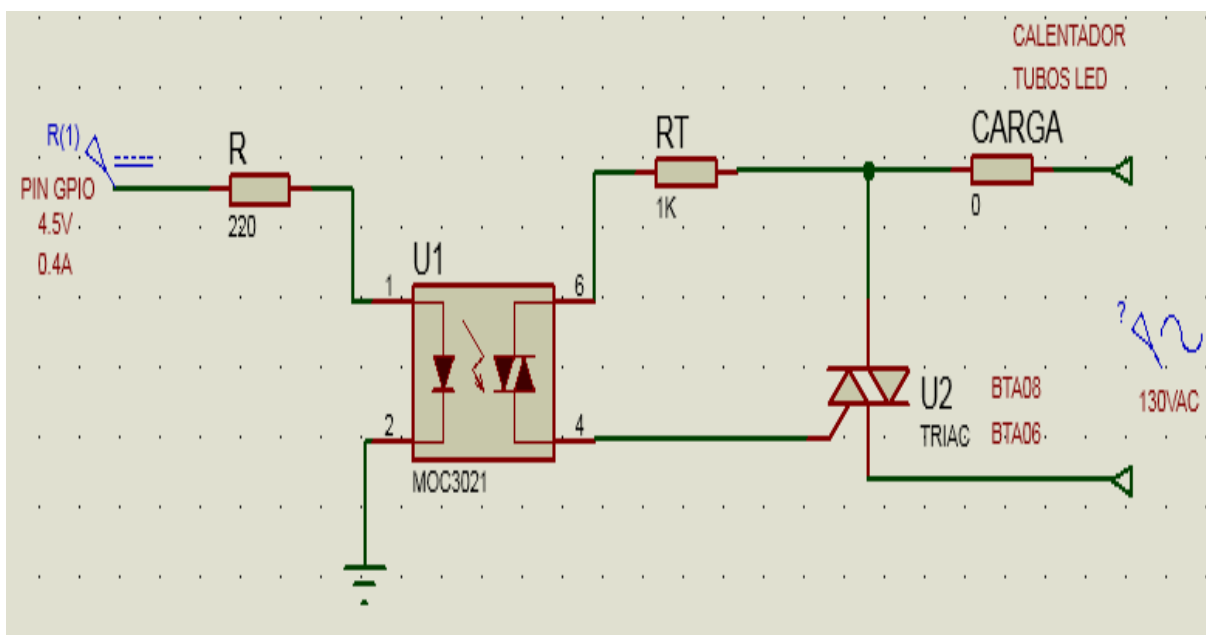


Ilustración 43. Diseño Circuito activación en AC. Fuente: [El Autor]

6. RESULTADOS

6.1 RESULTADOS COMPORTAMIENTO CIRCUITOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA

ACTIVACIÓN EN DC (electroválvulas): MEDICIONES CIRCUITO:

Los siguientes resultados se tomaron después de 10 horas funcionamiento continuo, donde el sistema no presento ningún problema, los resultados obtenidos son satisfactorios.

Ta= 25 °C (Grados centígrados)

I (Amperios)	V (Voltios)
0.2 A	12 V

Tabla 7. Medidas electroválvula

	OFF	ON	T °C
V BE (Voltios)	-3.5 V	-0.65 V	26 °C
V CE (Voltios)	11.6 V	-16.2mV	
V BC (Voltios)	-12.6 V	0.65 V	

Tabla 8. Valores medidos transistor BC547

	OFF	ON	T °C
V BE (Voltios)	11.54 V	0.66V	29 °C
V CE (Voltios)	11.87 V	0.67 V	
V BC (Voltios)	1.8m V	45.6 mV	

Tabla 9. Valores medidos transistor 2N2222A

ACTIVACIÓN EN AC (Calentador, Tubos led): MEDICIONES TRIAC BTA06 y BTA08

Las mediciones se realizaron después de 14 horas de funcionamiento, teniendo en cuenta que los tubos led están encendidos todo el tiempo, y el calentador de ambiente funciona por ciertos momentos ya que la estructura conserva el calor, su función aumenta en la noche, donde la temperatura en el laboratorio desciende hasta los 9°C y es necesaria aumentar a 28°C.

CIRCUITO TUBOS LED: (BTA06)

A pesar de que en el diseño se obtuvo que el circuito no necesita disipador, se le implementó un disipador de área pequeña como protección ya que la iluminación es continua.

Ta= 16°C (Grados Centígrados)

BTA06	ON	OFF
V T1T2 (Voltios)	0.5 V	120 V
V T1G (Voltios)	0.1 V	0 V
V T2G (Voltios)	0.1 V	115.5 V

Tabla 10. Valores medidos TRIAC BTA06 a plena carga

	DISIPADOR	TRIAC	TUBOS LED
T °C	18	16	22

Tabla 11. Temperatura del circuito iluminación

CIRCUITO CALENTADOR AMBIENTE: (BTA08)

Se implementó el disipador de área grande, como se había obtenido en el diseño.

Ta= 20°C (Grados Centígrados)

BTA08	ON	OFF
V T1T2 (Voltios)	0.9 V	120 V
V T1G (Voltios)	0.1 V	0 V
V T2G (Voltios)	2.6 V	116 V

Tabla 12. Valores medidos TRIAC BTA08 a plena carga

	DISIPADOR	TRIAC	CALENTADOR
T °C	27	22	28

Tabla 13. Temperatura del circuito calentador

6.2 RESULTADOS DE LAS VARIABLES ADQUIRIDAS Y ACONDICIONADAS

AGITACIÓN: (Libras por minuto)

3,5 LPM

TEMPERATURA DEL MEDIO LIQUIDO:



Ilustración 44. Visualización temperatura con PT100. Fuente: [El Autor]

TEMPERATURA DEL ARMARIO DE CONTROL:

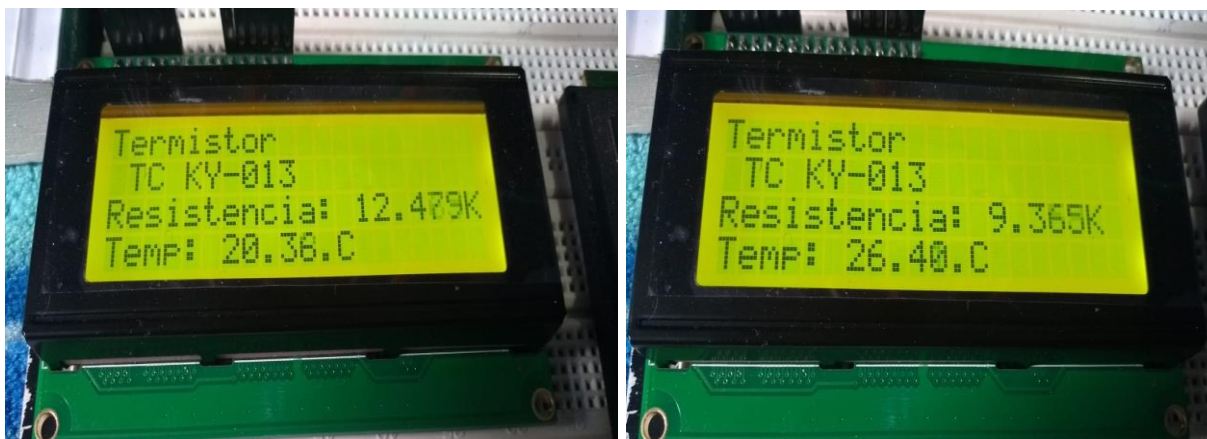


Ilustración 45. Visualización temperatura con Termistor NTC 10K Ω . Fuente: [El Autor]

POTENCIAL DE HIDRÓGENO (pH) DEL MEDIO DE CULTIVO:

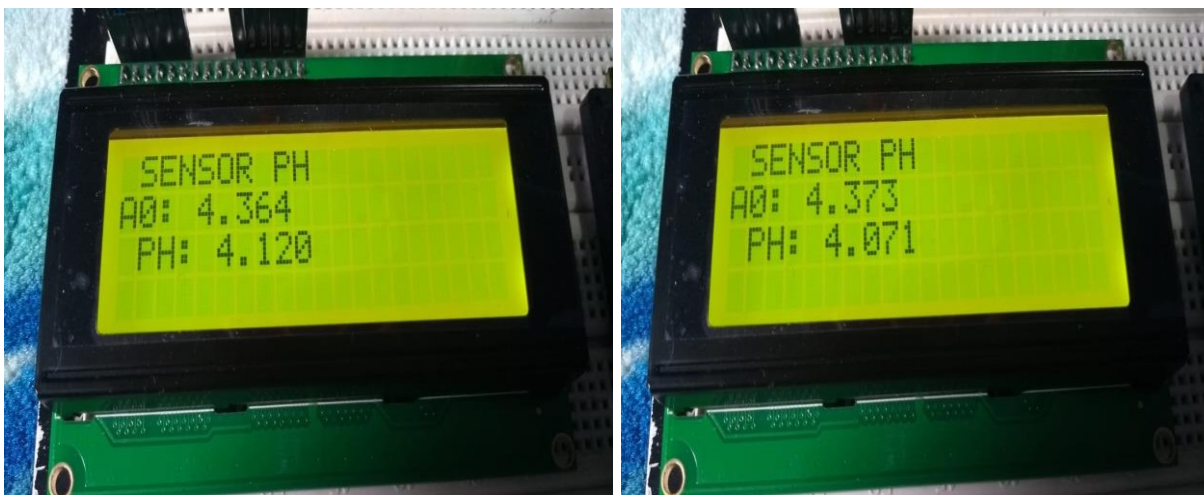


Ilustración 46. Visualización valor Ph. Fuente: [El Autor]

INTENSIDAD LUMINICA EN LA SUPERFICIE DEL FOTOBIORREACTOR:



Ilustración 47. Visualización Intensidad Luminosa en el FBR. Fuente: [El Autor]

6.3 RESULTADOS COMPORTAMIENTO DE LOS CONTROLADORES EN EL PROCESO

LA AGITACIÓN CONTROL MECÁNICO:

AIREACIÓN:

BOMBA DE AIRE 2.5 PSI = CAUDALIMETRO 3.5 LPM/CTE

$$PSI = Lb/in^2$$

$$LPM = 5.89 \times 10^{-4} ft^3/s$$

$$1 BAR = 14 PSI$$

PRESIÓN (PSI)	CAUDAL (LPM)
2.5 lbf/in ²	3.5 l/m
2.0 lbf/in ²	3.0 l/m
1.5 lbf/in ²	2.5 l/m
1.0 lbf/in ²	2.0 l/m
0.5 lbf/in ²	1.2 l/m
0 lbf/in ²	0 l/m

Tabla 14. Resultados Control Agitación



Ilustración 48. Prueba de agitación. Fuente: [El Autor]

En la ilustración 49 y la ilustración 50, se puede observar los resultados de las pruebas de aireación y la conexión al instrumento que sirve de medida y a la vez de controlador por rotámetro. Este instrumento nos permite medidas de 100 PSI y una medida en caudal de 0 a 5 LPM.



Ilustración 49. Resultados obtenidos de Agitación. Fuente: [El Autor]



Ilustración 50. Conexión controlador. Fuente: [El Autor]

El controlador mecánico funciona de buena forma, se encuentra deficiencia en la presión de la bomba, pero la agitación es constante y proporciona la transferencia de masa necesaria.

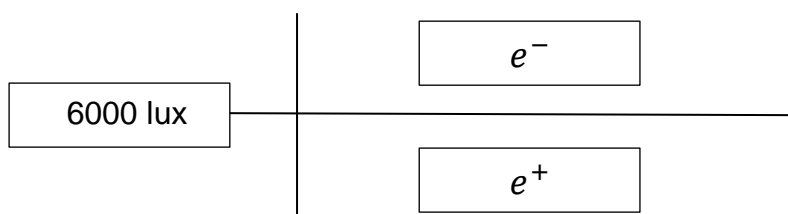
LA LUMINOSIDAD CONTROL ON-OFF:

El módulo de control ON-OFF consiste en activar el mando de iluminación cuando la incidencia de luz este por debajo de 2115lx, y luego desactivarlo cuando este se encuentre por arriba.

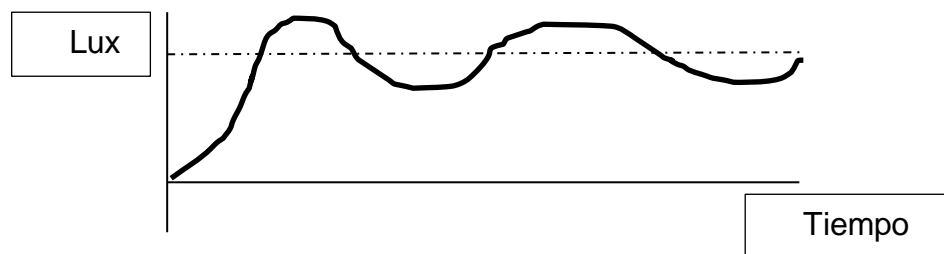
Error: lazo cerrado (ideal que sea cero)

$$6000 - 5800 = 200^+ = e^+$$

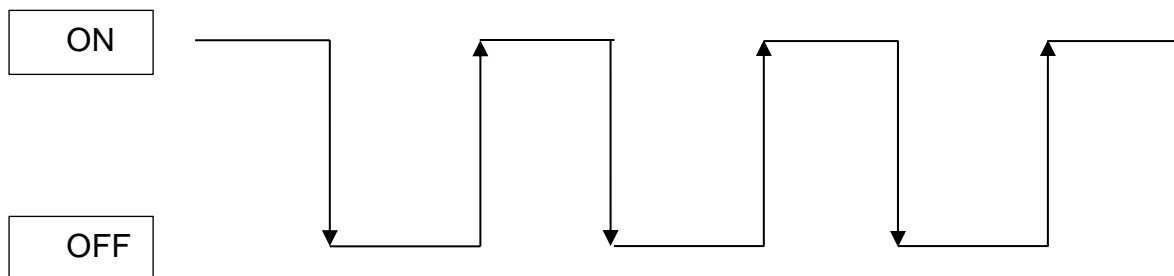
$$6000 - 6200 = -200^- = e^-$$



Respuesta del sistema:



Respuesta de activación:



El controlador ON-OFF funciona perfectamente, al ser un ambiente controlado (armario de control) la incidencia de luz se mantiene en el rango de 2115 lux.

LA TEMPERATURA CONTROL PID (TERMISTOR):

Se observa, a partir de la tabla 15, se realiza la caracterización del sensor termistor, para tener claro su comportamiento a la vez de diseñar el controlador, para esto se presenta el comportamiento de la resistencia frente a la temperatura en la ilustración 51, y el comportamiento del voltaje contra la temperatura en la ilustración 52.

T (Grados centígrados)	RES (Ohmios)	Voltaje (miliVolitos)	binario
0.0 °C	35563 Ω	224,3 mV	14355
5.0 °C	27119 Ω	275,9 mV	17658
10.0 °C	20860 Ω	331,8 mV	21235
15.0 °C	16204 Ω	390,8 mV	25011
20.0 °C	12683 Ω	451,4 mV	28890
25.0 °C	10000 Ω	512 mV	33768
30.0 °C	7942 Ω	570,7 mV	36525
35.0 °C	6327 Ω	627,2 mV	40141
40.0 °C	5074 Ω	679,3 mV	43475

Tabla 15. Caracterización de la planta variando temperatura de 0° a 40°

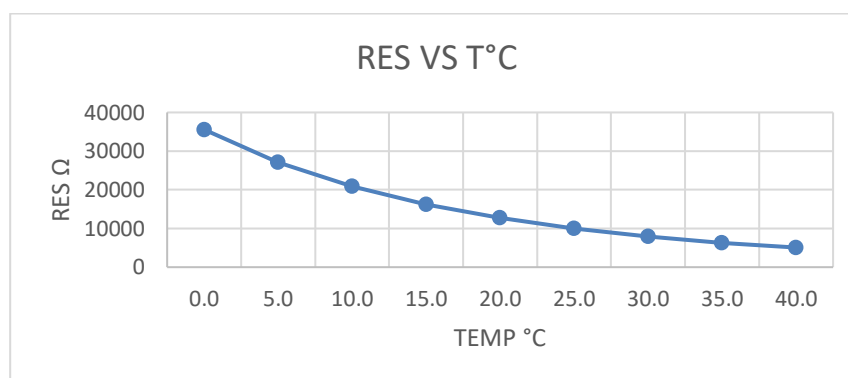


Ilustración 51. Gráfica Resistencia vs Temperatura. Fuente: [El Autor]

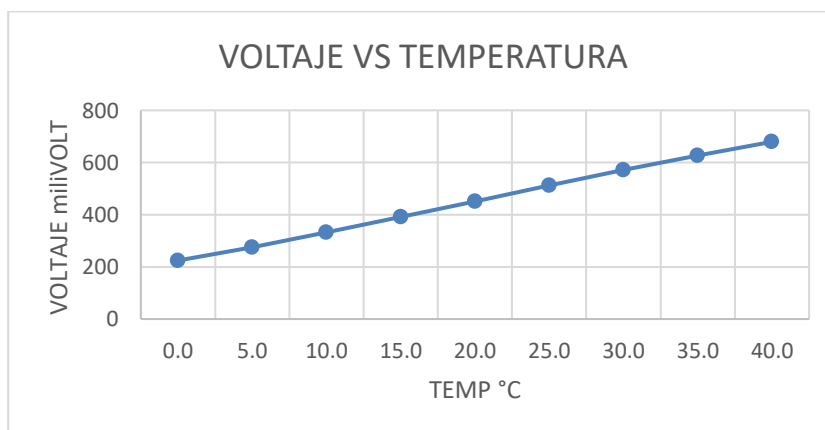


Ilustración 52. Gráfica Voltaje vs Temperatura. Fuente: [El Autor]

RESPUESTA DEL CONTROLADOR:

En la tabla 16 se realiza una comparación de nuestro sistema tradicional (sin ningún tipo de control) con el sistema diseñado e implementado (Prototipo automatizado), se puede observar las diferencias y la eficiencia alcanzada con el PID.

	Parámetros sin controlador	Parámetros con controlador
RISE TIME	330 seg	41.3 seg
SETTLING TIME	380 seg	73 seg
OVERSHOOT	0%	1.29%

Tabla 16. Parámetros controlador

Como resultado de los datos de la tabla 16, y ayuda del software PID tuning en Matlab, se observa el comportamiento del sistema con las ganancias de las constantes obtenidas en la figura 53.

RESPUESTA DEL SISTEMA:

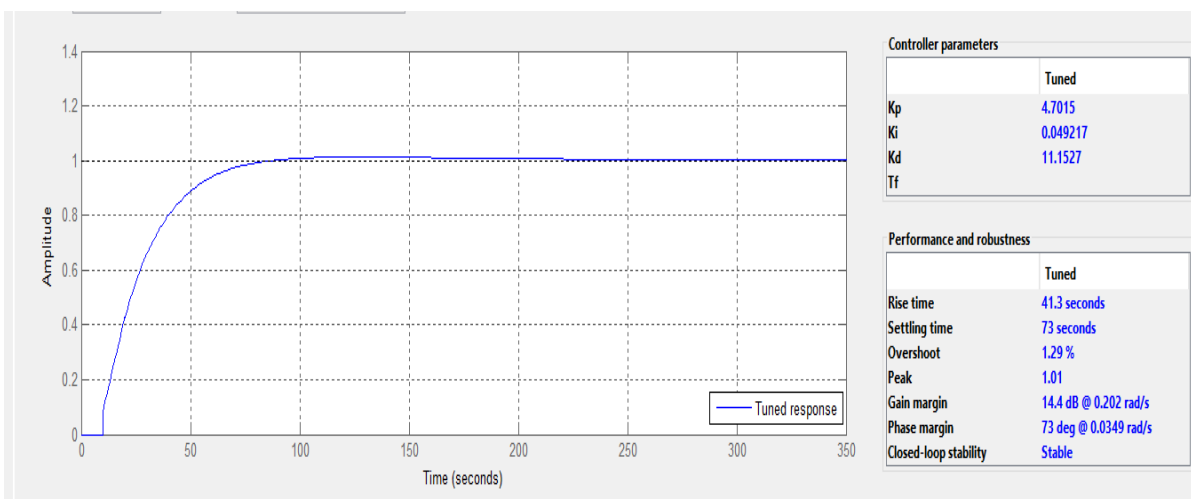


Ilustración 53. Respuesta controladora PID. Fuente: [El Autor]

El controlador PID de temperatura funciona muy bien, la temperatura siempre se está estableciendo alrededor de 28° que es el valor deseado, se excede solo en 1,29%, y el tiempo de levantamiento se reduce aproximadamente en 229 segundos, el tiempo que toma para estabilizarse es mínimo de 73 segundos.

6.4 RESULTADOS INTERFAZ DE MONITOREO EN LABVIEW

Las ilustraciones 55 y 56 permiten observar la interfaz gráfica diseñada para la interacción entre el usuario y el prototipo, donde permite visualizar el comportamiento de cada una de las variables en tiempo real, y dar una idea de la disposición sensorica en la estructura del fotobiorreactor.

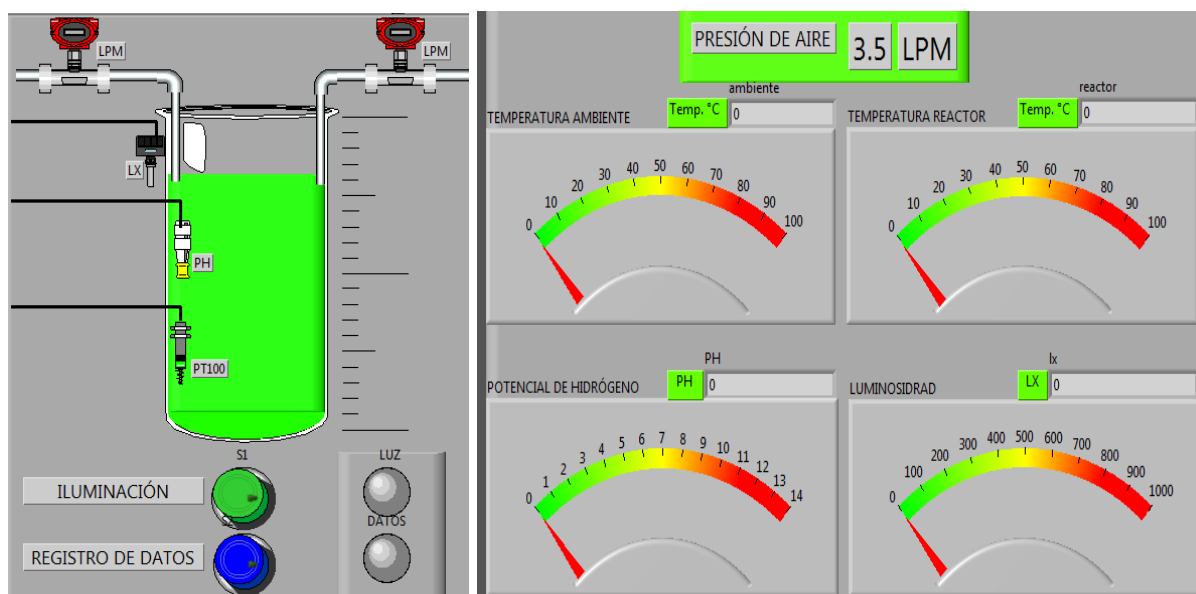


Ilustración 54. Interfaz gráfica, estructura del FBR y diseño instrumentos de medida. Fuente: [El Autor]

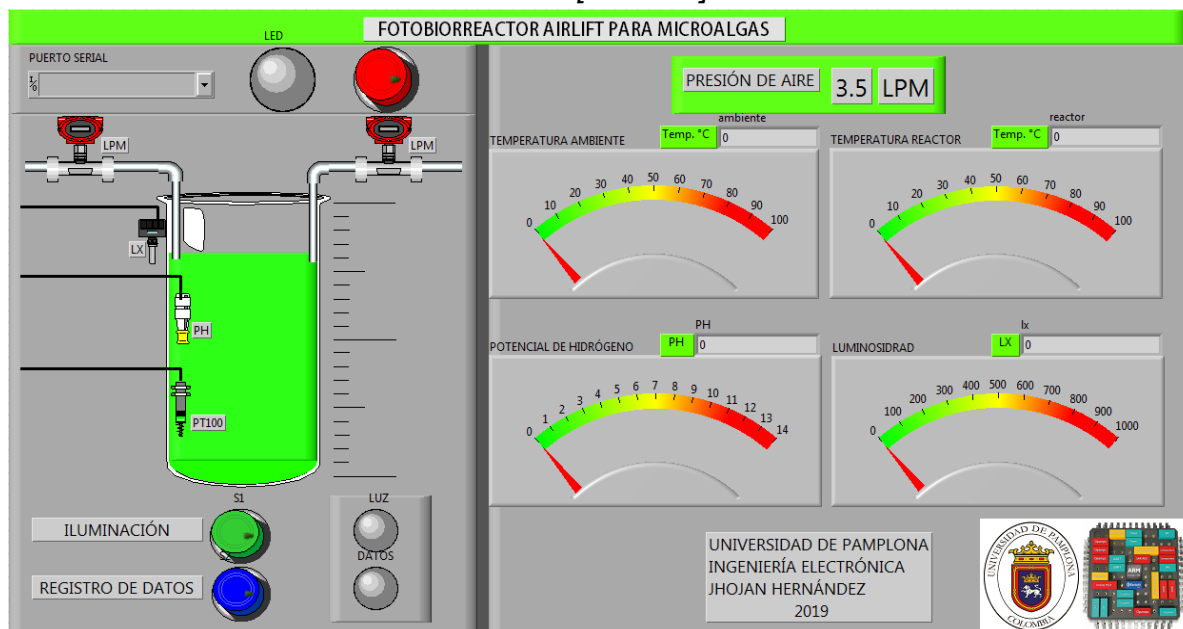


Ilustración 55. Interfaz de monitoreo FBR airlift automatizado. Fuente: [El Autor]

6.5 RESULTADOS ESTRUCTURA DEL PROTOTIPO, DISTRIBUCIÓN SENSORICA, DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA.

La ilustración 57, permite observar la disposición del fotobiorreactor Airlift dentro de la estructura de control (armario), se presenta la ubicación de los sensores y dispositivos actuadores, los cables de control debidamente separados de los cables de activación, estos últimos separados los cables de DC con los de AC para que estos no infieran en los otros y generen ruido como ocurre en muchos casos afectando a los controladores.



Ilustración 56. Prototipo automatizado (internamente). Fuente: [El Autor]

La ilustración 58, permite observar el armario de control en su parte frontal, donde se encuentran ubicados los dispositivos de visualización y control, se dispone de una LCD para visualizar el comportamiento de las variables dado el caso de que no se esté monitoreando continuamente en un computador, las activaciones solo estarán disponibles una vez cada interruptor este en ON, y el teclado en caso de que se deseen cambiar los valores deseados en los cuales se debe estabilizar cada variable.



Ilustración 57. Prototipo Automatizado (externamente). Fuente: [El Autor]

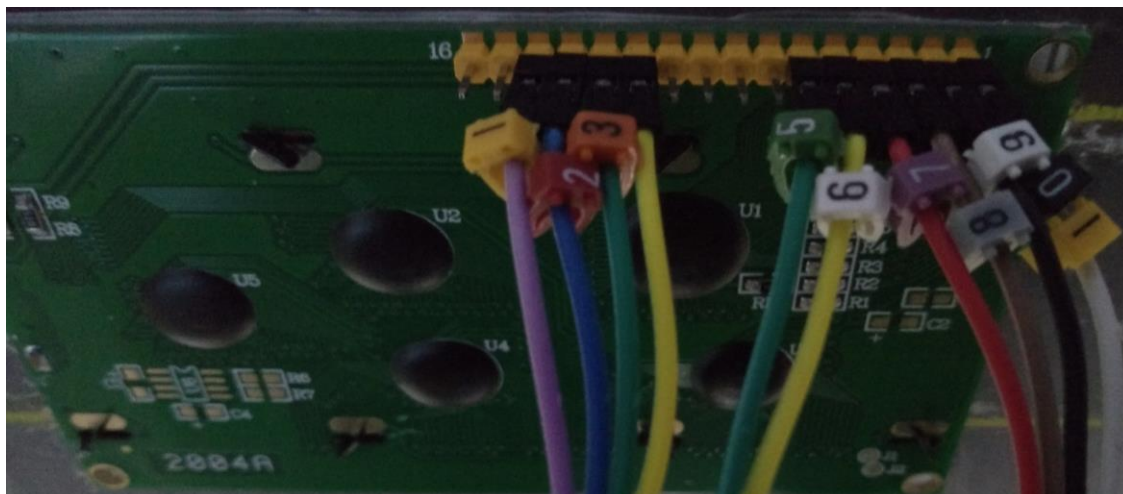


Ilustración 58. Marcado cables de control y alimentación. Fuente: [El Autor]

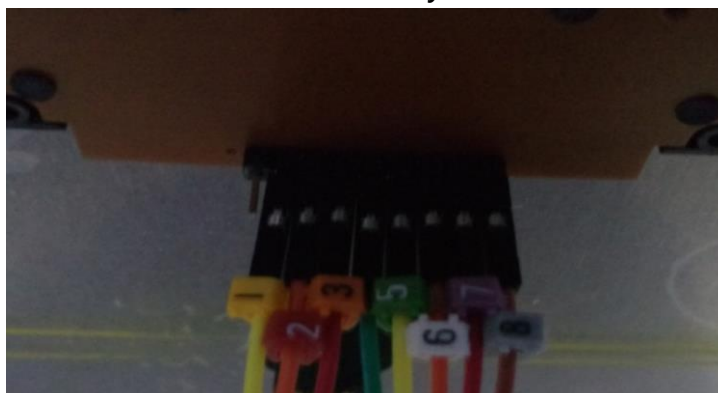


Ilustración 59. Marcado cables de control y alimentación. Fuente: [El Autor]

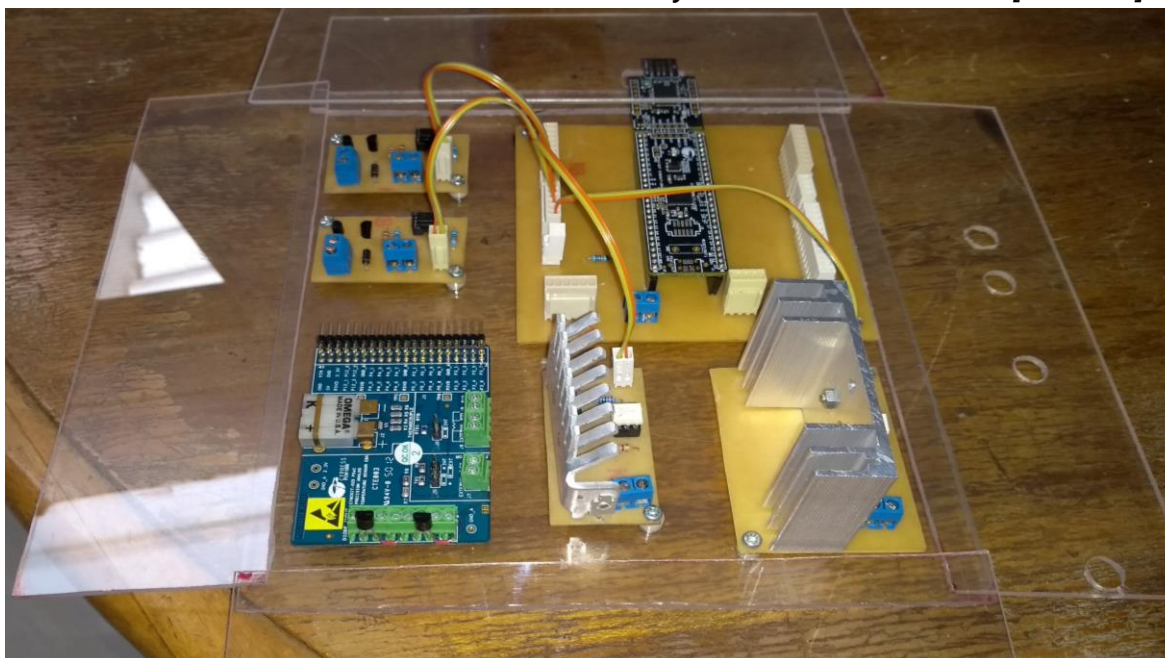


Ilustración 60. Caja acrílica para: placas de control y potencia separadas por aislamiento óptico. Fuente: [El Autor]

6.6 EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO CONSTRUIDO Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS DEL PROCESO BIOLÓGICO

La ilustración 62, la ilustración 63 y la ilustración 64, muestra el proceso paso a paso desde desinfectar la estructura, hacer los medios de cultivos con sus debidos minerales hasta tener obtener nuestro inocular, teniendo el medio y el inocular se colocó en marcha el prototipo.

PUESTA EN MARCHA DEL PROCESO BIOTECNOLÓGICO:



Ilustración 61. Esterilización fotobiorreactores con agua destilada caliente e hipoclorito. Fuente: [El Autor]

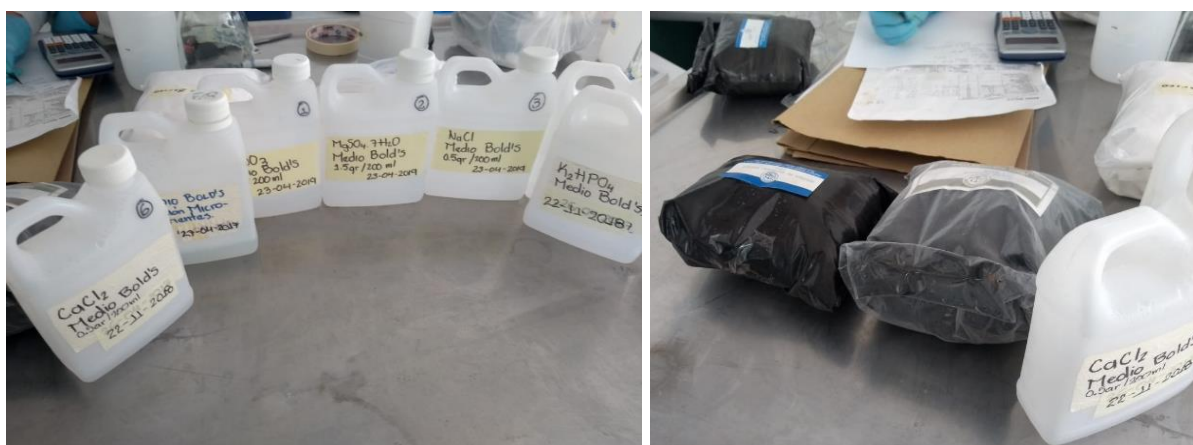


Ilustración 62. Preparación del medio de cultivo. (Proteínas en agua destilada). Fuente: [El Autor]



Ilustración 63. Esterilización del medio de cultivo. (autoenclavé). Fuente: [El Autor]



Ilustración 64. Puesta en marcha del prototipo (Ubicado en el laboratorio de Biotecnología). Fuente: [El Autor]

Medición de la Biomasa microalgal:

Conteo directo.

Peso seco.

Densidad óptica.

Los resultados del crecimiento de biomasa microalgal se analizaron por el método de densidad óptica, para el cual:

Curva de correlación de métodos.

Sistema de cultivo concentrado (1 mes, solución madre).

Hacer diluciones seriadas de 10 en 10.

Determinar en cada tubo (patrón):

- Peso seco
- Densidad óptica.

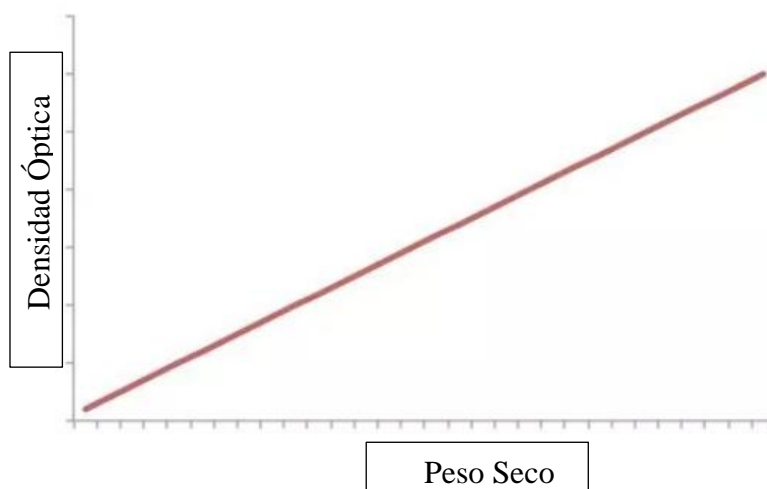


Ilustración 65. Densidad óptica vs Peso seco. Fuente: [El Autor]

Después de la semana, solo se tomó la densidad óptica y se cambiaron los valores en Excel.

La ilustración 67 muestra la solución madre después de dos semanas de funcionamiento, de ella se toman diferentes diluciones seriadas como se observa en la ilustración 68, por último a partir del proceso estandarizado densidad óptica se pasa a la validación de la biomasa obtenida a partir lentes UV y cámaras de conteo.



*Ilustración 66. Sistema de Cultivo concentrado y toma de muestras (Solución madre).
Fuente: [El Autor]*



Ilustración 67. Diluciones seriadas 10 en 10. Fuente: [El Autor]

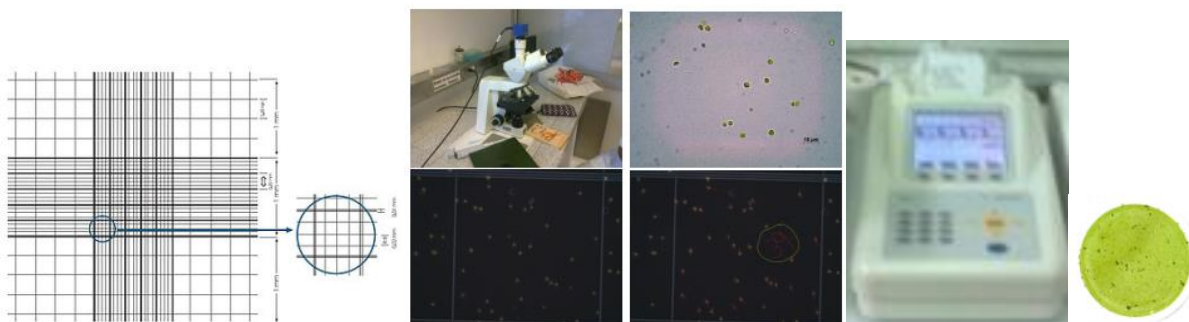


Ilustración 68. Se cuantifico: conteo de células, Peso seco, Densidad óptica por separado. Fuente: [El Autor]

Número de células por microlitro del medio de cultivo se calculó con la siguiente fórmula:

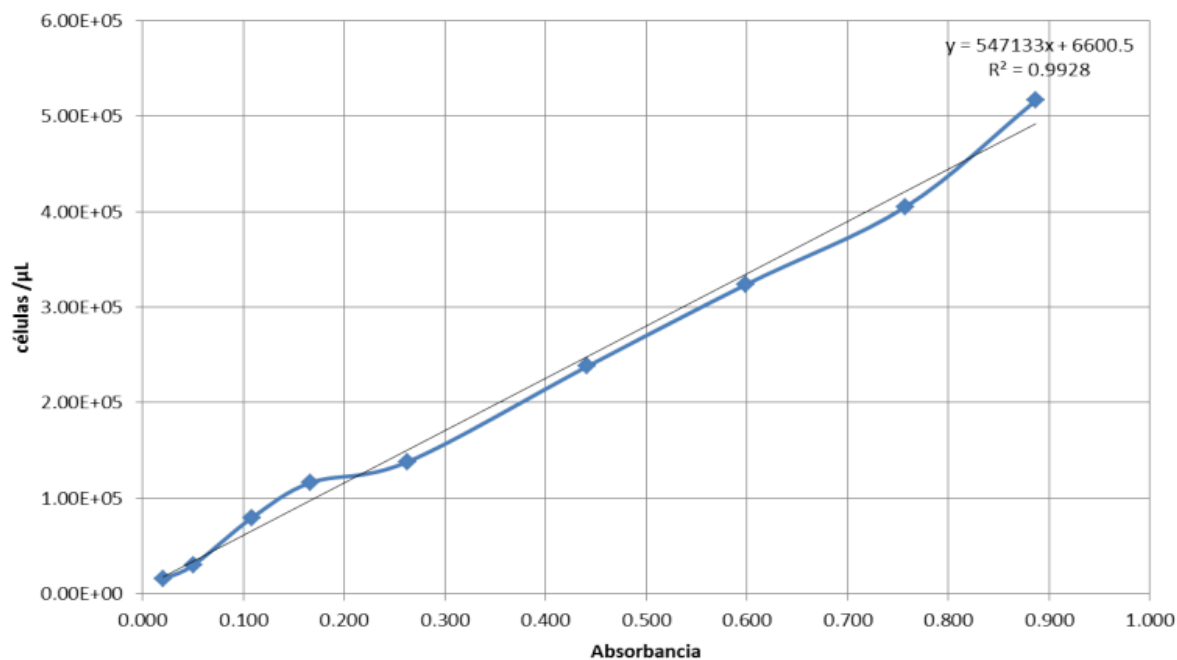
$$\frac{\text{Células}}{\mu\text{L}} = \frac{\text{número de células contadas}}{\text{area inspeccionada}} * \text{Profundidad de la camara}$$

Curvas de calibración:

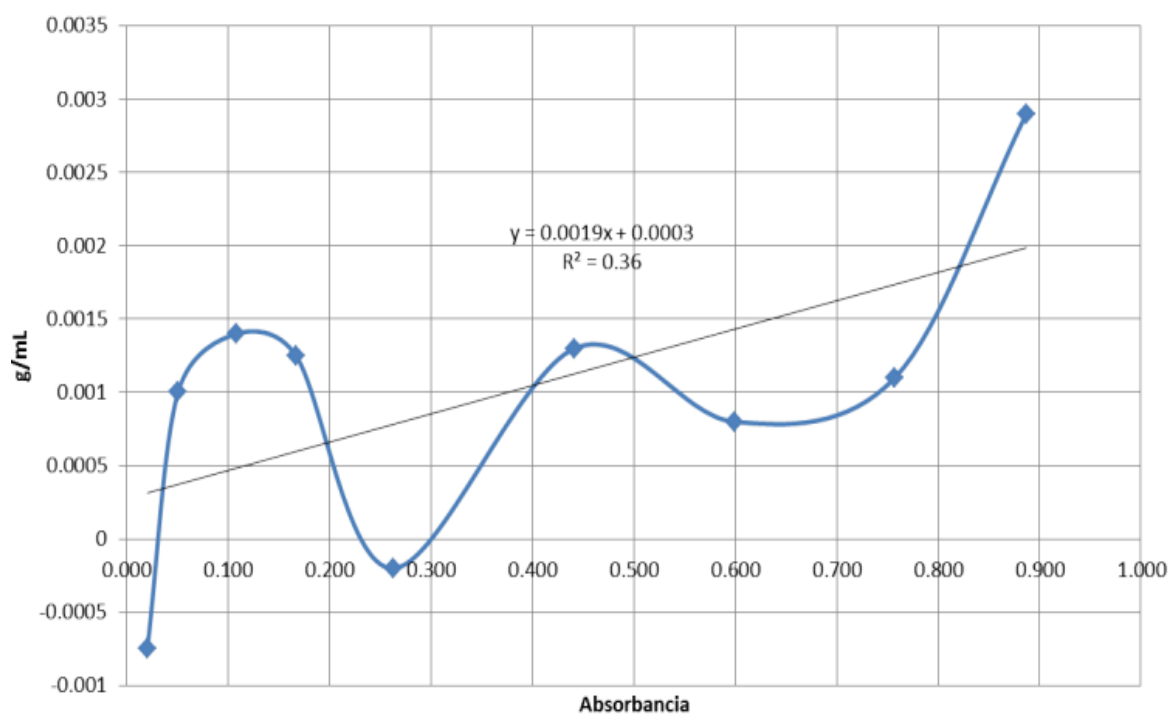
DILUCIÓN	ABSORBANCIA (Adimensional)	PESO SECO (gr)	NÚMERO DE CÉLULAS	CÉLULAS/ μL
MADRE	0.887	0.0029 gr	4134	5.17E+05
2	0.757	0.0011 gr	3240	4.05 E+05
3	0.599	0.0008 gr	2590	3.24 E+05
5	0.442	0.0013 gr	1904	2.38 E+05
6	0.263	-0.0002 gr	1102	1.38 E+05
7	0.167	0.00125 gr	930	1.16 E+05
8	0.109	0.0014 gr	634	7.93 E+04
9	0.051	0.001 gr	240	3.00 E+04
10	0.020	-0.00075 gr	120	1.50 E+04

Tabla 17. Datos curvas de calibración

Las ilustraciones 70 e ilustración 71 permiten observar curvas de correlación realizadas a partir de la tabla 17, con el fin de validar el proceso de densidad óptica pasando los valores obtenidos a lo que en verdad se desea conocer que es cantidad de biomasa microalgal en peso seco.



*Ilustración 69. Curva calibración: Relación densidad celular con densidad óptica.
Fuente: [El Autor]*



*Ilustración 70. Curva de calibración: Relación Peso seco con Densidad óptica.
Fuente: [El Autor]*

PRODUCCIÓN FOTOBIORREACTOR AIRLIFT MANUAL:

EXPERIMENTO 1		
Litros FB	Tiempo	Producción
20 L	2 semanas (por lote)	5 gr

Tabla 18. Resultados experimento manual 1

EXPERIMENTO 1			
Microalga	pH	Temperatura	Aireación
Chlorella sorokiniana	7	Ta (ciclos circadianos)	2,5 PSI

*Tabla 19. Condiciones de operación experimento 1***PRODUCCIÓN FOTOBIORREACTOR AIRLIFT CONTROLADO Y MONITOREADO:**

EXPERIMENTO 2		
Litros FB	Tiempo	Producción
20 L	2 semanas (por lote)	14 gr

Tabla 20. Resultados experimento automático 1

EXPERIMENTO 2				
Microalga	pH	Temperatura	Aireación	Iluminación Artificial (Luz blanca)
Chlorella sorokiniana	7	28° - 30°C	2,5 PSI	2 Tubos led: 20W 6000 lux

Tabla 21. Condiciones de operación experimento 2

COSTO MANO DE OBRA:

TENIENDO EN CUENTA:	
Recién Egresados	
Implicando pago como honorarios OPS	
Estimación tiempo dedicado (12 meses)	
	VALOR
HONORARIOS OPS MENSUAL	\$ 1'200.000
HORA TRABAJADA	\$ 5.000
TOTAL HONORARIOS	\$ 2'500.000

Tabla 22. Costo Mano de Obra Prototipo

COSTO ENERGÉTICO DURACIÓN 3 SEMANAS:

CONSUMO ENERGETICO				
DISPOSITIVO	POTENCIA	USO/DÍA	USO/3SEMANAS	CONSUMO
CALENTADOR	400 W	24 h	504 h	201.6 Kw/h
2 TUBOS LED	20 W	24 h	504 h	10.08 Kw/h
2 electroválvulas	20 W	2 h	42 h	0.84 Kw/h
CIRCUITERIA	6 W	24 h	504 h	3.02 Kw/h
			TOTAL	215.54 Kw/h

Tabla 23. Tabla de consumo energético en 3 semanas

$$\frac{215.54 \text{Kw}}{\text{h}} * \$ 475,06 = \$ 102.394$$

COSTO - BENEFICIO:

1gr Microalga pura = \$ 200.000

1gr Microalga Comercial = \$ 80.000



CONCLUSIONES

- Se determinó mediante una extensa recopilación y selección de material bíblico el valor en cual se debe establecer cada variable durante el proceso biotecnológico: Iluminación en un rango de 6000 lux a 7000 lux, Temperatura en un rango aceptable de 28°C a 30°C, Agitación constante con presión de 2,5 lb/in^2 , Potencial Hidrogeno en una escala de Base - Acidez de 7 a 8 pH .
- La implementación de un prototipo de fotobiorreactor Airlift controlado y monitoreado incidió positivamente sobre el proceso biológico del cultivo de microalgas por lotes al haber un aumento significativo durante la toma de muestras de dos semanas en un Fotobiorreactor de producción media de 20 Litros.
- La implementación de la tarjeta de adquisición PSoC 5LP tuvo un papel importante gracias a sus métodos de adquisición, procesamiento y control de señales a partir de bloques análogos, digitales y de acondicionamiento de temperatura (RTD, THERMISTOR), que redujo las líneas de código y presenta un entorno de programación más agradable que el usado por otras tarjetas, la implementación del software LabVIEW se caracterizó porque las pruebas hechas comprobaron que el funcionamiento del sistema garantizaba el cumplimiento de requerimientos establecidos en la visualización de variables, como tiempo de lectura de las variables (10ms), y tiempo en funcionamiento del monitoreo (3 semanas 24/7)
- La validación del bioproceso se realizó colocando en marcha dos fotobiorreactores (Tradicional, Automatizado), donde las muestras se tomaron durante 2 semanas en cesiones de 2 (Mañana, Tarde) al mismo tiempo y diariamente, así se demostró a partir de procesos estandarizados de medición de biomasa microalgal (Densidad óptica), que el fotobiorreactor automatizado (Prototipo) es más eficiente que el fotobiorreactor tradicional, lo anterior evidenciado a partir de imágenes y curvas de correlación.
- El resultado de este proyecto es por tanto en 3 aspectos: Reconocimiento por parte de la Universidad de Antioquia e invitación a congreso, Clasificación al encuentro nacional de semilleros realizado por RedCOLSI con una puntuación de 95 puntos, un aumento significativo en calidad y cantidad del producto de biomasa microalgal.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alibaba. (2017). *Alibaba*. Obtenido de <https://spanish.alibaba.com:https://spanish.alibaba.com/product-detail/2l-lab-testing-reactor-for-reactor-price-60319900758.html?spm=a2700.8699010.29.125.68a76ccdiHEDkE>
- Becker, E. (1994). *Microalgae: Biotechnology and Microbiology*. Reino Unido: Cambridge University Press.
- Bioplat. (2010). *Energía de las algas presente y futuro*. España-Madrid: Plataforma Tecnológica Española.
- Bogado, H. P. (2014). *CONTROLADOR DE TEMPERATURA CON PID*. Universidad Católica.
- C. Contreras, L. F. (2003). *Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas*. Niza: Interciencia.
- Cantarero, T. A. (2013). *Diseño del Controlador PID*. Sevilla: Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática.
- Chen, C.-T. (1970). *Introduction to Linear System Theory: Mathematical Description of Systems*. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Chisti. (2007). *Biodiesel from microalgae*. Reino Unido: Biotechnology Advances.
- Cypress. (06 de July de 2017). Obtenido de <http://www.cypress.com/documentation/development-kitsboards/cy8ckit-059-psoc-5lp-prototyping-kit-onboard-programmer-and>
- D. Dah-Wei, a. P. (2012). *Growth condition study of algae function in ecosystem for CO2 bio-fisition*. Journal of Photochemistry and Photobiology.
- Doran, P. (1998). *Principios de ingeniería de los bioprocesos*. Acribia S.A.
- F. Lopez, R. R. (2010). *Diseño y montaje de un fotobiorreactor a escala laboratorio para la producción de microalgas*. Colombia-Bucaramanga: Tesis profesional, Universidad Industrial de Santander.
- Fernández, M. (2016). *Diseno, montaje y caracterización de fotobiorreactores airlift para el cultivo de la microalga Chlorella Sorokiniana*. Medellín-Colombia : Universidad EAFIT.
- Gluz, J. M. (2010). *Bioreactors, airlift reactors*.



- Gluz, J. M. (2010). *Bioreactors. Airlift reactors*.
- Incorporated, T. I. (Julio 2014). *DRV8825*. Dallas, Texas: Texas Instruments Incorporated.
- INSTRUMENTS, N. (2017). *Que es LabVIEW*. LabVIEW 2018.
- K. Åström, T. H. (1995). *PID controllers: theory, design, and tuning*. Ed. Instrument Society of America.
- KHALIL K. Hassan. (2002). *Nonlinear Systems*. New Yersey: Prentice Hall,Tercera edicion .
- M. Díaz, M. B. (2004). *Prueba de toxicidad acuática: Fundamentos y métodos*. Colombia-Bogota: 1ra ed. Universidad Nacional de Colombia.
- Moreno, D. R. (2017). *Agitación y transferencia de masa de CO2 en fotobiorreactores tipo AIRLIFT*. Revista de investigación, Fundación Universidad de America.
- Morilla, S. D. (2000). *Controladores PID. Fundamentos y*. Monografía CEA-IFAC.
- Ogata, K. (2010). *INGENIERIA MODERNA DE CONTROL*. MADRID: PEARSON EDUCACIÓN.
- OSPINO, J. C. (2016). *ELECTRÓNICA DE POTENCIA* . Pamplona- Colombia: Universidad de Pamplona.
- Semiconducto, C. (2015). *Universal Asynchronouns reciver transmitter (UART)*. California: Cypress Semiconductor Corporation.
- Semiconducto, C. (2016). *Thermistor Calculator Component Datasheet*. San jose CA.
- Semiconductor, C. (2015). *Interrup*. San Jose,CA.
- Valvano, J. (2010). *Introducción a los sistemas de Microcomputadora: EMBEBIDOS*. Bogota-Colombia : Performance-centered adaptive curriculum for employment needs.
- Wang, B. (2008). *Biomitigation using microalgae*. Appl Microbiol Biotechnol.



ANEXOS

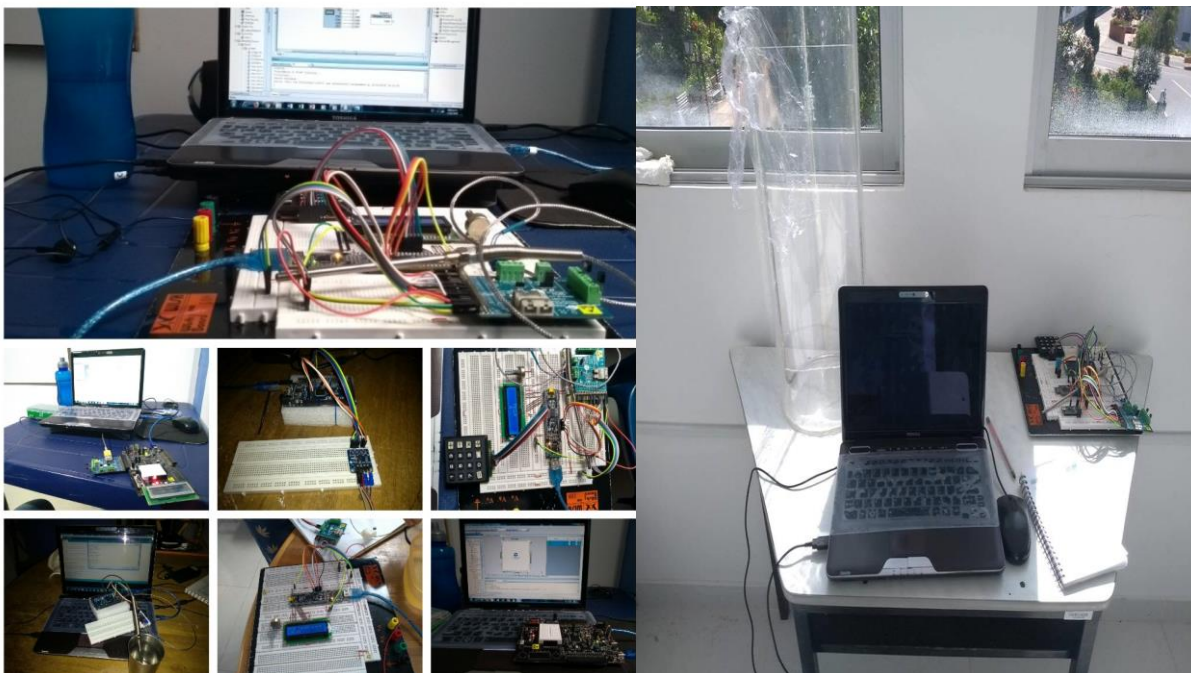


Ilustración 71. Evidencia primeros pasos del proyecto. Fuente: [El Autor]



Ilustración 72. Evidencia avances intermedios del proyecto. Fuente: [El Autor]



Ilustración 73. Etapa final del proyecto. Fuente: [El Autor]

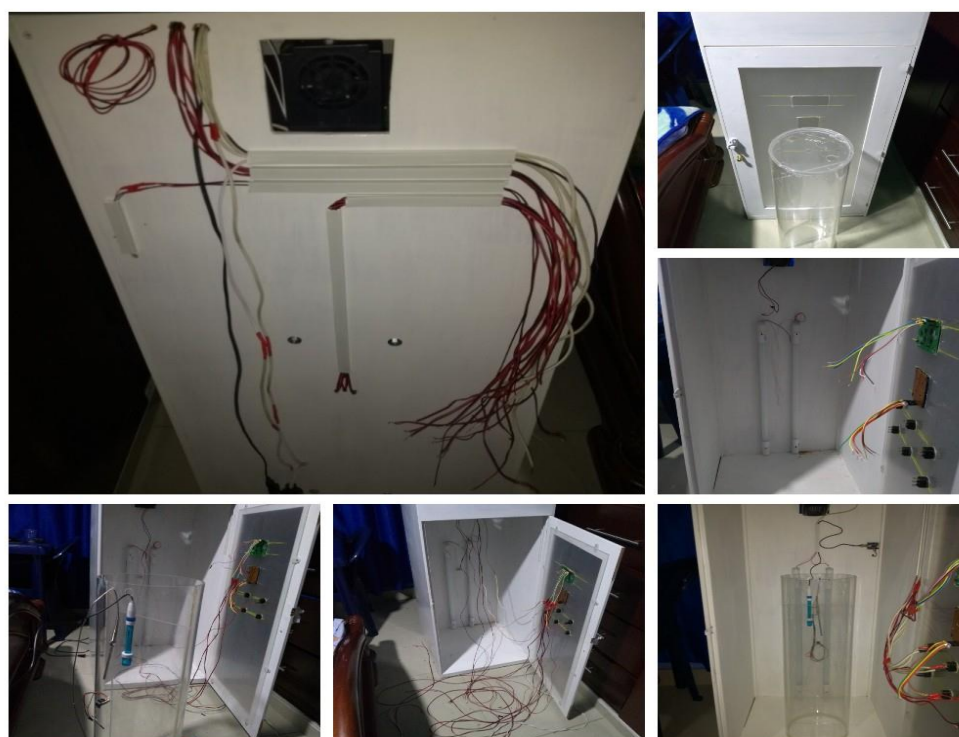


Ilustración 74. Etapa final del proyecto (prototipo). Fuente: [El Autor]

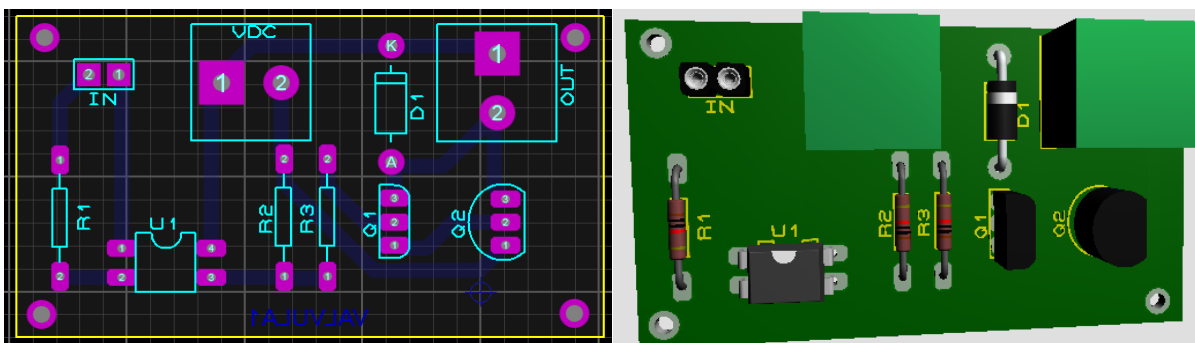


Ilustración 75. PCB Activación DC electroválvulas. Fuente: [El Autor]

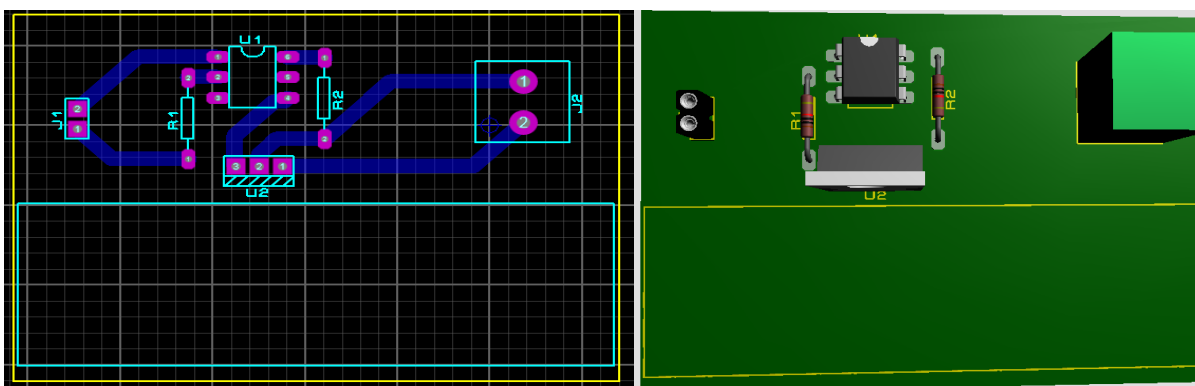


Ilustración 76. PCB Activación AC disipador área grande. Fuente: [El Autor]

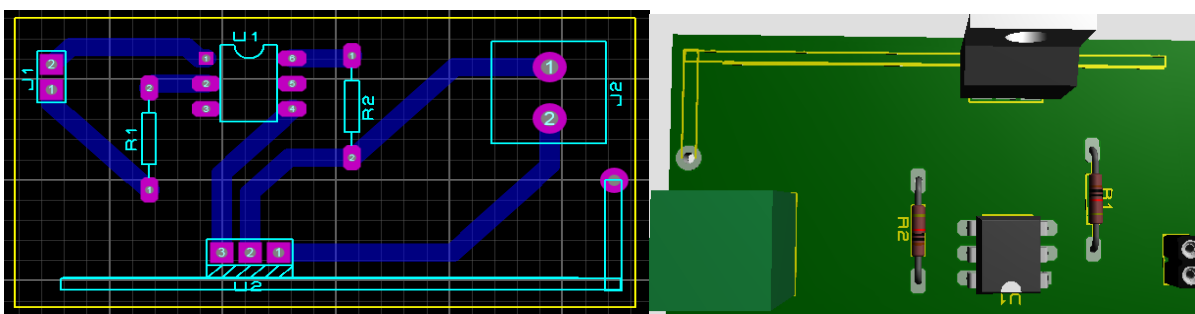


Ilustración 77. PCB Activación AC disipador área pequeña. Fuente: [El Autor]

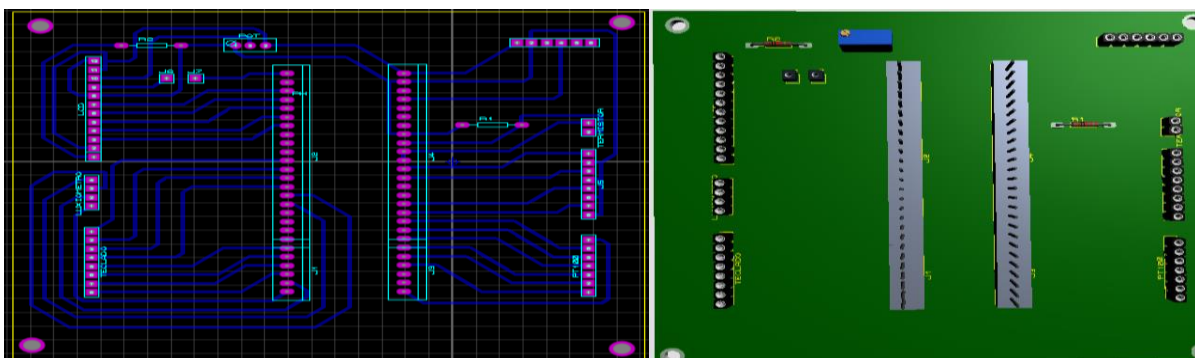


Ilustración 78. PCB tarjeta de adquisición y control. Fuente: [El Autor]

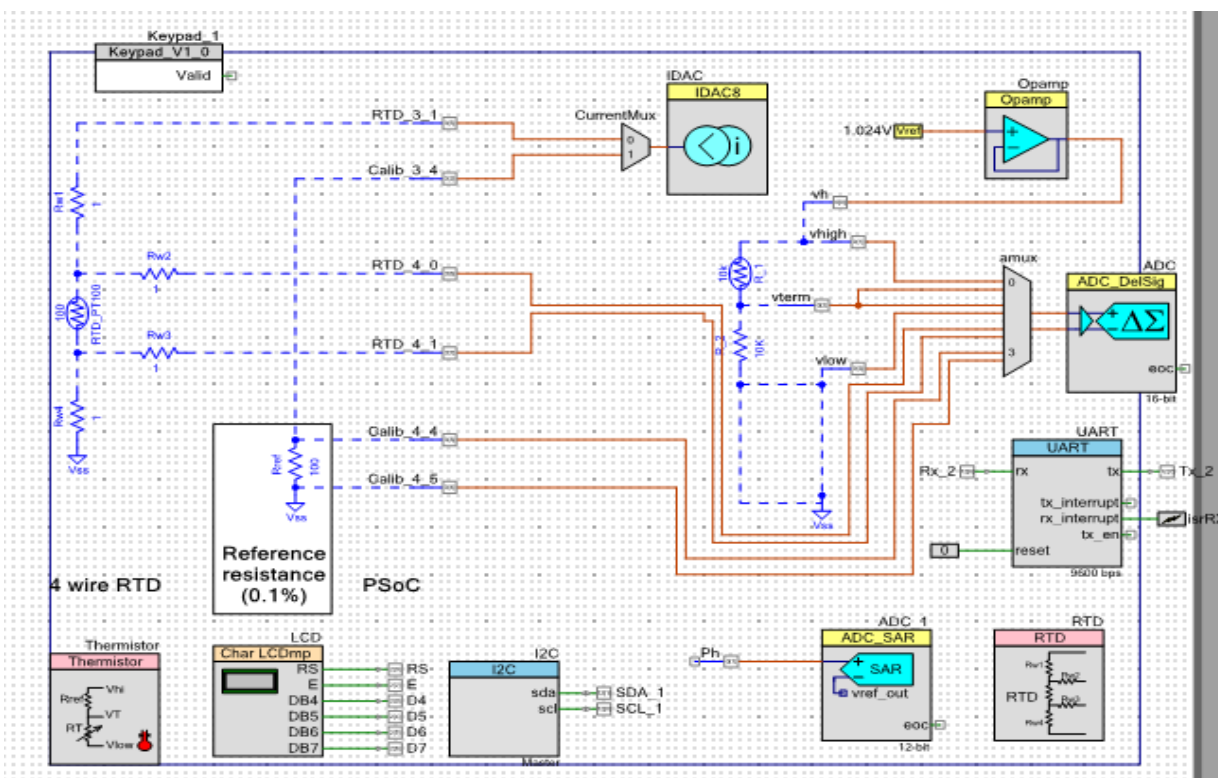


Ilustración 79. Esquema de Implementación interno del Proyecto en PSoC 5LP representado en PSoC CREATOR. Fuente: [El Autor]

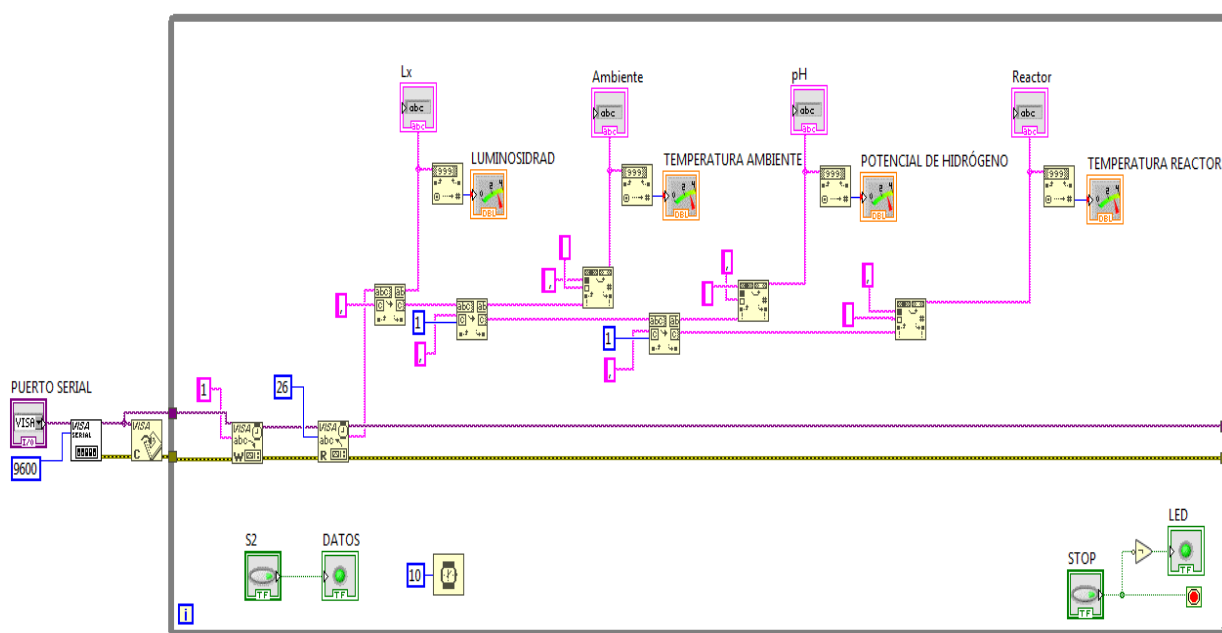


Ilustración 80. Esquema programa del serial con LABview. Fuente: [El Autor]

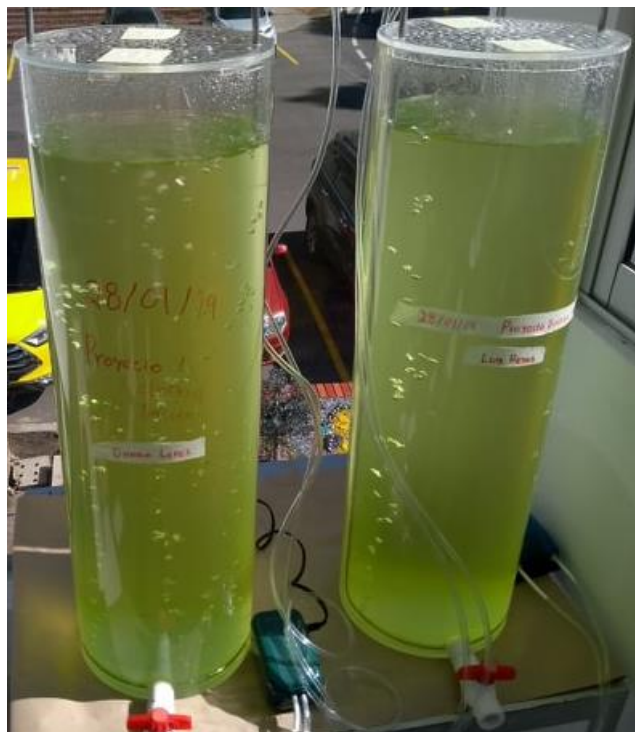


Ilustración 81. Fotobiorreactor manual para pruebas experimento 1. Fuente: [El Autor]



Ilustración 82. Fotobiorreactor Automatizado para pruebas experimento 2. Fuente: [El Autor]

DATASHEET ANEXO 1 (Q1 BC547 ELECTROVÁLVULA)

Absolute Maximum Ratings $T_a=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units	
V_{CBO}	Collector-Base Voltage	: BC546	80	V
		: BC547/550	50	V
		: BC548/549	30	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage	: BC546	65	V
		: BC547/550	45	V
		: BC548/549	30	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	: BC546/547	6	V
		: BC548/549/550	5	V
I_C	Collector Current (DC)	100	mA	
P_C	Collector Power Dissipation	500	mW	
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$	
T_{STG}	Storage Temperature	-65 ~ 150	$^\circ\text{C}$	

Electrical Characteristics $T_a=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
I_{CBO}	Collector Cut-off Current	$V_{CB}=30\text{V}, I_E=0$			15	nA
h_{FE}	DC Current Gain	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=2\text{mA}$	110		800	
$V_{CE}(\text{sat})$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C=10\text{mA}, I_B=0.5\text{mA}$		90	250	mV
		$I_C=100\text{mA}, I_B=5\text{mA}$		200	600	mV
$V_{BE}(\text{sat})$	Base-Emitter Saturation Voltage	$I_C=10\text{mA}, I_B=0.5\text{mA}$		700		mV
		$I_C=100\text{mA}, I_B=5\text{mA}$		900		mV
$V_{BE}(\text{on})$	Base-Emitter On Voltage	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=2\text{mA}$	580	660	700	mV
		$V_{CE}=5\text{V}, I_C=10\text{mA}$			720	mV
f_T	Current Gain Bandwidth Product	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=10\text{mA}, f=100\text{MHz}$		300		MHz
C_{ob}	Output Capacitance	$V_{CB}=10\text{V}, I_E=0, f=1\text{MHz}$		3.5	6	pF
C_{ib}	Input Capacitance	$V_{EB}=0.5\text{V}, I_C=0, f=1\text{MHz}$		9		pF
NF	Noise Figure	: BC546/547/548		2	10	dB
		: BC549/550	$f=1\text{KHz}, R_G=2\text{K}\Omega$	1.2	4	dB
		: BC549	$V_{CE}=5\text{V}, I_C=200\mu\text{A}$	1.4	4	dB
		: BC550	$R_G=2\text{K}\Omega, f=30\sim 15000\text{MHz}$	1.4	3	dB

Thermal Characteristics $T_a = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Characteristic	Max	Units
		BC547 / A / B / C	
P_D	Total Device Dissipation Derate above 25°C	625	mW
		5.0	mW/ $^\circ\text{C}$
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance, Junction to Case	83.3	$^\circ\text{C}/\text{W}$
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	200	$^\circ\text{C}/\text{W}$

Ilustración 83. Hoja de características BC547. Fuente: [Datasheet de Componentes Electrónicos]

DATASHEET ANEXO 2 (Q2 2N2222A ELECTROVÁLVULA)

Absolute Maximum Ratings ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

	Symbol	Value		Unit
		ST 2N2222	ST 2N2222A	
Collector Base Voltage	V_{CBO}	60	75	V
Collector Emitter Voltage	V_{CEO}	30	40	V
Emitter Base Voltage	V_{EBO}	5	6	V
Collector Current	I_C	600		mA
Power Dissipation	P_{tot}	625		mW
Junction Temperature	T_J	150		$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_S	-55 to +150		$^\circ\text{C}$

Ilustración 84. Hoja característica de 2N2222A. Fuente: [Datasheet de Componentes Electrónicos]



DATASHEET ANEXO 3 (BTA08 CALENTADOR)

■ STANDARD (4 Quadrants)

Symbol	Test Conditions	Quadrant		BTA/BTB08		Unit
				C	B	
I_{GT} (1)	$V_D = 12\text{ V}$ $R_L = 30\ \Omega$	I - II - III IV	MAX.	25 50	50 100	mA
V_{GT}		ALL	MAX.	1.3		V
V_{GD}	$V_D = V_{DRM}$ $R_L = 3.3\text{ k}\Omega$ $T_j = 125^\circ\text{C}$	ALL	MIN.	0.2		V
I_H (2)	$I_T = 500\text{ mA}$		MAX.	25	50	mA
I_L	$I_G = 1.2\ I_{GT}$	I - III - IV	MAX.	40	50	mA
		II		80	100	
dV/dt (2)	$V_D = 67\% V_{DRM}$ gate open $T_j = 125^\circ\text{C}$		MIN.	200	400	V/ μs
$(dI/dt)_c$ (2)	$(dI/dt)_c = 3.5\text{ A/ms}$ $T_j = 125^\circ\text{C}$		MIN.	5	10	V/ μs

STATIC CHARACTERISTICS

Symbol	Test Conditions		Value	Unit	
V_{TM} (2)	$I_{TM} = 11\text{ A}$ $t_p = 380\ \mu\text{s}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	MAX.	1.55	V
V_{to} (2)	Threshold voltage	$T_j = 125^\circ\text{C}$	MAX.	0.85	V
R_d (2)	Dynamic resistance	$T_j = 125^\circ\text{C}$	MAX.	50	$\text{m}\Omega$
I_{DRM}	$V_{DRM} = V_{RRM}$	$T_j = 25^\circ\text{C}$	MAX.	5	μA
I_{RRM}		$T_j = 125^\circ\text{C}$		1	mA

THERMAL RESISTANCES

Symbol	Parameter	Value	Unit	
$R_{th(j-c)}$	Junction to case (AC)	DPAK / D ² PAK IPAK / TO-220AB	1.6	
		TO-220AB Insulated	2.5	
$R_{th(j-a)}$	Junction to ambient	$S = 1\text{ cm}^2$	D ² PAK	45
			DPAK	70
		$S = 0.5\text{ cm}^2$	TO-220AB TO-220AB Insulated	60
			IPAK	100

Ilustración 85. Hoja característica Triac BTA08. Fuente: [Datasheet de Componentes Electrónicas]

DATASHEET ANEXO 4 (BTA06 TUBOS LED)

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS		MIN	Value	UNIT	
V_{DRM}	Repetitive peak off-state Voltages			-	600	V	
$I_{T(RMS)}$	RMS on-state current	$T_c=105^\circ\text{C}$		-	6	A	
I_{TSM}	Non repetitive surge peak on-state current	T_j initial =25 $^\circ\text{C}$	F=50Hz t=20ms	-	60	A	
			F=60Hz t=16.7ms	-	63	A	
I^2t	I^2t value for fusing	$T_p=10\text{ms}$		-	21	A 2 S	
di/dt	Critical rate of rise of on-state current	$I_g=2 \times I_{GT}$, $t_r \leq 100\text{ns}$	F=120Hz	$T_j=125^\circ\text{C}$	-	50	A/ μ s
I_{GM}	Peak gate current	$T_p=20 \mu$ s		$T_j=125^\circ\text{C}$	-	4	A
I_{DRM}	$V_{DRM}=V_{RRM}$			$T_j=25^\circ\text{C}$	-	5	μ A
I_{RRM}	$V_{DRM}=V_{RRM}$			$T_j=125^\circ\text{C}$	-	1	mA
$P_{G(AV)}$	Average gate power			$T_j=125^\circ\text{C}$	-	1	W
T_{stg}	Storage temperature range			-40	150	$^\circ\text{C}$	
T_j	Operating junction Temperature range			-40	125	$^\circ\text{C}$	

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
$R_{th(j-c)}$	Junction to case(AC)		-	2.7	-	$^\circ\text{C}/\text{W}$
$R_{th(j-a)}$	Junction to ambient		-	60	-	$^\circ\text{C}/\text{W}$

Ilustración 86. Hoja característica TRIAC BTA06. Fuente: [Datasheet de Componentes Electrónicos]

CÓDIGO ANEXO 1 (PT100 °C)

FUENTE: [Elaboración propia]

```
#include <project.h>
#include <stdio.h>

#if defined (__GNUC__)
    asm (".global _printf_float");
#endif

#define CAL_REF_RESISTOR      (100u)
#define TEMP_SCALE           (100u)
#define RESISTANCE_SCALE     (1000u)
#define RTD_CHANNEL          (0u)
#define CAL_CHANNEL          (1u)
#define RTD_IDAC_CHANNEL     (0u)
#define CAL_IDAC_CHANNEL     (1u)
#define DISP_DEL              (200u)
#define IDAC_VAL              (125u)

char displayStr[12]={"\0"};
float rtdTempDisp = 0;

int main()
{
    float rtdCalVoltage = 0.0;
    float rtdRes = 0.0;
    float rtdVoltage = 0.0;
    float rtdTemp = 0.0;
    float zeroCurrentOffset = 0.0;

    LCD_Start();
    LCD_Position(0u,0u);
    LCD_PrintString("RTD Temperature");
    ADCMux_Start();
    CurrentMux_Start();
    ADC_Start();
    IDAC_Start();

    CurrentMux_FastSelect(CAL_IDAC_CHANNEL);
    ADCMux_FastSelect(CAL_CHANNEL);
```



```
IDAC_SetValue(0u);
```

```
ADC_StartConvert();
ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT);
zeroCurrentOffset = ADC_GetResult32();
ADC_StopConvert();
```

```
IDAC_SetValue(IDAC_VAL);
```

```
ADC_StartConvert();
ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT);
ADC_StopConvert();
rtdCalVoltage = ADC_GetResult32();
rtdCalVoltage = rtdCalVoltage - zeroCurrentOffset;
```

```
CurrentMux_FastSelect(RTD_IDAC_CHANNEL);
ADCMux_FastSelect(RTD_CHANNEL);
IDAC_SetValue(0u);
```

```
ADC_StartConvert();
ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT);
zeroCurrentOffset = ADC_GetResult32();
ADC_StopConvert();
```

```
IDAC_SetValue(IDAC_VAL);
```

```
for(;;)
```

```
{
  ADC_StartConvert();
  ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT);
  rtdVoltage = ADC_GetResult32();
  ADC_StopConvert();
```

```
  rtdVoltage = rtdVoltage - zeroCurrentOffset;
```

```
  rtdRes = ((rtdVoltage * CAL_REF_RESISTOR) / rtdCalVoltage) *
RESISTANCE_SCALE;
```

```
  rtdTemp = RTD_GetTemperature(rtdRes);
```

```
  rtdTempDisp = (float) rtdTemp / TEMP_SCALE ;
```

```
LCD_Position(1u,0u);
```



```

    sprintf(displayStr, "%.3f", (rtdTempDisp));
    LCD_Position(1u, 0u);
    LCD_PrintString("      ");
    LCD_Position(1u, 0u);
    LCD_PrintString(displayStr);
    CyDelay(DISP_DEL);
}
}

```

CÓDIGO ANEXO 2 (TERMISTOR °C)

FUENTE: [Elaboración propia]

```

#include "project.h"
#include "stdio.h"

int main()
{
    int32 vTherm, vRef; // variables correspondientes a los voltajes de referencia y
    termistor
    int32 Termresis, Termtemp; // variables correspondientes a resistencia y
    temperatura de termistor
    float TermistorResis, TermistorTemp; // variables para la corrección del formato de
    resistencia y temperatura
    char str[12]; // variable para imprimir

    // inicializacion de componentes
    CyGlobalIntEnable;
    ADC_Start();
    LCD_Start();
    amux_Start();
    Opamp_Start();

    // impresion de mensaje permanente
    LCD_Position(0, 0);
    LCD_PrintString("Termistor");
    LCD_Position(1, 0);
    LCD_PrintString("NTC KY-013");

    for(;;)
    {
        // Canal 0 (Termistor)

```



```

amux_FastSelect(0); //seleccionar canal 0 del AMuX
ADC_StartConvert(); //Empezar conversiones del ADC
ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT); // Esperar por un resultado
vTherm = ADC_GetResult32(); // Guardar resultado en la variable Vtherm
ADC_StopConvert(); // Parar conversiones del ADC

//Canal 1 (Resistencia Referencia)
amux_FastSelect(1); //Seleccionar canal 1 del AMux
ADC_StartConvert(); //Empezar conversiones del ADC
ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT); //Esperar por un resultado
vRef = ADC_GetResult32(); // Guardar resultado en la variable Vref
ADC_StopConvert(); // parar conversiones del ADC

Termresis = Thermistor_GetResistance(vRef,vTherm); // obtener valores de
resistencia del termistor
Termtemp = Thermistor_GetTemperature(Termresis); // obtener los valores de
temperatura del termistor
TermistorResis=Termresis/1000.000; // correccion del formato para la resitencia
TermistorTemp = Termtemp/100.00; // correccion del formato para el termistor

LCD_Position(2,0);
LCD_PrintString("Resistencia: ");
sprintf(str, "%.3fK ", TermistorResis);
LCD_PrintString(str);

LCD_Position(3,0);
LCD_PrintString("Temp: ");
sprintf(str, "%.2f.C ", TermistorTemp);
LCD_PrintString(str);

CyDelay(300);
}
}

```

CÓDIGO ANEXO 3 (MSP430 PH)

FUENTE: [Elaboración propia]

```
#include "project.h"
```

```
#include "stdio.h"
```

```
#include "math.h" //Librería necesaria para cálculos matemáticos, bloque termistor
```



```

int32 medida;
float32 VoltsADC;
float ph;
char str1[12],str2[12]; //Variables donde se guardaran los valores a imprimir

int main(void)
{
    //Inicialización de bloques
    LCD_Start();
    LCD_Position(0,1);
    LCD_PrintString("SENSOR PH"); //Mensaje permanente
    ADC_Start();

    CyGlobalIntEnable;

    for(;;)
    {
        //Iniciar conversión del ADC
        ADC_StartConvert();
        ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT);
        medida=ADC_GetResult32();
        ADC_StopConvert();

        VoltsADC= ADC_CountsTo_Volts(medida);
        //Convertir variables a flotantes con 3 decimales
        sprintf(str1,"%0.3f ",VoltsADC);
        LCD_Position(1,0);
        LCD_PrintString("A0: ");
        LCD_PrintString(str1);

        ph = 7 + ((2.5 - VoltsADC) / 0.18)+7.476; //Ecuación de calibración PH

        //Convertir variables a flotantes con 3 decimales
        sprintf(str2,"%0.3f ",ph);
        LCD_Position(2,1);
        LCD_PrintString("PH: ");
        LCD_PrintString(str2);
        CyDelay(1000);
    }
}

```



CÓDIGO ANEXO 4 (BH1750 LUX)

FUENTE: [Elaboración propia]

```
#include "project.h"
#include <stdio.h>

uint8_t highbyte = 0, lowbyte = 0;
uint16_t dataluxin = 0, dataluxout = 0;

//Función para tomar medida
int tomarmedida ()
{
//Configuración protocolo I2C
I2C_MasterSendStart(0x23, I2C_WRITE_XFER_MODE);
I2C_MasterWriteByte(0x20);
// ConFig.te to one time H-Resolution Mode (0010_0000)
I2C_MasterSendStop();
CyDelay(100);
I2C_MasterSendStart(0x23, I2C_READ_XFER_MODE);
highbyte =I2C_MasterReadByte(I2C_ACK_DATA);
lowbyte =I2C_MasterReadByte(I2C_NAK_DATA);
I2C_MasterSendStop();
dataluxin = highbyte;
dataluxin <<= 8;
dataluxin |= lowbyte;
dataluxout = (dataluxin/1.2)+1;

return(dataluxout);
}

int main(void)
{
//Inicialización bloques
LCD_Start();
LCD_Position(0,1);
LCD_PrintString("LUMINOSIDAD"); //mensaje permanente

char publica[7];
int x=0;
CyGlobalIntEnable; /* Enable global interrupts. */
```



```

I2C_Start();

for(;;)
{
    //Convertir formato de medida e imprimir en LCD
    x = tomarmedida();
    //Calculate data
    sprintf(publica,"%i",x);
    LCD_Position(1,1);
    LCD_PrintString("lux: ");
    LCD_PrintString(publica);

    CyDelay(100);
}
}

```

CÓDIGO ANEXO 5 (TRANSMISIÓN SERIAL)

FUENTE: [ELABORACIÓN PROPIA]

```
#include "project.h"
```

```
#include <stdio.h>
```

```
int32 enteros[4];
```

```
float32 VoltsADC[4];
```

```
char str[12];
```

```
char dato;
```

```
int main(void)
```

```

{
    CyGlobalIntEnable;
    //Inicializar bloques y mensaje permanente
    LCD_Start();
    LCD_Position(0,0);
    LCD_PrintString("LECTURA:");
    AMux_Start();
    ADC_Start();
    UART_Start();

    for(;;)
    {
        //Lecturas ADC por cada canal del multiplexor

```



```

AMux_FastSelect(0);
ADC_StartConvert();
ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT);
enteros[0]=ADC_GetResult32();
ADC_StopConvert();

```

```

AMux_FastSelect(1);
ADC_StartConvert();
ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT);
enteros[1]=ADC_GetResult32();
ADC_StopConvert();

```

```

AMux_FastSelect(2);
ADC_StartConvert();
ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT);
enteros[2]=ADC_GetResult32();
ADC_StopConvert();

```

```

AMux_FastSelect(3);
ADC_StartConvert();
ADC_IsEndConversion(ADC_WAIT_FOR_RESULT);
enteros[3]=ADC_GetResult32();
ADC_StopConvert();

```

//Conversión del formato de lectura del ADC

```

VoltsADC[0] = ADC_CountsTo_Volts(enteros[0]);
VoltsADC[1] = ADC_CountsTo_Volts(enteros[1]);
VoltsADC[2] = ADC_CountsTo_Volts(enteros[2]);
VoltsADC[3] = ADC_CountsTo_Volts(enteros[3]);

```

//Conversión a flotantes con 3 decimales, e impresión en LCD

```

sprintf(str, "%.3f ",VoltsADC[0]);
LCD_Position(1,0);
LCD_PrintString("A0: ");
LCD_PrintString(str);

```

```

sprintf(str, "%.3f ",VoltsADC[1]);
LCD_Position(1,6);
LCD_PrintString("A1: ");
LCD_PrintString(str);

```




```

sprintf(str, "%.3f ",VoltsADC[2]);
LCD_Position(1,9);
LCD_PrintString("A2: ");
LCD_PrintString(str);

sprintf(str, "%.3f ",VoltsADC[3]);
LCD_Position(1,14);
LCD_PrintString("A2: ");
LCD_PrintString(str);

//Transmisión de cada variable a través del bloque UART
UART_PutChar(VoltsADC[0]);
UART_PutChar(VoltsADC[1]);
UART_PutChar(VoltsADC[2]);
UART_PutChar(VoltsADC[3]);
CyDelay(25);

//Recepción de datos enviados desde LABview
dato=UART_GetChar();

if (dato=='a')
{
LCD_Position(0,0);
LCD_PrintString("LECTURA:BUENA");
LED_Write(1);
}

if (dato=='b')
{
LCD_Position(0,0);
LCD_PrintString("LECTURA:MALA");
LED_Write(0);
}

CyDelay(100);
}
}

```

