

**Universidad de Pamplona**  
**Facultad de Ingenierías y Arquitectura**  
**Programa de Ingeniería Electrónica**

**Tema:**

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE CONTROL DE  
TEMPERATURA APLICADO A UN FOTOBIORREACTOR AIRLIFT  
PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA MICROALGAL**

**Autor:**

**Alexis Eduardo Capacho González**

**Pamplona, Norte De Santander**

**Noviembre 2020**

**Universidad De Pamplona**  
**Facultad De Ingenierías y Arquitectura**  
**Programa De Ingeniería Electrónica**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Electrónico.**

**Tema:**

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SISTEMA DE CONTROL DE  
TEMPERATURA APLICADO A UN FOTOBIORREACTOR AIRLIFT  
PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA MICROALGAL**

**Autor:**

**Alexis Eduardo Capacho González**

**Director:**

**Julio César Ospino Arias**  
**Ingeniero Electrónico Esp.**

**Co-Directora:**

**Alba Lucía Roa Parra**  
**Bacterióloga y Laboratorista Clínico MSc. PhD**

**Pamplona, Norte de Santander.**

**Noviembre 2020.**

## **Resumen**

En este proyecto se pretende desarrollar un sistema de control de temperatura, a un fotobiorreactor airlift aplicado al cultivo de una variedad de microalgas, alojado en un tipo de sistema embebido, PSoC 5LP, aprovechando su mayor escala de integración de componentes internos, tanto analógicos como digitales en un solo chip (SOC) para este tipo de tareas.

Con lo anterior, se gana en la flexibilidad y rapidez de adaptación al diseño del sistema, reduciendo el tiempo de implementación y el espacio del circuito requerido. Teniendo como precedente que dentro del fotobiorreactor ocurre un bioproceso de transformación en el cual su principal actor es la microalga.

Teniendo en cuenta que existen diversas variables que afectan el crecimiento y la acumulación de metabolitos en las microalgas, es importante determinar las condiciones óptimas de crecimiento, para obtener los productos deseados de acuerdo cada especie y al ecosistema de origen.

**Abstract**

This project aims to develop a temperature control system, to an airlift photobioreactor applied to the cultivation of a variety of microalgae, housed in a type of embedded system, PSoC 5LP, taking advantage of its larger scale of integration of internal components, analog and digital's on a single chip (SOC) for these types of tasks.

With the above, the flexibility and speed of adaptation to the system design is gained, reducing the implementation time and the required circuit space. Taking as a precedent that within the photobioreactor a transformation bioprocess occurs in which its main actor is the microalgae.

Taking into account that there are several variables that affect growth and the accumulation of metabolites in microalgae, it is important to determine the optimal growth conditions, to obtain the desired products according to each species and the ecosystem of origin.

## Contenido

1	Descripción del proyecto .....	<del>12</del> 14
1.1	Planteamiento del problema .....	<del>12</del> 14
1.1	Justificación .....	13
1.2	Delimitación .....	14
1.2.1	Objetivo General: .....	14
1.2.2	Objetivos Específicos.....	14
1.3	Acotaciones .....	15
1.4	Metodología.....	16
2	Marco teórico y estado del arte .....	17
2.1	Marco teórico.....	17
2.2	Marco conceptual.....	20
2.2.1	Microalga: .....	20
2.2.2	Medio de cultivo:.....	21
2.2.3	Medio de cultivo basal bold: .....	22
2.2.4	Fotobiorreactor .....	24
2.2.5	Fotobiorreactores Airlift: .....	25

2.2.6	Sistemas de control.....	33
2.2.7	Sistemas embebidos.....	35
3	Estado del arte.....	37
3.1	Internacional: .....	37
3.1.1	Temperature Influence and Heat Management Requirements of Microalgae Cultivation in Photobioreactors .....	37
3.1.2	Light enhancement strategies improve microalgal biomass productivity .....	38
3.2	Nacional: .....	40
3.2.1	Diseño y Construcción de un Biorreactor Esterilizable y de Bajo Costo para el Estudio de Crecimiento de Microorganismos.....	40
3.2.1	Diseño de un Fotobiorreactor Airlift a Escala Banco.....	41
3.3	Regional: .....	43
3.3.1	Desarrollo de un Sistema de Control y Monitoreo de un Fotobiorreactor Airlift para el Cultivo de Microalgas por Lotes. ....	43
3.3.2	Sistema de Monitoreo y Control de un Reactor Químico para la Elaboración de una Emulsión Alquílica .....	44
4	Diseño.....	46

4.1	Sistema actual y sistema propuesto .....	59
4.2	Selección de componentes para el sistema embebido.....	68
4.3	Cálculos correspondientes a la etapa de potencia.....	84
5	Resultados.....	105
5.1	Resultado estructural del prototipo .....	105
5.2	Validación del proyecto .....	109
6	Conclusiones .....	<del>113</del> 115
7	Recomendaciones y trabajos futuros.....	<del>114</del> 116
8	Anexos.....	<del>115</del> 117
9	Bibliografía .....	<del>122</del> 124

## Tabla de ilustraciones

Ilustración 1 Diagrama para el cultivo de microalgas. [5] .....	<u>1920</u>
Ilustración 2 Descripción reactor airlift [9] .....	<u>2728</u>
Ilustración 3 Reactor airlift concentrico [9] .....	<u>2930</u>
Ilustración 4 Sistema en lazo abierto [12] .....	<u>3435</u>
Ilustración 5 Sistema en lazo cerrado[12] .....	<u>3536</u>
Ilustración 6 Rotámetro [19] .....	<u>4748</u>
Ilustración 7 Bomba SOBO SB-348 [20].....	<u>4849</u>
Ilustración 8 Bombillos de Tubo led [21] .....	<u>4950</u>
Ilustración 9 Modulo de tiempo RTC [22].....	<u>5051</u>
Ilustración 10 Sensor BH1750 [22] .....	<u>5152</u>
Ilustración 11 Termistor NTC 10K [23] .....	<u>5354</u>
Ilustración 12 Calentador Handy Heater [24] .....	<u>5455</u>
Ilustración 13 Sistema embebido PSoC 5LP [25] .....	<u>5960</u>
Ilustración 14 Sistema de control en lazo cerrado propuesto [5] .....	<u>6061</u>
Ilustración 15 Configuración puerto COM [5].....	<u>6162</u>
Ilustración 16 Comunicación serial [5].....	<u>6162</u>
Ilustración 17 Gráfica Temperatura vs Tiempo [5] .....	<u>6364</u>
Ilustración 18 Gráfica Temperatura vs Tiempo (Controlada) [5].....	<u>6869</u>
Ilustración 19 Bloque termistor [5].....	<u>6970</u>

Ilustración 20 Configuración bloque termistor [5] .....	<a href="#"><u>7172</u></a>
Ilustración 21 Bloque ADC Delta Sigma [5] .....	<a href="#"><u>7273</u></a>
Ilustración 22 Configuración bloque ADC Delta Sigma [5] .....	<a href="#"><u>7273</u></a>
Ilustración 23 Bloque AMux [5].....	<a href="#"><u>7374</u></a>
Ilustración 24 Configuración bloque Amux [5] .....	<a href="#"><u>7475</u></a>
Ilustración 25 Bloque Vref [5].....	<a href="#"><u>7475</u></a>
Ilustración 26 Bloque Opamp [5] .....	<a href="#"><u>7576</u></a>
Ilustración 27 Configuración bloque Opamp [5].....	<a href="#"><u>7677</u></a>
Ilustración 28 Bloque VDAC8 [5].....	<a href="#"><u>7778</u></a>
Ilustración 29 Configuración bloque VDAC8 [5] .....	<a href="#"><u>7778</u></a>
Ilustración 30 Bloque I2C [5].....	<a href="#"><u>7879</u></a>
Ilustración 31 Configuración bloque I2C [5] .....	<a href="#"><u>7980</u></a>
Ilustración 32 Bloque EEPROM [5].....	<a href="#"><u>8081</u></a>
Ilustración 33 Bloque UART [5] .....	<a href="#"><u>8081</u></a>
Ilustración 34 Bloque LCD [5].....	<a href="#"><u>8182</u></a>
Ilustración 35 Configuración bloque LCD [5] .....	<a href="#"><u>8182</u></a>
Ilustración 36 Total de bloques utilizados en el IDE PSoC Creator [5] .....	<a href="#"><u>8384</u></a>
Ilustración 37 Programación en código [5] .....	<a href="#"><u>8384</u></a>
Ilustración 38 Configuración de Puertos Físicos de E/S [5] .....	<a href="#"><u>8485</u></a>
Ilustración 39 Etapa de Potencia [5] .....	<a href="#"><u>8586</u></a>

Ilustración 40 Análisis Malla I de etapa de potencia [5].....	<u>8687</u>
Ilustración 41 Análisis Lazo II etapa de potencia [5] .....	<u>8889</u>
Ilustración 42 Etapa de Potencia.....	<u>9495</u>
Ilustración 43 Análisis Malla I de etapa de potencia [5].....	<u>9697</u>
Ilustración 44 Análisis Lazo II de etapa de potencia [5].....	<u>9899</u>
Ilustración 45 Estructura física del prototipo [5].....	<u>105406</u>
Ilustración 46 Tarjetas de control y potencia [5] .....	<u>106407</u>
Ilustración 47 Caja de protección de las tarjetas de control y potencia. [5].....	<u>107408</u>
Ilustración 48 Sinopsis procedimental [5].....	<u>108409</u>
Ilustración 49 Gráfica Biomasa(mg) vs Tiempo [5].....	<u>112413</u>
Ilustración 50 Grafico Tiempo vs Biomasa [29] .....	<b><u>!Error! Marcador no definido.415</u></b>
Ilustración 51 Datasheet MOC3021 [30] .....	<u>115418</u>
Ilustración 52 Datasheet BT06 [31].....	<u>116419</u>
Ilustración 53 Datasheet BT08 [32].....	<u>117420</u>
Ilustración 54 Algunos de los equipos utilizados en el proceso. [8].....	<u>118421</u>
Ilustración 55 Algunos de los procedimientos realizados en el proceso [8] .....	<u>119422</u>
Ilustración 56 Resultados de algunos de los procedimientos referentes a electrónica. [5] .....	<u>121424</u>

## Tabla de ecuaciones

Ecuación 1 Ecuación Característica .....	64
Ecuación 2 Ganancia del sistema .....	64
Ecuación 3 Ecuación característica del sistema propuesto [5] .....	65
Ecuación 4 Ecuación salida controlador proporcional [27] .....	66
Ecuación 5 Ecuación resistencia termistor [25] .....	70
Ecuación 6 Steinhart-Hart [28].....	70
Ecuación 7 Ley de Joule [5] .....	85
Ecuación 8 Ecuación LVK Lazo II [5] .....	89
Ecuación 9 Ley de Ohm Térmica BT06 [5] .....	93
Ecuación 10 Ley de Joule [29] .....	95
Ecuación 11 Ecuación LVK Lazo II [29].....	98
Ecuación 12 Ley de Ohm Térmica BT08 [29] .....	103

# 1 Descripción del proyecto

## 1.1 Planteamiento del problema.

En el proceso de transformación de los nutrientes por parte de las microalgas es donde se requiere que las variables que influyen en el mismo sean lo más estables posibles. El problema radica en que las microalga *Scenedesmus sp* no cuentan con los rangos de temperatura óptimos para multiplicarse (28-30°C), ya que el ambiente del laboratorio de Biotecnología, CD 201 de la Universidad de Pamplona tiene una temperatura promedio de  $19 \pm 2$  °C, lo que incide en que el tiempo de duplicación se aumente y se requiera mayor tiempo para alcanzar una determinada cantidad de biomasa o metabolitos, incrementando los costos de producción por los servicios y personal que se requiere.

## 1.1 Justificación

Un proceso biotecnológico o bioproceso se entiende como la transformación de materia prima a través de la acción de microorganismos, enzimas o en este caso en particular, microalgas, en un producto. Dicho producto puede ser comercializable, como por ejemplo la biomasa, carotenoides, ácidos grasos entre otros, es por esta razón, que este tipo de procesos requieren un control de variables robusto para generar de una forma eficiente las condiciones apropiadas y de esta forma obtener la mejor calidad posible. [1]

Si bien la temperatura no es la única variable de interés en este tipo de bioprocesos, es uno de los factores ambientales más importantes que afectan el crecimiento y desarrollo de los organismos vivos. [2] Teniendo presente que la determinación del efecto de la temperatura estrictamente sobre la tasa de crecimiento de las algas, se puede identificar manteniendo constantes todas las demás variables. La tasa de crecimiento alcanza un máximo a una temperatura específica, y cada cepa de algas tiene una tasa de crecimiento específica diferente, que debe determinarse. [3]

## **1.2 Delimitación**

### ***1.2.1 Objetivo General:***

- Diseñar e implementar un prototipo de sistema de control de temperatura aplicado a un biorreactor airlift para la producción de biomasa microalgal.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

- Identificar la dinámica del sistema para el control de temperatura en un biorreactor.
- Desarrollar el controlador de temperatura que permita un correcto funcionamiento del cultivo de microalgas.
- Implementar el algoritmo de control realizado en un sistema embebido.
- Validar el funcionamiento del sistema propuesto.

### **1.3 Acotaciones**

- El desarrollo propuesto se limita a una especie de microalga, de acuerdo con los requerimientos del Laboratorio de Bioprocesos de la Universidad de Pamplona CD 201
- El sistema propuesto se limita a las condiciones climatológicas que se presentan en el interior del Laboratorio de Bioprocesos CD 201 ubicado en la Universidad de Pamplona.
- Se definirán las condiciones de temperatura de operación de todo el sistema, las cuales se deberán tener en cuenta para el correcto funcionamiento del mismo.

## 1.4 Metodología

La metodología empleada para el desarrollo de este proyecto fue con un enfoque de investigación aplicada; se exploró y se realizó un análisis de la forma más adecuada para utilizar los recursos disponibles para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos.

El proyecto se segmentó en (3) fases:

- Fase I
  - Exploración de antecedentes.
- Fase II
  - Toma de decisiones
- Fase III
  - Construcción del prototipo

Para este proyecto la recopilación de información se establece partiendo de dos tipos de fuentes de información, información primaria e información secundaria.

- Información primaria:
  - Se fundamenta en reuniones realizadas con el equipo encargado del laboratorio de Bioprocesos CD 201 de la Universidad de Pamplona.
- Información secundaria:
  - Se estableció de artículos publicados en revistas indexadas, referencias bibliográficas e infográficas.

## 2 Marco teórico y estado del arte

### 2.1 Marco teórico

Las microalgas son designadas como un recurso de biomasa de próxima generación para la producción sostenible de productos químicos y biocombustibles debido al superior rendimiento espacial y temporal en comparación con sus homólogos vegetales. Las microalgas no compiten con la producción de alimentos, sino que utilizan activamente la luz y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), lo que afecta positivamente al análisis del ciclo de vida de los bioprocesos basados en microalgas. *Scenedesmus* spp. son conocidas por ser algas verdes de rápido y robusto crecimiento que pueden sobrevivir en hábitats extremos. Estos organismos toleran altas temperaturas y densidades de flujo de fotones y ofrecen un interesante espectro de bioproductos intracelulares como proteínas y lípidos. [4]

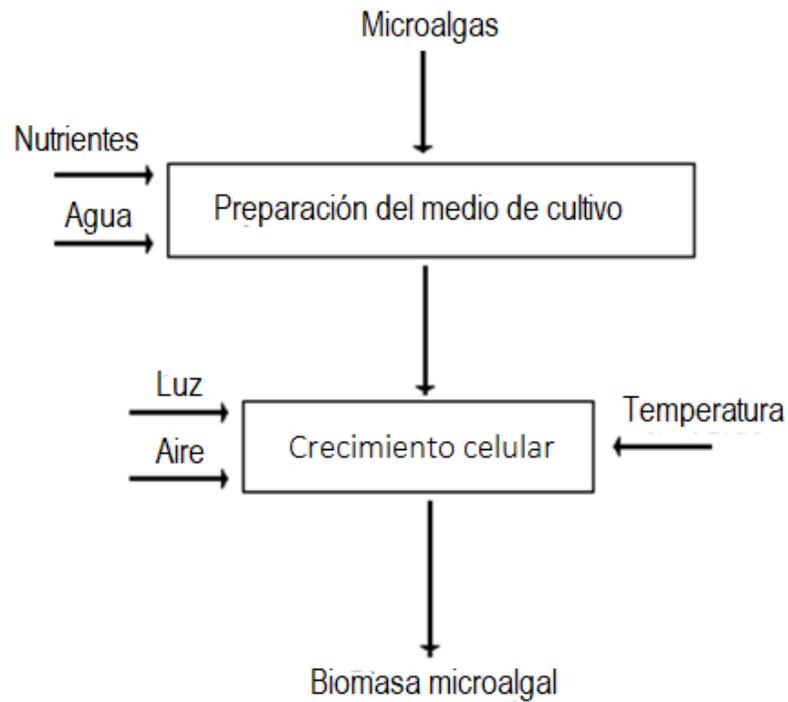
Los primeros procesos de cultivo axénico con microalgas (*Chlorella* spp y *Scenedesmus* spp.) a escala de laboratorio se describieron en 1890. Cincuenta años más tarde, se intensificaron los esfuerzos por establecer procesos de producción de biomasa a escala industrial, pero aun así siguieron siendo un reto. El cultivo de *Scenedesmus* spp. se ha descrito utilizando sistemas de fotobiorreactores abiertos y cerrados para la producción en masa de biomasa de algas. La construcción sencilla y el funcionamiento económico son algunas de las principales ventajas de los sistemas abiertos. Para ello se han utilizado cascadas planas o

inclinadas, reactores en espiral o estanques de conducto abierto para aplicaciones comerciales. Sin embargo, los fotobiorreactores cerrados pueden proporcionar una operación más controlada y definida. Específicamente, los fotobiorreactores cerrados mantienen el riesgo de contaminación bajo y proporcionan una configuración de proceso altamente flexible. Ello permite una optimización específica para cada especie gracias a un control operativo preciso de las variables de cultivo. [4]

En todo bioproceso se parte de la materia prima, se transforma y se obtiene un producto; en la etapa de transformación se presentan tres subetapas.

1. Etapa de tratamiento previo: En esta etapa se prepara el medio adecuado que requiere la microalga.
2. Etapa de Biorreacción: En esta etapa las microalgas transforman los nutrientes del medio y lo convierten en el producto esperado.
3. Etapa de Tratamiento de producto: En esta etapa se obtiene la concentración y purificación de los productos. [1]

En resumen, como se puede evidenciar en la ilustración 1:



*Ilustración 1 Diagrama para el cultivo de microalgas. [5]*

La composición de la biomasa es determinante para la clasificación de las especies de acuerdo a su función y sus productos, la cual está constituida por tres principales compuestos: carbohidratos, proteínas y lípidos. Además, estos microorganismos son capaces de producir antibióticos, pigmentos, esteroides y otros compuestos haciendo solo uso de la luz solar, el dióxido de carbono y el agua de mar. Por ello, la biotecnología de microalgas ha ganado relevancia y un progreso considerable en las últimas décadas.[2]

## 2.2 Marco conceptual

### 2.2.1 *Microalga:*

Las microalgas y las cianobacterias son microorganismos unicelulares que tienen la capacidad de realizar la fotosíntesis. Esto es, son capaces de generar biomasa orgánica a partir de CO<sub>2</sub> y luz, usando al agua como dador de electrones, oxidándola a O<sub>2</sub>. [6]

Microalgas y cianobacterias difieren en muchos aspectos, especialmente en que las primeras son eucariotas y las segundas son procariotas, pero desde el punto de vista de la ingeniería de procesos, lo relevante es que crecen usando luz como energía y CO<sub>2</sub> como fuente de carbono. [6]

Todas las microalgas de la misma especie son esencialmente la misma en casi todos sus aspectos bioquímicos. Sin embargo, incluso entre la misma especie pueden darse diferencias de la misma forma que observamos diferencias entre familiares cercanos, como primos. Cuando es necesario distinguir entre microalgas de la misma especie, se habla de "cepas" (strains). [6]

#### 2.2.1.1 *Microalga Scenedesmus sp*

El género *Scenedesmus* comprende especies de microalgas verdes, comúnmente encontradas en agua dulce y en aguas residuales. Este tipo de microalga, por lo regular forma cenobios de entre 2 a 16 células, con morfología aguda y fusiforme, las cuales se unen de lado a lado en un mismo plano, con los ejes longitudinales paralelos. Tienen reproducción asexual. En

este género existen microalgas que pueden presentarse con o sin espinas, las cuales pueden ser largas o cortas, y que le otorgan ciertas características particulares. [7]

### **2.2.2 Medio de cultivo:**

El medio de cultivo es una disolución acuosa que transporta los nutrientes inorgánicos que necesitan las microalgas para su crecimiento. El suministro de medio de cultivo y las concentraciones de los nutrientes debe estar acoplado con la producción de biomasa de forma que se suministren en cantidad suficiente para que nunca se produzca una limitación que tendría como consecuencia una disminución en la productividad de biomasa o incluso alguna difusión del cultivo como la fotoinhibición.[6]

Los principales nutrientes necesarios son:

- Agua: además de transporte, es un nutriente que suministra los electrones ( $H\cdot$ ) necesarios para la reducción del  $CO_2$ .
- Carbono: normalmente suministrado aparte como  $CO_2$ , aunque puede suministrarse como bicarbonato, considerablemente más caro.
- Oxígeno: suministrado tanto por el  $H_2O$  como por el  $CO_2$ . Sin embargo, es sólo el oxígeno del  $CO_2$  el que se incorpora en la biomasa.

- Nitrógeno: el cuarto elemento más importante por volumen ya que forma parte de las proteínas y nucleótidos de la biomasa. Suministrado como  $\text{NO}_3^-$  o  $\text{NH}_4^+$ .
- Fósforo: suministrado como fosfato, forma parte de importantes intermedios metabólicos, lípidos, enzimas y multitud de especies bioquímicas.

Adicionalmente existe una gran cantidad de otros nutrientes que pueden ser necesarios dependiendo de la especie. Según la cantidad en la que se necesiten se suelen clasificar como macronutrientes o micronutrientes; los primeros se requieren en mayor cantidad y los segundos en menor cantidad.[6]

### **2.2.3 Medio de cultivo basal bold:**

El BBM (Bold's basal Médium) es un medio de cultivo que contiene macro y micronutrientes minerales en agua destilada estéril. En la Tabla 1,2,3 y 4 se muestra la composición del medio.

	g de stock de 200ml	Adicionar ml/L
$\text{NaNO}_3$	5	10
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.5	10
NaCl	0.5	10

$K_2HPO_4$	1.5	10
$KH_2PO_4$	3.5	10
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	0.5	10
$H_3BO_4$	1.14/100ml	1
Solución stock de EDTA		1
Solución de Hierro		1
Solución de Micronutrientes		1

Tabla 1 Componentes para el medio Basal Bold [8]

Solución stock de EDTA	g para 100ml
EDTA de Sodio	5
KOH	3.1

Tabla 2 Componentes para el medio Basal Bold [8]

Solución de Hierro	g para 100ml
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	0.498
$H_2SO_4$ concentrado	0.1 ml

Tabla 3 Componentes para el medio Basal Bold [8]

Solución de Micronutrientes	Gramos para 1L
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	8.82

$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	1.44
$MoO_3$	0.71
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	1.27
$Co(NO_3)6H_2O$	0.49

Tabla 4 Componentes para el medio Basal Bold [8]

#### **2.2.4 Fotobiorreactor**

El concepto fundamental de fotobiorreactor se centra en equipos que permiten cultivos libres de contaminación y con la capacidad de proveer las condiciones básicas ideales para microorganismos fotótrofos como microalgas. Al contextualizar la definición en aspectos más técnicos, se pueden definir los fotobiorreactores (FBR) como contenedores o recipientes transparentes que tienen como ventajas operativas la capacidad de monitoreo de las condiciones de los cultivos y en algunos casos el control riguroso de las variables que intervienen en el proceso de producción, la disminución de la probabilidad de contaminación de los cultivos, el potencial de uso en procesos ambientales como la filtración de aguas, la captura de CO<sub>2</sub>, acoplados con la obtención de biomasa y de compuestos de alto interés industrial.[6]

#### **2.2.4.1 Fotobiorreactores Abiertos:**

En los fotobiorreactores abiertos el cultivo está en contacto con la atmósfera. Son instalaciones que intentan compensar con un bajo coste una baja productividad debida a un control poco estricto o inexistente de condiciones como el pH o la temperatura. Al estar abiertos son susceptibles a la invasión por otros microorganismos incluyendo microalgas, por lo que son especialmente adecuados para especies robustas y de rápido crecimiento.[6]

#### **2.2.4.2 Fotobiorreactores Cerrados:**

Los fotobiorreactores cerrados se denominan así porque mantienen al cultivo totalmente aislado del medio ambiente exterior. Típicamente están equipados con sistemas de agitación, aireación, control del pH, intercambio del calor, adición de medio y CO<sub>2</sub>. Los fotobiorreactores cerrados son dispositivos muy especializados, a menudo diseñados específicamente para una especie concreta.[6]

#### **2.2.5 Fotobiorreactores Airlift:**

Los reactores *airlift* (reactores de tiro o corriente de aire) constituyen una amplia familia de reactores de al menos dos fases.

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: [9]

- 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 2 nombra estas partes en un *airlift* tubular de *riser* concéntrico (a) y en otro con *downcomer* concéntrico (b).[9]

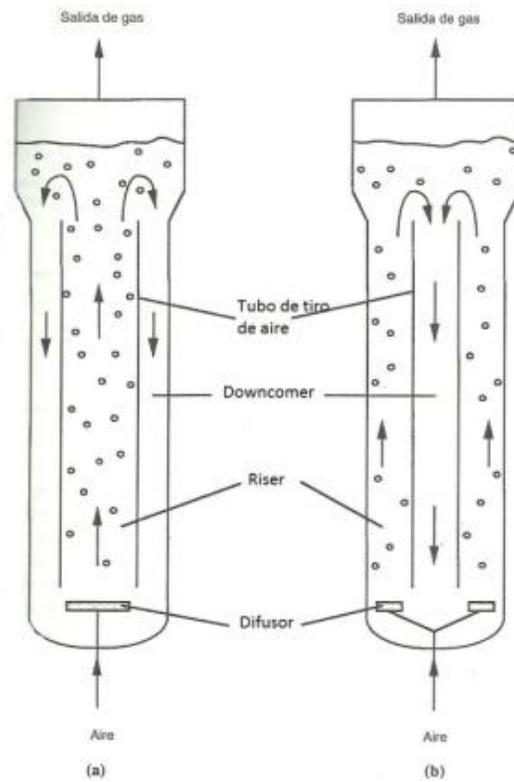


Ilustración 2 Descripción reactor airlift [9]

### 2.2.5.1 Configuraciones de Fotobiorreactores 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 5 expone las diferentes opciones para cada estructura. [9]

<b>Riser</b>	Liso o con baffles. Con múltiples perforaciones Ilustración 3 a) I o sin ellas. Con o sin agitación adicional Ilustración 3 b) I
<b>Downcomer</b>	Con o sin empaque. Con baffles o sin ellos Ilustración 3 f) I
<b>Base</b>	Redondeada, cónica, con agitación mecánica, con sistema de levantamiento adicional Ilustración 3 a) I
<b>Separador de gas</b>	Agitado o sin agitar. Ver Ilustración 3 II
<b>Difusor</b>	Difusor poroso, difusor de orificio, difusor de boquillas, difusor agitados, difusor eyector-inyector

Tabla 5 Diferentes configuraciones de un reactor airlift [9]

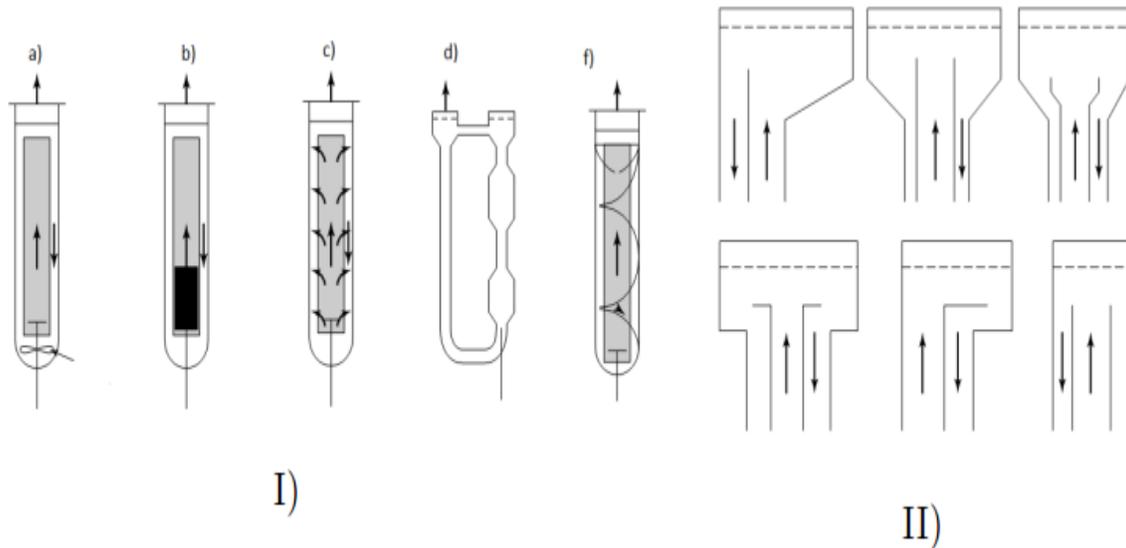


Ilustración 3 Reactor airlift concéntrico [9]

Dado que estos dispositivos están diseñados para el cultivo de biomasa microalgal, su principal función es mantener un medio estable, para ello se manejan variables como (luz, oxígeno, temperatura, agitación) entre otras, que serán determinadas dependiendo del tipo de microalga a tratar.

#### 2.2.5.2 Luz:

Como organismos fotosintéticos, las microalgas dependen completamente de la luz que reciban. La luz utilizada para la fotosíntesis es la que se corresponde con el espectro solar, es decir entre 350nm y 700 nm, y que supone aproximadamente un 40% de la radiación total emitida por el sol. A diferencia del resto de organismos terrestres fotosintéticos que presentan

una eficiencia de conversión luz-biomasa de un 1%, las microalgas consiguen llegar a un 4%. [10]

#### ***2.2.5.3 Ritmos circadianos o ciclos circadianos:***

Los ritmos circadianos son cambios físicos, mentales y conductuales que siguen un ciclo diario, y que responden, principalmente, a la luz y la oscuridad en el ambiente de un organismo. Dormir por la noche y estar despierto durante el día es un ejemplo de un ritmo circadiano relacionado con la luz. Los ritmos circadianos se encuentran en la mayoría de los seres vivos, incluidos los animales, las plantas y muchos microbios diminutos. [11]

#### ***2.2.5.4 Oxígeno***

El nivel de oxígeno disuelto debe ser controlado en los sistemas de cultivo de microalgas. Los problemas pueden aparecer por un exceso de gas disuelto que puede provocar la inhibición de la fijación de carbono a partir del dióxido de carbono disuelto. [10]

#### ***2.2.5.5 Temperatura***

El efecto de la temperatura en las reacciones bioquímicas es también uno de los factores más relevantes que influyen tanto en la composición como en la actividad de las microalgas. Se conoce que existe una temperatura óptima de crecimiento por encima de la cual la actividad se ve inhibida, aunque este valor varía en función de la especie concreta. Hasta llegar a esta temperatura óptima, la relación entre temperatura y velocidad de crecimiento es exponencial. [10]

#### **2.2.5.6 Agitación**

En los sistemas destinados al cultivo de microalgas la agitación es un parámetro mecánico a tener en cuenta. Tiene diversas funciones como facilitar la eficiencia del transporte de las sustancias dentro del medio líquido, impedir la sedimentación de las algas (se encuentran en suspensión), homogeneizar el medio y el pH en todo el volumen de reacción, y desplazar a las algas desde zonas oscuras a zonas con iluminación.[10]

#### **2.2.5.7 Modo de operación**

La forma en que se mantiene y se opera un cultivo determina también su capacidad de crecimiento.[10]

- **Cultivos en batch o por lotes:** Es uno de los métodos más comunes para el cultivo de microalgas. Consiste en mantener en un recipiente una cantidad limitada de medio de cultivo, añadir un inóculo de algas y mantener las condiciones ambientales que favorezcan el crecimiento.

Un ciclo de operación en batch pasa por las cuatro fases esenciales del crecimiento de las microalgas:

- **Fase de retardo:** Es la fase inicial en la que la velocidad de crecimiento está en valores submáximos. Este período tiene lugar por la presencia de células no viables en el inóculo

y/o por la necesidad de adaptación fisiológica del cultivo al nuevo medio y condiciones de crecimiento.

- Fase exponencial: Cuando las células ya se han adaptado a las condiciones al final de la fase de retardo empiezan a crecer y multiplicarse provocando un aumento exponencial en función de la biomasa en el sistema durante este período de tiempo. Esta fase tiene lugar siempre y cuando en el medio la concentración de sustrato y luz sea suficiente para abastecer a toda la biomasa sin limitación.
- Fase de crecimiento lineal: Tras la fase exponencial, la concentración de biomasa en el cultivo será alta, por lo que la luz incidente no llegará a todas las células suponiendo una limitación en el crecimiento de cierta parte de las microalgas. En esta situación, el cultivo ya no crece a su máxima velocidad quedando entonces en un estado prácticamente estacionario en lo que se refiere a concentración de células.
- Fase de muerte: Por definición, en los cultivos en batch no hay alimentación por lo que una vez consumidos los nutrientes que se encontraban en el medio inicial, el crecimiento tendrá entonces una limitación por alimento, que junto a la que ya existía por luz provocarán que la concentración de biomasa del sistema empiece a descender. En este punto se da por finalizado el ciclo operacional del cultivo en batch.

### ***2.2.6 Sistemas de control***

Desde el punto de vista de la teoría de control, un sistema o proceso está formado por un conjunto de elementos relacionados entre sí que ofrecen señales de salida en función de señales o datos de entrada.

Es importante resaltar el hecho de que no es necesario conocer el funcionamiento interno, o cómo actúan entre sí los diversos elementos, para caracterizar el sistema. Para ello, sólo se precisa conocer la relación que existe entre la entrada y la salida del proceso que realiza el mismo (principio de caja negra). El aspecto más importante de un sistema es el conocimiento de su dinámica, es decir, cómo se comporta la señal de salida frente a una variación de la señal de entrada. Un conocimiento preciso de la relación entrada/salida permite predecir la respuesta del sistema y seleccionar la acción de control adecuada para mejorarla. De esta manera, el diseñador, conociendo cuál es la dinámica deseada, ajustará la acción de control para conseguir el objetivo final.

En vista de todo lo expuesto, se puede definir un sistema de control como el conjunto de elementos que interactúan para conseguir que la salida de un proceso se comporte tal y como se desea, mediante una acción de control.[12]

### 2.2.6.1 Sistemas de control dinámico

Dependiendo del tratamiento que el sistema de control realiza con la señal de salida, pueden distinguirse dos topologías de control generales: sistemas en lazo abierto y sistemas en lazo cerrado.

### 2.2.6.2 Sistema en lazo abierto

En este tipo de sistemas, la salida no tiene efecto alguno sobre la acción de control.

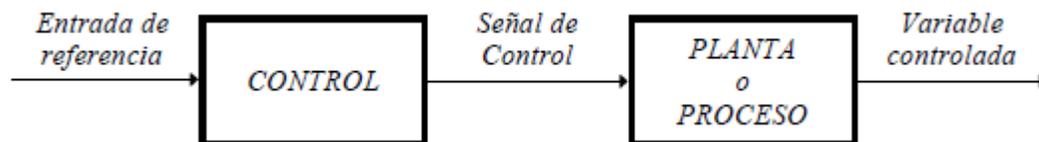


Ilustración 4 Sistema en lazo abierto [12]

En un sistema en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia, por ello cada entrada corresponderá a una operación prefijada sobre la señal de salida. Se puede asegurar entonces que la exactitud del sistema depende en gran manera de la calibración del mismo y, por tanto, la presencia de perturbaciones en la cadena (señales indeseadas) provocará que éste no cumpla la función asignada.[12]

### 2.2.6.3 Sistema en lazo cerrado

En los sistemas de control en lazo cerrado, la señal de salida tiene efecto sobre la acción de control. A este efecto se le denomina *realimentación*.

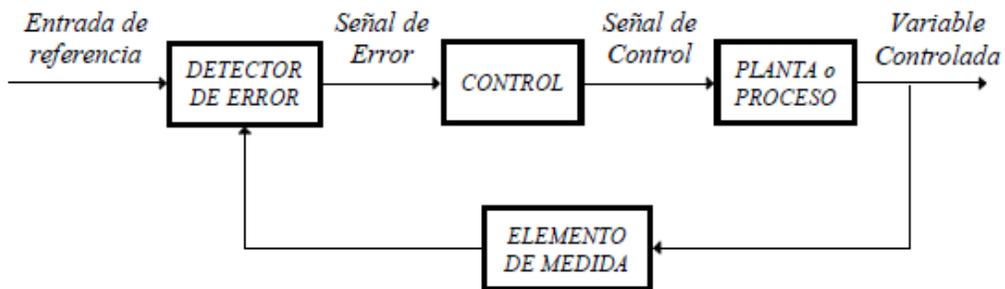


Ilustración 5 Sistema en lazo cerrado[12]

La señal controlada debe realimentarse y compararse con la entrada de referencia, tras lo cual se envía a través del sistema una señal de control, que será proporcional a la diferencia encontrada entre la señal de entrada y la señal medida a la salida, con el objetivo de corregir el error o desviación que pudiera existir.

La principal ventaja de los sistemas de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación hace al conjunto menos sensible a las perturbaciones externas y a las variaciones de los parámetros internos que los sistemas en lazo abierto.[12]

### 2.2.7 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. En un sistema embebido la mayoría de los componentes se encuentran incluidos en la placa base (la tarjeta de vídeo, audio, módem, etc.) y muchas veces los dispositivos resultantes no tienen el aspecto de lo que se suele asociar a una computadora. Los sistemas embebidos se pueden programar directamente en el lenguaje ensamblador del microcontrolador o microprocesador incorporado sobre el mismo, o también, utilizando los compiladores específicos, pueden utilizarse lenguajes como C o C++; en algunos casos, cuando el tiempo de respuesta de la aplicación no es un factor crítico, también pueden usarse lenguajes como JAVA.[13]

## 3 Estado del arte

### 3.1 Internacional:

#### *3.1.1 Temperature Influence and Heat Management Requirements of Microalgae Cultivation in Photobioreactors*

“Microalgae are considered one of the most promising feedstocks for biofuel production for the future. The most efficient way to produce vast amounts of algal biomass is the use of closed tubular photobioreactors (PBR). The heat requirement for a given system is a major concern since the best algae growth rates are obtained between 25-30 °C, depending on the specific strain. A procedure to determine temperature influence on algal growth rates was developed for a lab-scale PBR system using the species *Chlorella* spp. A maximum growth rate of 1.44 doublings per day at 29 °C (optimal temperature) was determined. In addition, a dynamic mathematical model was developed to simulate heating and cooling energy requirements of tubular PBRs for any desired location. Operating the model with hourly weather data as input, heating and cooling loads can be calculated early in the planning stage of a project. Furthermore, the model makes it possible to compare the operation inside a greenhouse to the outdoor operations, and consequently provides fundamental information for an economic feasibility study. The best configuration for a specific location can be evaluated easily. The model was exemplarily tested for a hypothetical 100,000 l photobioreactor located in San Luis Obispo, California, U.S.A. Average algae productivity

rates of 23% and 67% for outdoor and indoor PBR operations, respectively, were obtained. Actual energy loads (heating and cooling) needed to maintain the PBR at optimal temperature were determined and compared. Sensitivity analyses had been performed for abrupt temperature and solar radiation steps, PBR row distances, ground reflectivities, and ventilation rates of the greenhouse. An optimal row distance of 0.75 m was determined for the specific PBR. The least amount of energy was needed for a ground reflectivity of 20%. The ventilation rate had no major influence on the productivity rate of the system. Results demonstrated the importance of a simulation model as well as the economic impact of a sophisticated heat management system. Energy savings due to an optimized heat management system will eventually increase proficiency of the systems, which will support a new sustainable industry and future developmental potential.” [3] Este informe presenta información importante la cual se tomó como referencia para realizar un primer acercamiento sobre las diferentes temperaturas que se pueden manejar dependiendo del tipo de microalga.

### ***3.1.2 Light enhancement strategies improve microalgal biomass productivity***

“The rapid increase in global energy demand, global warming and climate change have driven the search for alternative renewable sources of energy with lesser environmental impact. Microalgae have immense potential as renewable energy feedstocks. Microalgal biomass can be used to generate a variety of biofuels including biodiesel, bioethanol, bio-hydrogen, bio-methane and syngas. One of the major hurdles to the commercialization of

microalgae-based biofuels and products is limited biomass productivity. Considerable amounts of research have been conducted into enhancing microalgal biomass production due to its potential sustainability and variety of applications. The traditional methods of improving biomass productivity are limited to adaptation of cultivation conditions and more recently genetic engineering. Light is a crucial factor that governs microalgal growth. Research on the adaptation and manipulation of natural light rather than adaptation of microalgae has been very limited. Microalgae utilize only a small fraction of light wavelengths from the wide spectrum of solar radiation for photosynthesis. In order to enhance microalgal biomass, improved photosynthetic efficiency is essential. This can be accomplished by the manipulation of the light spectrum to achieve an optimal balance between photosynthesis and photoprotection. Manipulation of incident irradiance may be viable for increased light harvesting by algae. This not only reduces unused wavelengths but also concentrates the wavelengths in range utilized by algae. This would allow for a maximum utilization of the light spectrum by microalgae. This review critically analyses different light manipulation techniques that modify the spectrum of light received by the algae to improve biomass productivity.”[14] Este artículo presenta información importante sobre como la selección de luz influye en el crecimiento microalgal

## **3.2 Nacional:**

### ***3.2.1 Diseño y Construcción de un Biorreactor Esterilizable y de Bajo Costo para el Estudio de Crecimiento de Microorganismos***

“Los microorganismos son objeto de interés debido a campos de investigación como biocombustibles, obtención de productos, tratamiento de aguas residuales, biorremediación de suelos y agua, entre otros. Estos se presentan como soluciones y/o alternativas autosustentables a diversas problemáticas ambientales, por esta razón, para tener un alcance de esta envergadura, es necesaria su implementación a nivel industrial; lo que requiere la obtención de biomasa en cantidades considerables.

A partir de esto, el desarrollo de estas biotecnologías va de la mano del uso de biorreactores, en los cuales se lleva a cabo el cultivo de dichos microorganismos y cuya función es, en principio, optimizar sus condiciones de operación con el fin de aumentar la velocidad de crecimiento y así, la producción de biomasa. Estos biorreactores son actualmente comercializados para su uso en investigación, sin embargo, tienen precios muy elevados, esto limita el desarrollo de sus estudios.

Así, este estudio se dio debido a la necesidad de hacer posible estos estudios con inversiones considerablemente menores para la adquisición de biorreactores, encaminado a aumentar las investigaciones relacionadas que contribuyan en los avances biotecnológicos que están involucrados.

La presente investigación se planteó para el diseño y construcción de un biorreactor de bajo costo, capaz de hacer seguimiento a variables de control (temperatura e iluminación) y medida (pH, intensidad lumínica y densidad óptica) y además mantener libre de contaminación para el estudio de cultivos de microorganismos. Para esto se desarrollaron sistemas de control y medida, que permitieran la obtención y seguimiento de las condiciones óptimas para un rápido crecimiento celular, puesto a punto con ayuda de un microorganismo modelo (*E. coli MC4100*), a quien se le hizo seguimiento a la velocidad de crecimiento y esterilidad del cultivo.”[15] Uno de los elementos importantes de este trabajo, fue el uso de sistemas de control, además, la integración de la infraestructura con el prototipo y, también, menciona la importancia de la existencia de información porque es con esta que el prototipo funcionará.

### **3.2.1 Diseño de un Fotobiorreactor Airlift a Escala Banco**

“El concepto fundamental de fotobiorreactor se centra en equipos que permiten cultivos libres de contaminación y con la capacidad de proveer las condiciones básicas ideales para microorganismos fotótrofos como microalgas (Molina et al, 1999;). Al contextualizar la definición en aspectos más técnicos, se pueden definir los fotobiorreactores (FBR) como contenedores o recipientes transparentes que tienen como ventajas operativas la capacidad de monitoreo de las condiciones de los cultivos y en algunos casos el control riguroso de las variables que intervienen en el proceso de producción, la disminución de la probabilidad de

contaminación de los cultivos, el potencial de uso en procesos ambientales como la filtración de aguas, la captura de CO<sub>2</sub>, acoplados con la obtención de biomasa y de compuestos de alto interés industrial.

El conocimiento actual a nivel de fotobiorreactores es extenso, generado a partir de problemas cada vez más particulares y específicos como la aplicación de dinámica de fluidos al diseño de fotobiorreactores, la captura de CO<sub>2</sub> y el tratamiento de aguas acoplada al escalamiento de biorrefinerías, aplicación de dinámica de fluidos computacional para definir las condiciones de iluminación de la biomasa, transferencia de CO<sub>2</sub> a la biomasa, la transferencia de luz, la interacción entre modelos fotosintéticos y procesos de producción de biomasa, entre otros.

Sin embargo, las aplicaciones de cultivo en fotobiorreactor a nivel industrial, es decir, en biorrefinerías, son aún limitadas debido principalmente a los costos operativos de los procesos que en muchas oportunidades no pueden competir con otro tipo de cultivos como el de la palma de aceite, ni con el precio del petróleo en caso de aplicaciones de biocombustibles. El diseño de fotobiorreactores implica la aplicación de conceptos biológicos y su interacción desde el punto de vista de diseño e ingeniería.

Estos fundamentos teóricos se tuvieron en cuenta para desarrollar un proceso de diseño y puesta en marcha de un FBR a escala banco. Se inicia con la identificación de los tipos, las configuraciones, los parámetros y variables que afectan el funcionamiento del FBR. Seguido

de la selección de los materiales para su construcción, ensamble y ajuste de las condiciones de operación del mismo, analizado a partir de principios teóricos.” [16] Mediante este trabajo se establece la importancia del potencial que se puede obtener en base a este tipo de bioprocesos.

### **3.3 Regional:**

En Pamplona Norte de Santander el autor del libro encontró

#### ***3.3.1 Desarrollo de un Sistema de Control y Monitoreo de un Fotobiorreactor Airlift para el Cultivo de Microalgas por Lotes.***

“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 implementó 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.”[17] Este trabajo permite tener una guía sobre el crecimiento microalgal, también se centra en la infraestructura empleada para la construcción del FBR.

### ***3.3.2 Sistema de Monitoreo y Control de un Reactor Químico para la Elaboración de una Emulsión Alquílica***

“En este proyecto se realizó el diseño del sistema de monitoreo y control para la elaboración de una emulsión que se evaluó posteriormente para verificar validez y ser utilizada como recubrimiento el cual tiene una composición química amigable con el medio ambiente.

La temperatura es una de las principales variables físicas a controlar en este proceso de producción de la emulsión alquílica; correspondiendo a uno de los principales objetivos del proyecto, se tiene la identificación, diseño e implementación del controlador para dicho sistema monitoreo.

También se busca integrar tanto el sistema de monitoreo como el sistema de control en un sistema electrónico embebido como parte del desarrollo, se aplican los criterios de selección de los circuitos de monitoreo y accionamiento a ser implementados. Se considerarán las especificaciones de los dispositivos que lo van a conformar para el modelamiento y / o

especificaciones de la planta a controlar, se tomaran una serie de datos para definirlo y que permitirá definir el sistema de control.” [18]

## 4 Diseño

En este capítulo se describe que factores se tuvieron en cuenta para la selección de los métodos, componentes y sistemas realizando cuadros comparativos, así como también, las características de las herramientas que realizan la implementación de la técnica a la arquitectura.

Para este caso en particular las variables a controlar son las siguientes:

- Agitación
- Luminosidad
- Temperatura

Para el caso de la agitación, esta se realizó de forma manual a través del siguiente dispositivo

(Ilustración 6):



*Ilustración 6 Rotámetro [19]*

El cual es un rotámetro, este es un medidor con válvula que facilita el control de flujo a través del cuerpo[19]. En este caso en particular se determinó a través de un trabajo previo de forma experimental que el flujo de aire que mejores condiciones le provee al bioproceso se encuentra en los 2.1 LPM (Litros Por Minuto).

El componente encargado de brindar el flujo de aire será una bomba de aire SOBO SB-348A (Ilustración 7).



*Ilustración 7 Bomba SOBO SB-348 [20]*

la cual presenta las siguientes características:

- Bajo consumo de energía
- Presión de aire: 3.5PSI
- Doble salida de flujo

Razones por las cuales cumple con los requerimientos, siendo de poco tamaño al ser diseñada para acuarios, y debido que no se necesitan presiones muy altas, la misma es capaz de cubrir la demanda de presión necesaria.

Para el caso de la iluminación, el criterio a tener en cuenta fue que la cantidad de luz sobre la superficie del fotobiorreactor debe ser uniforme y tiene que ser de 4000 lux, será una variable de medición continua, y contará con su debido controlador.

En base al trabajo previo, se pudo evidenciar que las mejores condiciones de iluminación se lograron gracias a los bombillos de tubo led de 6w de potencia (Ilustración 8), y a cierta distancia de separación entre la superficie de interés y los bombillos de tubo led, para este caso esa distancia en la cual se alcanzan las unidades lux necesarias fue de 8 centímetros.

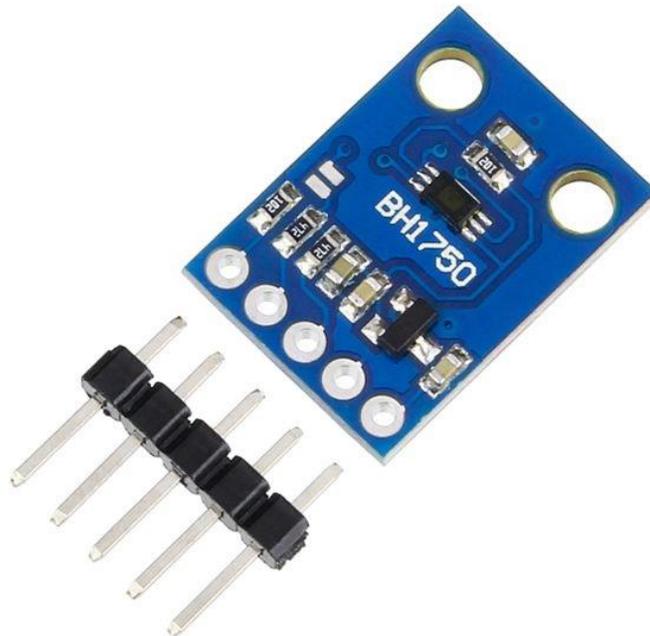


*Ilustración 8 Bombillos de Tubo led [21]*

Para el control del ciclo circadiano, Se determino un ciclo de 18 horas encendido y 6 horas apagado, para este fin de control de encendido y apagado, se seleccionó el módulo DS1307 (Ilustración 9), el cual es un módulo que está compuesto de un RTC (reloj de tiempo real) y de una memoria EPROM, este módulo permite tener un reloj externo, puede ser usado con batería o sin ella.



El criterio a tener en cuenta para la selección del sensor encargado de esta variable fue que la respuesta del mismo se presente en unidades lux y un rango amplio de utilidad. Por esta razón, vemos como el señor II (Ilustración 10) se ajusta de una mejor forma a los requerimientos de este ítem.



*Ilustración 10 Sensor BH1750 [22]*

Para el caso de la variable temperatura, en la cual se centra este proyecto se decide realizar un cuadro comparativo con diferentes tipos de sensores de temperatura, siendo el sensor I el sensor DS18B20, el sensor II el sensor NTC 10K

Características	Sensor	
	I	II
Voltaje de operación	3.0 V a 5.5 V	5 V
Interfaz digital	1-Wire	Lectura analógica
Precisión	+/- 0.5 °C	2% a 5%
Rango de temperatura	-55 a 125 °C	-40 a 120 °C
Material en la punta	Acero inoxidable	Cobre niquelado
Precio	\$11.900	\$3.500

*Tabla 7 Tabla comparativa de sensores de temperatura [5]*

El criterio de selección para el sensor encargado de esta variable, fue que el sensor fuera de tipo sumergible, y que su protocolo de comunicación fuera de fácil manejo, por esta razón el sensor II (Ilustración 11) es el que cumple con los criterios de selección, ya que el más adelante se explicara el motivo de la facilidad de acople al sistema embebido.



*Ilustración 11 Termistor NTC 10K [23]*

Para el componente encargado de generar la temperatura al bioproceso, se seleccionó el calentador HARDY HEATER (Ilustración 12), el cual 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, adecuado para los valores requeridos.



*Ilustración 12 Calentador Handy Heater [24]*

Por estas razones cumple con las características necesarias para el prototipo, ya que los valores de temperatura que puede proveer están enmarcados dentro de los necesarios para el óptimo desempeño de este tipo de bioprocesos.

Las especificaciones definidas para la selección del sistema embebido son:

- La reducción de espacio en el circuito electrónico con sus respectivos componentes analógicos (amplificadores operacionales, multiplexores analógicos (AMUX), DACs, ADC, voltajes de referencia internos de precisión) y digitales (Memoria EEPROM, Puertos UART e I<sup>2</sup>C) contenidos en el interior del sistema embebido, el cual, es el corazón del sistema de monitoreo y control de temperatura.

- Flexibilidad de actualización y configuración de los componentes analógicos y digitales del sistema de monitoreo y control de temperatura., con el fin de disminuir los tiempos de implementación y prototipado del sistema de monitoreo y control de temperatura.
- Conversión ADC de alta precisión ( $\geq 16$  bits @ 20 sps mínimo), configurable con entrada diferencial ó tipo single ended.
- Acondicionador de señal de sensor de temperatura Termistor NTC.
- Puertos de comunicación I<sup>2</sup>C y UART.
- Posibilidad de contar por lo menos con dos salidas analógicas, para ser utilizadas por conversores digitales analógicos (DAC).

La tabla 8, se presenta un análisis comparativo entre diferentes tipos de sistemas embebidos disponibles en nuestro medio:

SISTEMA EMBEBIDO	CARACTERISTICAS					
	Microcontrolador	Memoria de Programa	Frecuencia De Reloj	EEPROM	Puertos de Entrada / Salida (E/S)	Precio
	ATmega328	32 KB	16 MHZ	1 KB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 14 E/S Digitales.</li> <li>• 6 entradas analógicas</li> </ul>	\$28.560

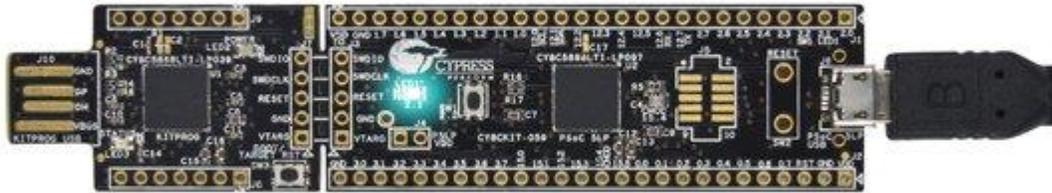
ARDUINO UNO (R3)					<ul style="list-style-type: none"> <li>• ADC de bits</li> </ul>	
PIC 18F4550	PIC 18F4550	32 KB	48 MHZ	256 B	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 35 E/S Digitales.</li> <li>• 13 entradas analógicas.</li> <li>• ADC de 10 Bits.</li> </ul>	\$39.389
PSoC 5LP	ARM CORTEX M3	256 KB	80 MHZ	2 KB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 48 E/S configurables como entrada /salida digital ó analógica</li> <li>• ADC Sigma Delta 8 a 20 bits cuya entrada puede ser diferencial ó single ended.</li> <li>• Multiplexor Analógico (AMUX) configurable como entrada diferencial ó single ended. (2 a 256 entradas)</li> </ul>	\$67.000

					<ul style="list-style-type: none"><li>• VDAC ó IDAC internos de 8 bits (4)</li><li>• Amplificadores Operacionales internos (4)</li><li>• Voltaje de referencia interno (1.024V) configurable.</li><li>• Acondicionador de señal de Sensores de Temperatura: Termistor, RTD, Termopar.</li><li>• Puertos de comunicaciones UART, I<sup>2</sup>C, SPI, CAN, USB.</li></ul>	
--	--	--	--	--	--	--

Tiva TM4C123GXL Launchpad	ARM CORTEX M4	256 KB	80 MHZ	2 KB	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 40 E/S</li> <li>• 13 entradas analógicas</li> <li>• ADC de 12 bits con entrada diferencial</li> <li>• Puertos de Comunicaciones I2C, UART, SPI, CAN, USB</li> <li>• Unidad de Punto Flotante de Precisión Simple.</li> </ul>	\$88.000
---------------------------------	------------------	--------	--------	------	---	----------

Tabla 8 Tabla comparativa de sensores de sistemas embebido [5]

El sistema embebido PSoC 5LP (Ilustración 13) fue seleccionado ya que cumple con todos los requerimientos expuestos anteriormente, agregando el disponer de un entorno de desarrollo (IDE) libre, PSoC Creator, el cual permite la configuración e interconexión de los componentes internos y puertos de E/S de forma gráfica.



*Ilustración 13 Sistema embebido PSoC 5LP [25]*

#### **4.1 Sistema actual y sistema propuesto**

El sistema de control actual con el cual se cuenta en el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad de Pamplona requiere que la persona a cargo ejerce una acción de control de forma manual, conllevando esto a disminuir la eficiencia actual del sistema. El sistema propuesto presenta un sistema de control a través del sistema embebido PSoC 5LP, como se puede ver en la ilustración 14, Atraves de este esquema se puede monitorear las variables de interés, como los son, la temperatura y ciclo circadiano; Buscando de esta forma aumentar la eficiencia del sistema.

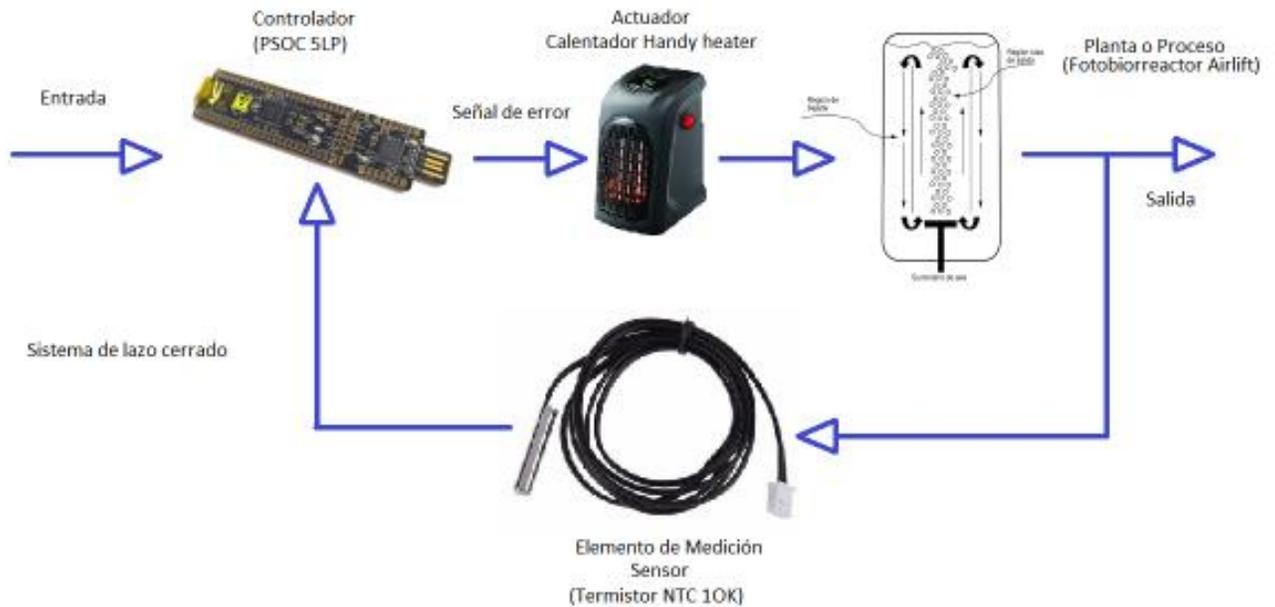


Ilustración 14 Sistema de control en lazo cerrado propuesto [5]

Para identificar la dinámica del sistema para realizar el control de temperatura del fotobiorreactor se realiza la toma de datos correspondiente, estas son tomadas a través del software puTTY, el cual es un emulador de terminales, que nos brinda soporte, en este caso para el puerto COM (Ilustración 15), realizando de esta manera un enlace serial, permitiendo generar un archivo con extensión .csv (Comma Separated Values) (Ilustración 16), para que de esta forma se puedan organizar de una forma adecuada. Estas tomas de datos se realizan en modo de lazo abierto, y colocando un setpoint de referencia, para este caso 29 °C, el sistema se excita al recibir este estímulo y se espera la respuesta del mismo (tabla 9).

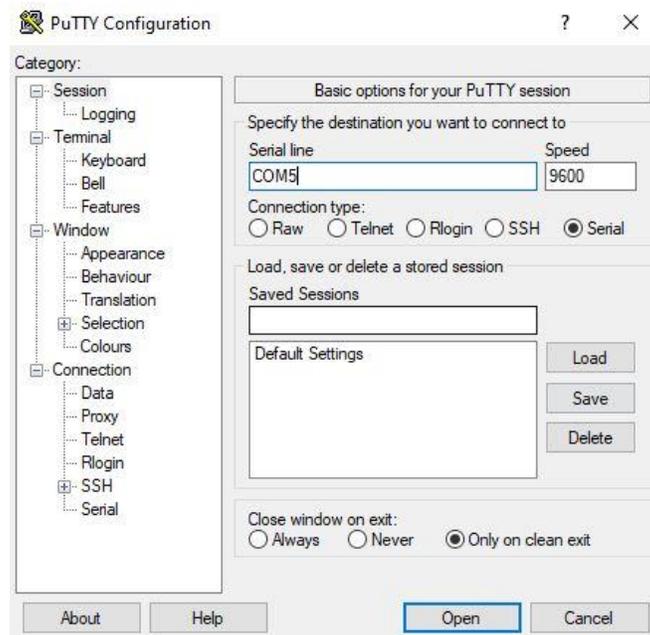


Ilustración 15 Configuración puerto COM [5]



Ilustración 16 Comunicación serial [5]

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Escalón (°C)
0	20,1	29
300	20,1	29
600	20,1	29
900	20,1	29
1200	20,4	29
1500	20,8	29
1800	21,3	29
2100	21,9	29
2400	22,7	29
2700	24,2	29
3000	25,6	29
3300	27,4	29
3600	28,3	29
3900	29,5	29
4200	30,2	29
4500	30,8	29
4800	31,3	29
5100	31,7	29
5400	32,4	29
5700	32,8	29
6000	32,9	29
6300	33,1	29
6600	33,2	29

6900	33,2	29
7200	33,2	29
7500	33,1	29
7800	33,2	29
8100	33,2	29
8400	33,2	29
8700	33,2	29
9000	33,2	29

Tabla 9 Toma de datos del sistema de control propuesto en lazo abierto [5]

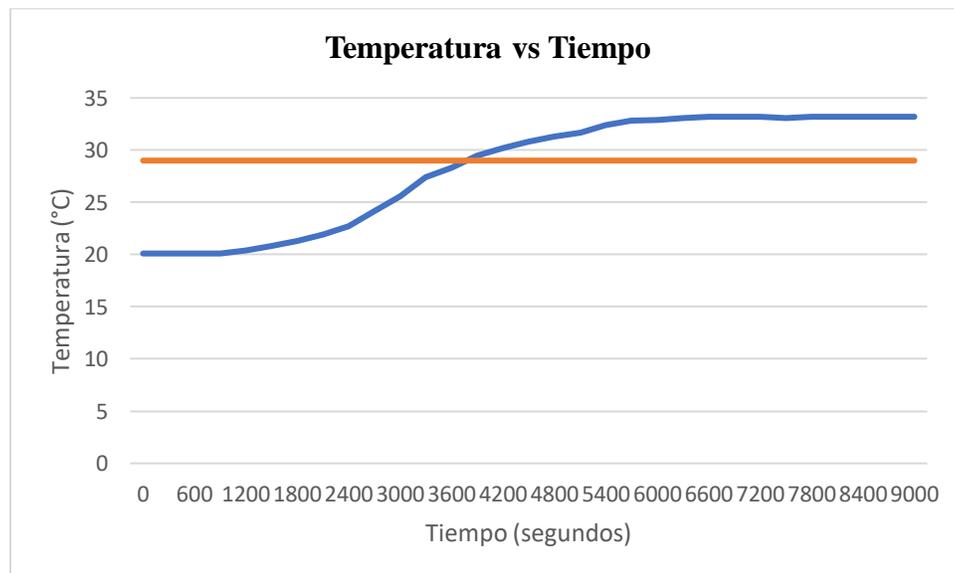


Ilustración 17 Gráfica Temperatura vs Tiempo [5]

Para generar la gráfica de la ilustración 17, se introdujo un setpoint de 29°C y se tomaron datos durante 2 horas y 30 minutos (9000 segundos), en los cuales se puede evidenciar que

el sistema presenta características de retardo neto o puro, el cual se caracteriza por contar con un retardo de tiempo entre la señal de salida respecto a la excitación de entrada [26]; Siendo entonces su ecuación característica:

$$G(s) = \frac{Ke^{-Tds}}{\tau S + 1}$$

*Ecuación 1 Ecuación Característica*

Teniendo como precedente esta información se procede a calcular los valores correspondientes

- Ganancia del sistema

$$K = \frac{Y_{final} - Y_{inicial}}{U_{final} - U_{inicial}}$$

*Ecuación 2 Ganancia del sistema*

$$K = \frac{33.2 - 20.1}{29 - 0} = 0.451$$

- Parámetro  $\tau$

$$T_{estable} = 4\tau$$

$$5400 = 4\tau$$

$$\frac{5400}{4} = \tau$$

$$1350 = \tau$$

- Retardo

$$900 \text{ segundos}$$

Determinando de esta forma la ecuación que modela la dinámica del sistema.

$$G(s) = \frac{0.451e^{-900s}}{1350s + 1}$$

*Ecuación 3 Ecuación característica del sistema propuesto [5]*

Dado que es un prototipo y por las características del proceso se decide implementar un controlador proporcional para el sistema de control de lazo cerrado; En el modo proporcional, la magnitud de la salida del controlador es proporcional al tamaño del error, entre más grande sea el error, más grande será la salida del controlador.[27]

$$\text{salida del controlador} = K_p e$$

*Ecuación 4 Ecuación salida controlador proporcional [27]*

En el cual, la entrada de referencia o setpoint, se define por sistema, la señal de error se va a determinar en base a la operación realizada entre la entrada de referencia y la señal del elemento de medida, que en este caso ya se determinó que sería el termistor NTC de 10k, el control se ejecuta dentro del sistema embebido PSoC 5LP, seleccionado en base a las ventajas y desventajas presentadas anteriormente y la planta o proceso será el bioproceso de crecimiento microalga que se lleva a cabo dentro del fotobiorreactor airlift.

Para verificar la respuesta del sistema se realiza la toma de datos correspondiente, este se realiza en modo de lazo cerrado, y colocando un setpoint de referencia, para este caso 29 °C, el sistema se excita al recibir este estímulo y se espera la respuesta del mismo (tabla 10).

Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Escalón (°C)
0	19,2	29
300	19,2	29
600	19,2	29
900	19,4	29
1200	19,6	29
1500	19,8	29
1800	20,2	29

2100	20,6	29
2400	21,0	29
2700	22,4	29
3000	23,2	29
3300	24,6	29
3600	25,8	29
3900	26,5	29
4200	27,1	29
4500	27,9	29
4800	28,7	29
5100	29,3	29
5400	29,3	29
5700	29,2	29
6000	29,2	29
6300	29,2	29
6600	29,1	29
6900	28,9	29
7200	28,9	29
7500	29,2	29
7800	29,2	29
8100	29,1	29
8400	29,1	29
8700	29	29
9000	29	29

Tabla 10 Toma de datos del sistema de control propuesto en lazo cerrado [5]

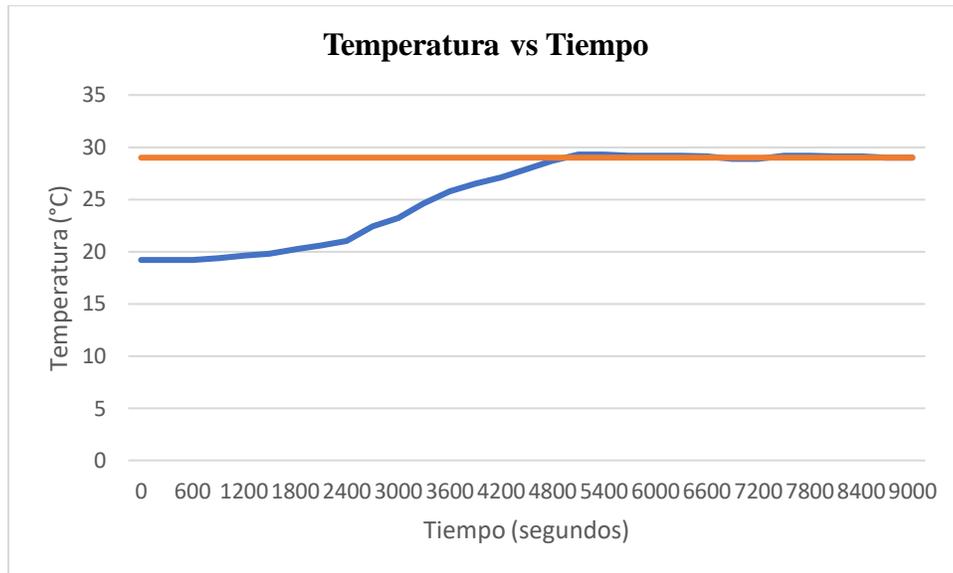


Ilustración 18 Gráfica Temperatura vs Tiempo (Controlada) [5]

## 4.2 Selección de componentes para el sistema embebido

Teniendo presente la selección de componentes realizada anteriormente, se inicia con el acople de los sensores necesarios para realizar el prototipo, en este caso el termistor ntc de 10k, para este sensor en específico el sistema embebido cuenta con un bloque especializado (Ilustración 19).

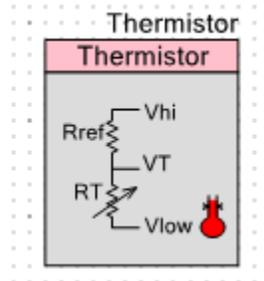


Ilustración 19 Bloque termistor [5]

La gran ventaja de este bloque en particular, es el hecho de que solo necesitamos ingresar los valores de temperatura mínimo, medio y máximo y los valores de resistencia equivalentes, estos últimos tomados de la tabla de calibración facilitados por el fabricante, y el bloque internamente realizara el cálculo correspondiente. (Ilustración 20), para realizar los cálculos correspondientes el bloque requiere la conexión de una resistencia externa y un termistor a PSoC. Los voltajes de la resistencia y el termistor conectados externamente se miden utilizando un ADC y los valores se pasan al componente del termistor a través de una llamada API. El valor de retorno de esta llamada a la API es la temperatura.

La resistencia del termistor cambia con el cambio de temperatura, por lo que la caída de voltaje a través del termistor cambia con la temperatura. Se mide la caída de voltaje a través del termistor y la resistencia, y la resistencia del termistor se encuentra usando la siguiente ecuación:

$$R_T = R_{ref} \left( \frac{V_T - V_{low}}{V_{hi} - V_T} \right)$$

*Ecuación 5 Ecuación resistencia termistor [25]*

Luego, la temperatura se determina en función de la resistencia, ya sea mediante la ecuación o el método LUT. La temperatura se obtiene en el método de la ecuación utilizando directamente la ecuación de Steinhart-Hart que se muestra a continuación:

$$\frac{1}{T_K} = A + B * \ln(R_{Thermistor}) + C * (\ln(R_{Thermistor}))^3$$

*Ecuación 6 Steinhart-Hart [28]*

Donde A, B y C son coeficientes de Steinhart-Hart calculados por el componente. Los coeficientes se obtienen resolviendo tres ecuaciones simultáneas formadas sustituyendo los “Parámetros del termistor” en el componente.

Estas ecuaciones se proporcionan en este documento para referencia del usuario. El componente realiza todos estos cálculos y proporciona la temperatura requerida según las selecciones del cuadro de diálogo Configurar. [28]

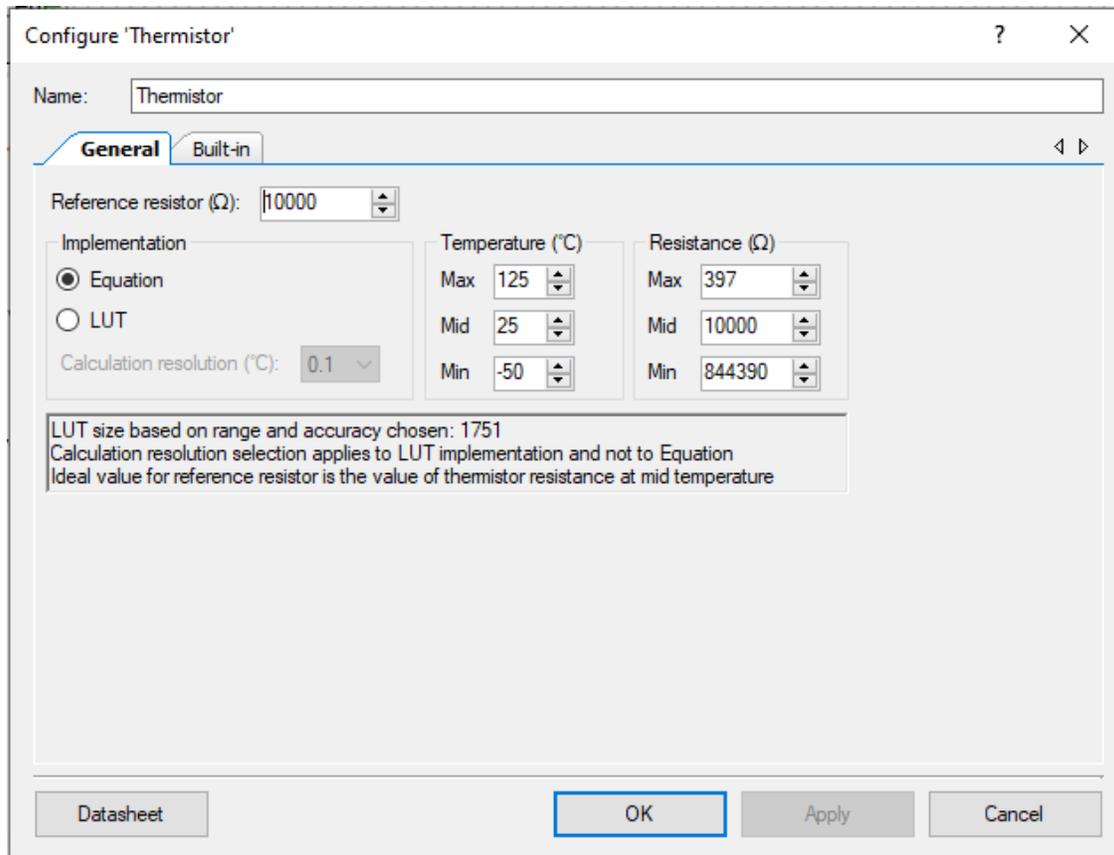


Ilustración 20 Configuración bloque termistor [5]

Para realizar la lectura análoga de los pines correspondientes, utilizamos un ADC Delta sigma (Ilustración 21)

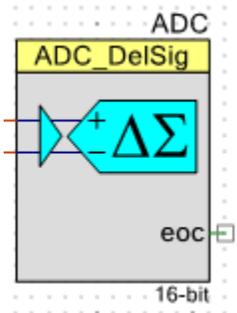


Ilustración 21 Bloque ADC Delta Sigma [5]

este bloque nos permite configurar varias configuraciones, dependiendo del tipo de necesidad con la que se cuente, para este caso en particular se utiliza una configuración de modo diferencial, como se muestra en la ilustración 22.

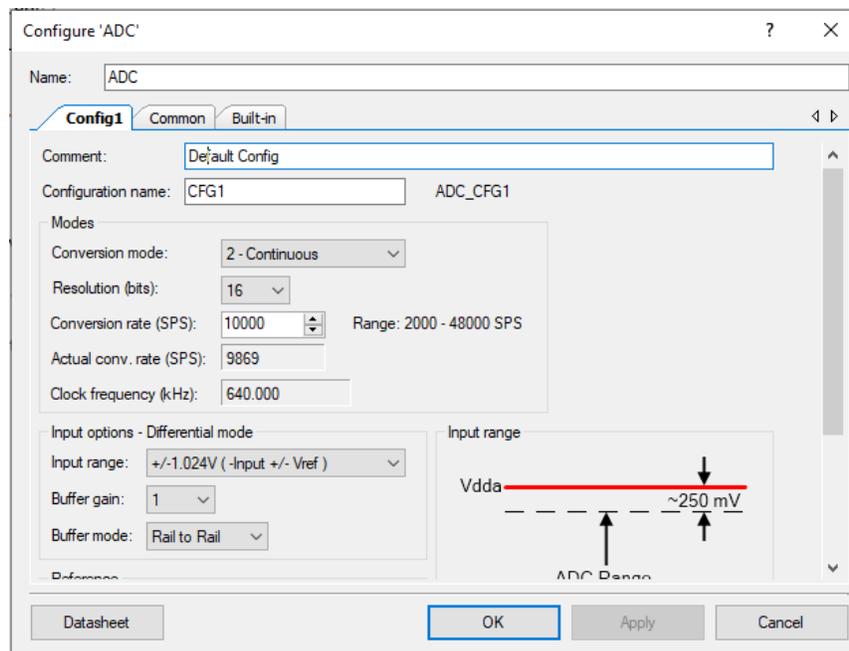
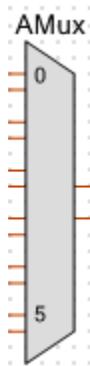


Ilustración 22 Configuración bloque ADC Delta Sigma [5]

Se utilizo también un bloque AMux (Ilustración 23), el cual se encuentra en modo diferencial también, para que de esta forma podamos hacer la lectura de tres (3) termistores, de los cuales uno está realizando la lectura de la temperatura ambiente, el otro está realizando la lectura interna del prototipo y el otro se encuentra realizando la lectura de temperatura en el interior del fotobiorreactor.



*Ilustración 23 Bloque AMux [5]*

Para este caso en particular, el bloque AMux está configurado en modo diferencial y cuenta con una cantidad de 6 canales (Ilustración 24).

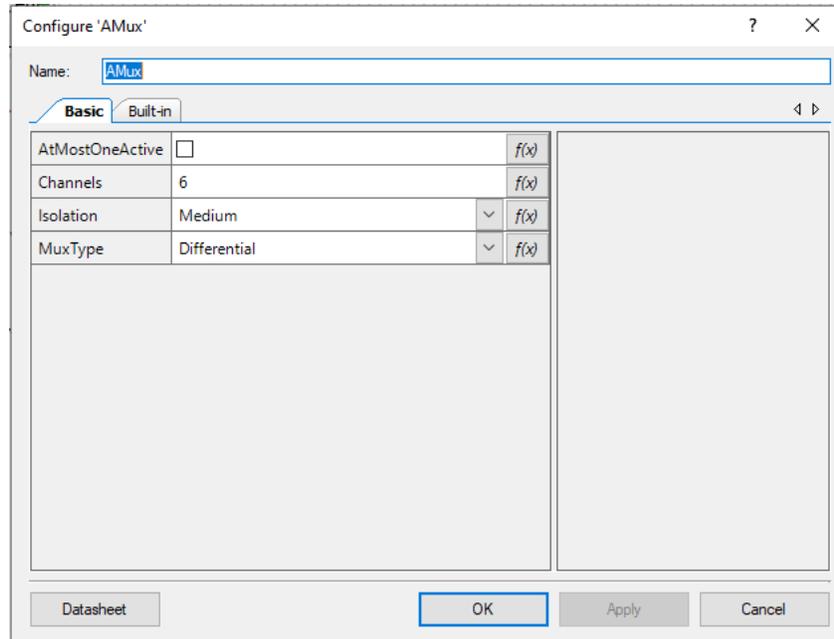


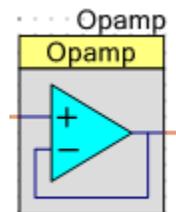
Ilustración 24 Configuración bloque Amux [5]

Dado que los componentes necesarios para realizar estas lecturas están configurados en modo diferencial, se requiere de un valor de voltaje de 1.024 voltios para de esta forma tener un voltaje de referencia para el correcto funcionamiento del sensor termistor NTC 10k, para este caso utilizamos un voltaje de referencia  $V_{ref}$ . (Ilustración 25).

1.024V  $V_{ref}$

Ilustración 25 Bloque  $V_{ref}$  [5]

Y se utiliza un amplificador operacional de los de los cuatro de los que dispone el sistema embebido PSoC 5LP, en modo seguidor, para asegurar que no se tenga pérdidas de voltaje. (Ilustración 26).



*Ilustración 26 Bloque Opamp [5]*

Para la configuración de este bloque se especifica que este tenga una configuración en modo seguidor. (Ilustración 27)

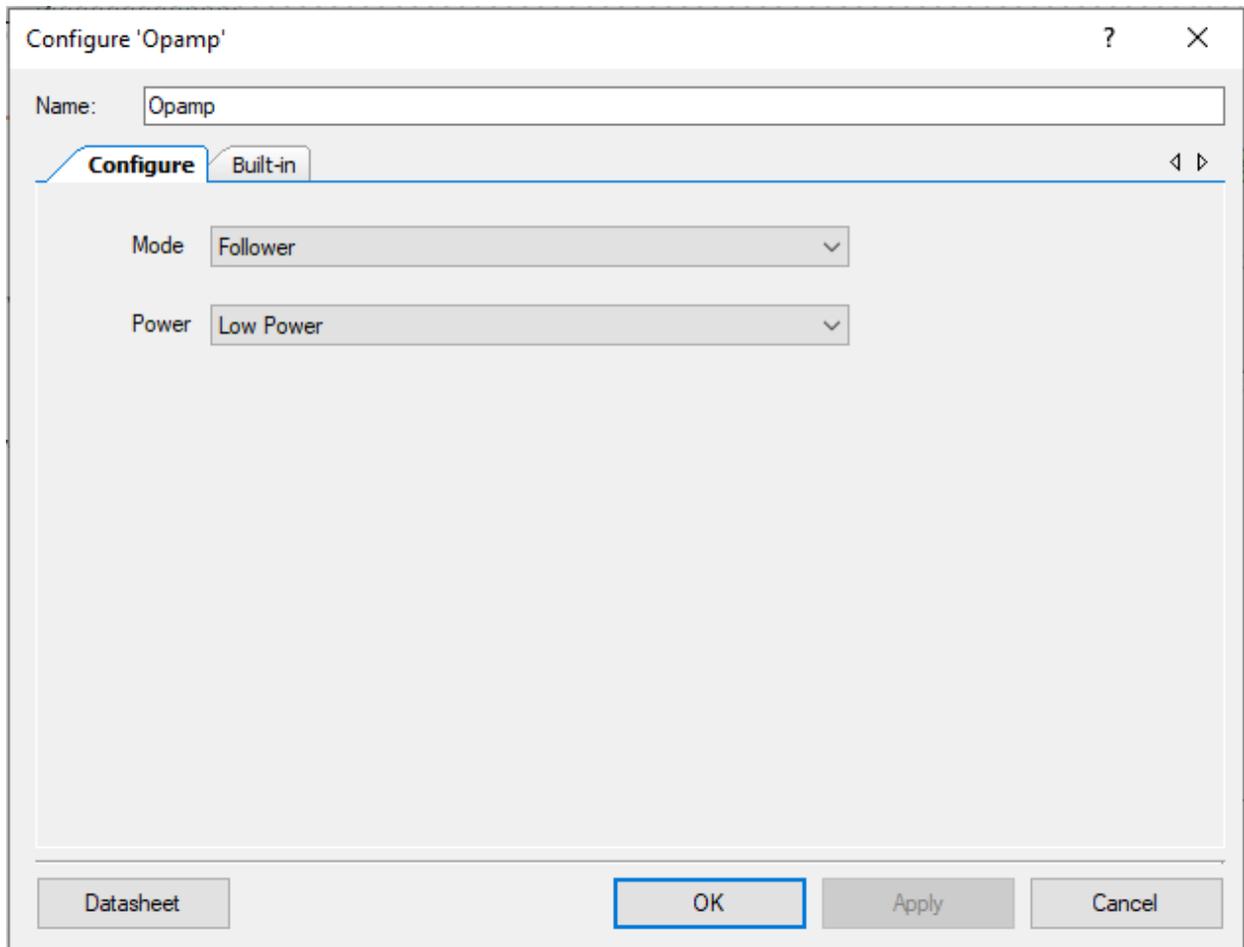


Ilustración 27 Configuración bloque Opamp [5]

Dado que el sistema embebido cuenta cuatro (4) bloques VDAC8 (8-Bit Voltage Digital to Analog Converter), (Ilustración 28), se decide incorporar dos bloques, para tener este voltaje de referencia en dos de los tres termistores encargados de las lecturas de la temperatura, ya que el bloque termistor requiere para sus cálculos que cada sensor termistor NTC 10K, tenga su respectivo valor de referencia.

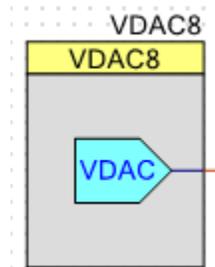


Ilustración 28 Bloque VDAC8 [5]

Configure 'VDAC8' ? X

Name: VDAC8

**Configure** Built-in < >

Range

0 - 1.020 V (4 mV / bit)

0 - 4.080 V (16 mV / bit)

Speed

Slow Speed

High Speed

Value

mV:

8 bit Hex:

Note: Changing any value field recalculates the other

Data Source

DAC Bus

CPU or DMA (Data Bus)

Strobe Mode

External

Register Write

Datasheet OK Apply Cancel

Ilustración 29 Configuración bloque VDAC8 [5]

Dado que algunos de los sensores BH1750 y DS1307 trabajan con un protocolo similar (I2C), es aquí donde entra en funcionamiento el bloque I2C del sistema embebido PSoC 5LP (Ilustración 30), el cual cuenta con cuatro (4) diferentes configuraciones, pero para este caso en particular se seleccionó la configuración Master, como lo podemos ver en la ilustración 31, permitiendo la rápida configuración y funcionamiento de los mismos.

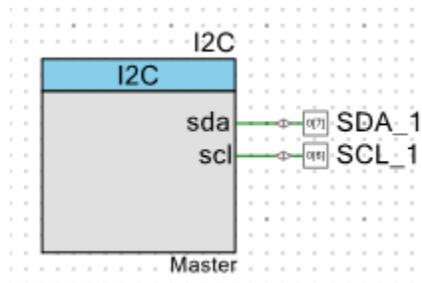
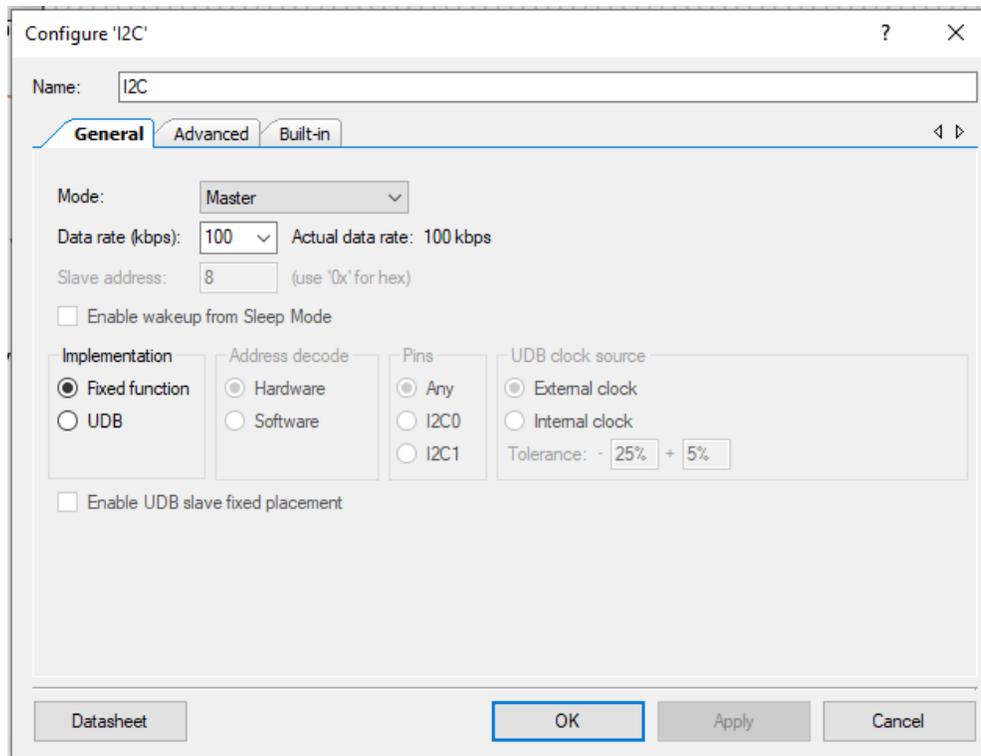


Ilustración 30 Bloque I2C [5]



*Ilustración 31 Configuración bloque I2C [5]*

Puesto que en el laboratorio de Biotecnología de la Universidad de Pamplona presenta ciertos inconvenientes con cortes de fluido eléctrico, por esta razón se hace uso del bloque EEPROM, el cual nos permite tener acceso a la memoria de sólo lectura programable y borrrable eléctricamente del sistema embebido PSoC 5LP.

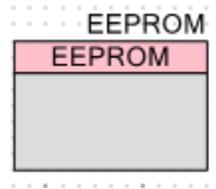


Ilustración 32 Bloque EEPROM [5]

Esto con el fin de ingresar rutinas de reinicio y puesta en marcha del prototipo para cuando se presente este tipo de inconvenientes, aunque no es la solución más efectiva, sí nos permite resolver de una forma rápida dicho problema.

Para la toma de datos del proceso, en el caso de la identificación, se utiliza el bloque UART ilustración 33, el cual nos permite una comunicación serial entre el sistema embebido PSoC 5LP y el computador, permitiendo esto visualizar y almacenar las variables registradas de una mejor forma.

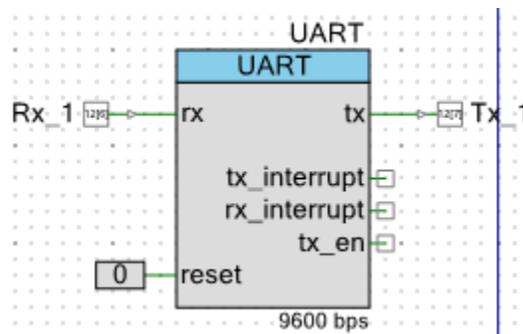


Ilustración 33 Bloque UART [5]

Para la visualización de la información, el sistema embebido PSoC 5LP cuenta con un bloque especializado en pantallas LCD, el cual nos permite una fácil y rápida conexión de varios tipos de LCD, además de que cuenta con varias opciones, siendo una de ellas por ejemplo la opción de poder crear caracteres especiales.

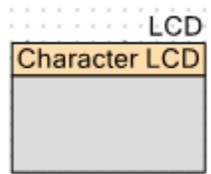


Ilustración 34 Bloque LCD [5]

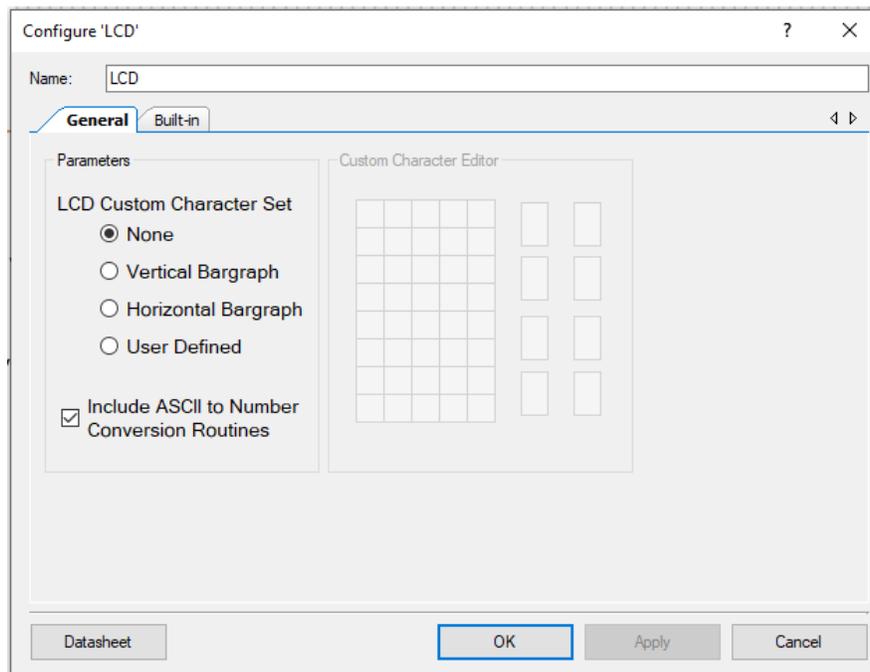


Ilustración 35 Configuración bloque LCD [5]

Dado que el sistema embebido PSoC 5 LP cuenta con dos diferentes estilos de programación, Solo hardware (sin ninguna intervención de código) y hardware con software, todos y cada uno de los bloques mencionados anteriormente forman el total de los bloques utilizados para el prototipo (Ilustración 36), ahora bien en la ilustración 37 , se evidencia el código implementa en el sistema embebido, y en la ilustración 38 se evidencia la configuración de conexión de pines que fueron utilizados en el mismo.

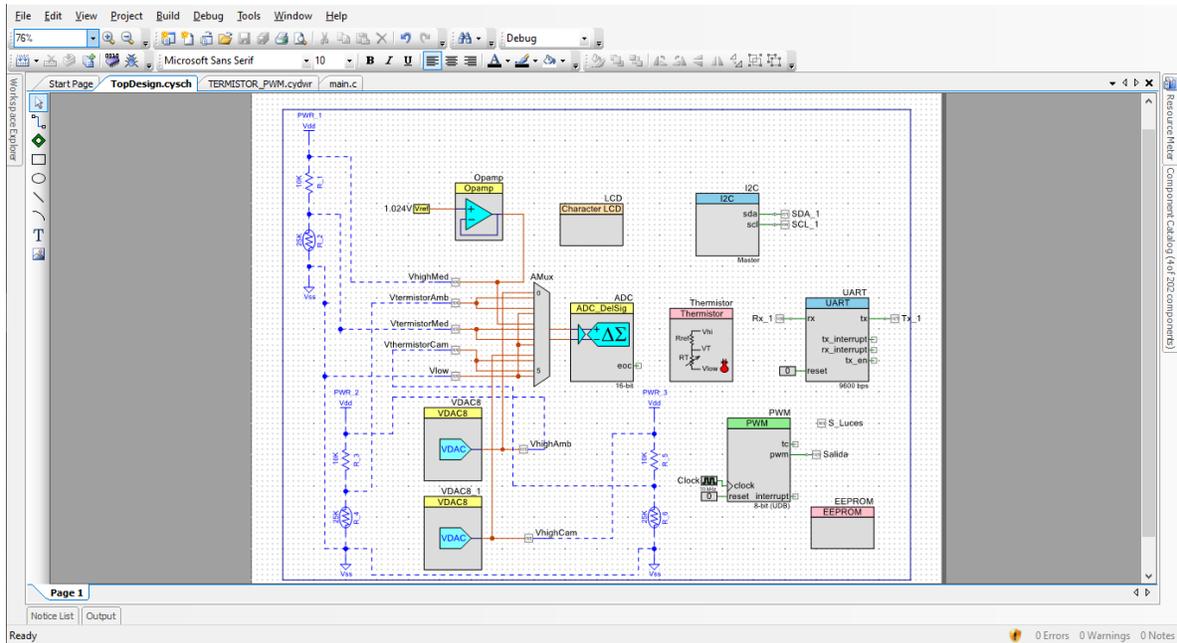


Ilustración 36 Total de bloques utilizados en el IDE PSoc Creator [5]

```

File Edit View Project Build Debug Tools Window Help
75% Debug
Start Page TopDesign.cydsn TERMISTOR_PWM.cydsn main.c
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 <stdlib.h>
15 #include <string.h>
16 #include <math.h>
17 #define BH 0x23
18 #define SlaveAddress 0x68
19 uint8 Table[7];
20 #define LUNES 1
21 #define MARTES 2
22 #define MIERCOLES 3
23 #define JUEVES 4
24 #define VIERNES 5
25 #define SABADO 6
26 #define DOMINGO 7
27
28
29
30 int32 VthermMed, VthermAmb, VthermCam, Vref, Vref1, Vref2;
31 int32 TermResisMed, TermTempMed, TermResisAmb, TermTempAmb, TermResisCam, TermTempCam;
32 float TermistorResisMed, TermistorTempMed, TermistorResisAmb, TermistorTempAmb, TermistorResisCam, TermistorTempCam;
33
34 float lux = 0;

```

The screenshot shows the PSoc Creator IDE with the 'main.c' file open. The code includes standard C headers and defines constants for days of the week and a slave address. It also declares several integer and float variables for sensor readings and calculations. The status bar at the bottom indicates 'Ln 287 Col 35 INS 0 Errors 0 Warnings 0 Notes'.

Ilustración 37 Programación en código [5]

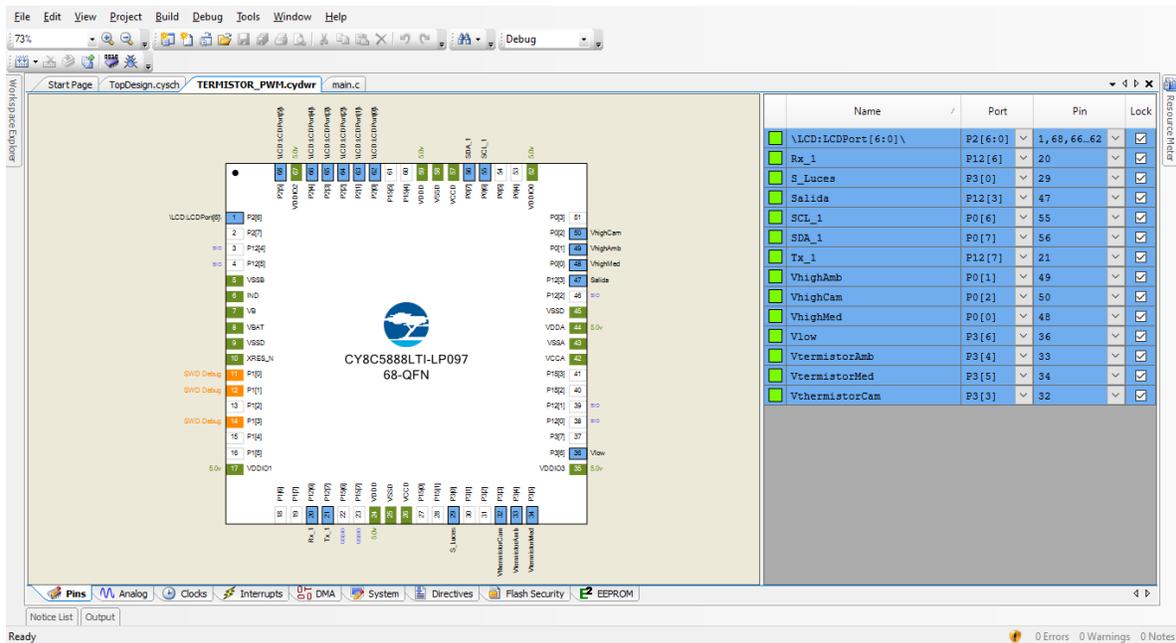


Ilustración 38 Configuración de Puertos Físicos de E/S [5]

### 4.3 Cálculos correspondientes a la etapa de potencia

#### 4.3.1 Ciclo Circadiano

Esta primera etapa, tal como se aprecia en la ilustración 39, consta de 2 circuitos: Control (Malla I) y Potencia (Lazo II), los cuales se acoplan ópticamente por medio del optoacoplador MOC3021, debido a que el primero se implementa sobre niveles DC mientras que el segundo está energizado por corriente alterna (AC).

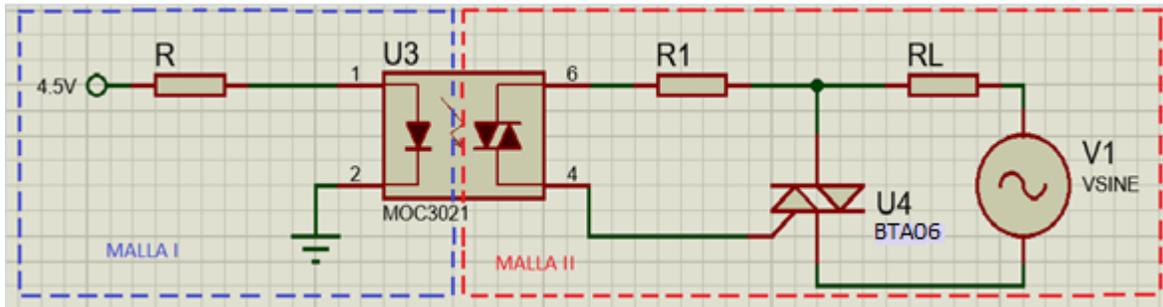


Ilustración 39 Etapa de Potencia [5]

La carga del circuito de potencia consta de dos tubos LED ( $110V_{RMS} / 6 W_{RMS}$ ) conectados en paralelo, los cuales generan el manejo de ciclo circadiano de las microalgas. La estimación de la resistencia de cada tubo LED, se establece despejándola de una de las fórmulas de la Ley de Joule, así:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(110V_{RMS})^2}{6W_{RMS}} = 2016.66\Omega$$

Ecuación 7 Ley de Joule [5]

La carga del circuito de potencia conecta a 2 de estos tubos LED del mismo tipo en paralelo, lo que resulta un valor de  $R_L = 0.5 * (2016.66 \Omega) = 1008.33 \Omega$ .

El optoacoplador MOC3020 consta de diodos emisores infrarrojos de arseniuro de galio, acoplados ópticamente a un interruptor bilateral de silicio. Por medición directa se establecen

los niveles de voltaje ( $V_{OH}$ ) y corriente ( $I_{OH}$ ) de salida en nivel lógico ALTO, del puerto digital que utiliza el sistema embebido PSoC 5LP:

- Voltaje de salida en nivel lógico ALTO ( $V_{OHmax}$ ): 4.5V.
- Corriente de salida en nivel lógico ALTO ( $I_{OHmax}$ ): 4 mA.

Estos datos se aplican en el análisis de la malla I. Para el lazo II, se realizaron mediciones del voltaje de línea presente en la instalación eléctrica del Laboratorio CD201 de la Universidad de Pamplona, sede principal, el cual arrojó un valor repetible de 130V<sub>RMS</sub> en cada uno de sus tomacorrientes.

#### 4.3.1.1 Análisis Malla I

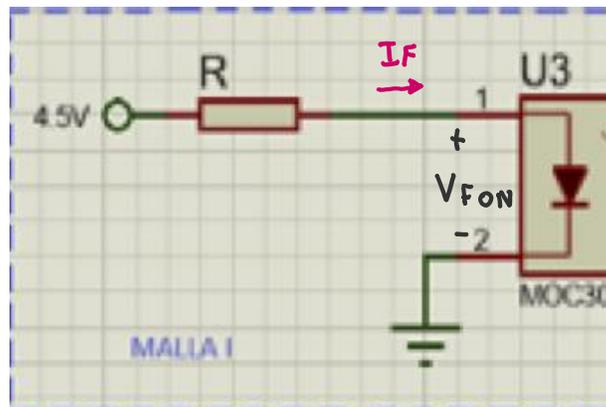


Ilustración 40 Análisis Malla I de etapa de potencia [5]

Al aplicar la LVK en la malla I, se obtiene la siguiente ecuación:

$$-4.5V + I_F * R + V_{Fon} = 0V$$

Tomando en consideración que el voltaje de conducción del LED que está en el MOC3021 ( $V_{Fon}$ ) es de 1.5V (consultar datasheet), el valor de la resistencia limitadora R es:

$$R = \frac{4.5V - 1.5V}{0.004A} = 750\Omega$$

Para conocer el valor de disipación de potencia de la resistencia, se aplica una de las variantes de la Ley de Joule, así:

$$P_R = I_F^2 * R = (0.004A)^2 * (750\Omega) = 0.012W$$

Por lo anterior se selecciona una resistencia limitadora de  $750\Omega / 0.25W$ , la cual se conecta en serie entre el puerto de salida digital del PSoC 5LP y el LED interno del MOC3021.

#### 4.3.1.2 Análisis Lazo II

Por lecturas tomadas en el laboratorio CD 201 de la universidad de Pamplona, el voltaje de línea obtenido en sus instalaciones es 130Vac ó  $130V_{RMS}$ . Se necesita conocer la amplitud del voltaje de línea ( $V_{1p}$ ), para calcular la resistencia limitadora  $R_1$  que se conecta en serie con el optotriac, luego de aplicar la LVK al lazo 2:

$$V_{1RMS} = 130V$$

$$V_{1p} = \frac{V_{RMS}}{0.707} = \frac{130V}{0.707}$$

$$V_{1p} = 183.8V$$

A continuación, se ilustra el Lazo II. En él se involucran la fuente de energía (AC) V1, RL, R1, el optotriac y la compuerta del Triac. Este lazo resulta del análisis de 4 escenarios de conducción /no conducción del optotriac y el triac simultáneamente:

- Optotriac OFF, Triac OFF
- Optotriac OFF, Triac ON
- Optotriac ON, Triac OFF
- Optotriac ON, Triac ON

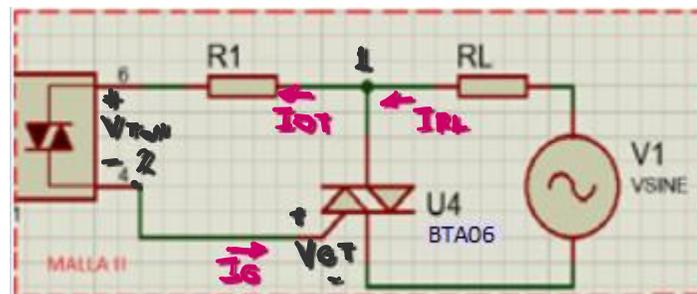


Ilustración 41 Análisis Lazo II etapa de potencia [5]

Se escoge el escenario donde la corriente que fluye por el optotriac es mayor, para calcular la magnitud de su resistencia limitadora R1; ese escenario es el tercero donde solo conduce el optotriac, considerando también la amplitud de V1 ( $V_{1p}$ ). Aquí, se aplica la LVK, para un semiciclo de señal AC, la cual resulta:

$$-V_{1p} + I_{RL} R_L + I_{OT} R_1 + V_{Ton} + V_{GT} = 0$$

*Ecuación 8 Ecuación LVK Lazo II [5]*

Donde:

$I_{OT}$  : Corriente que fluye por el optotriac

$I_{RL}$  : Corriente que fluye por la resistencia de carga  $R_L$

$V_{Ton}$ : Voltaje de Conducción del Optotriac

$V_{GT}$  : Voltaje de Disparo de Compuerta del Triac

Ahora se aplica la LCK en los nodos 1 y 2 para establecer respectivamente:

$$I_{RL} = I_{OT}$$

$$I_{OT} = I_G$$

Por lo tanto:

$$I_{RL} = I_{OT} = I_G$$

Se sustituyen en la ecuación del lazo  $I_{RL}$  e  $I_{OT}$  por  $I_G$ , para despejar el valor de  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{V_{1p} - V_{Ton} - I_G * R_L - V_{GT}}{I_G}$$

$$R_1 = \frac{183.84 V - 3 V - 0.1 A * (1008.33 \Omega) - 1.5 V}{0.1 A}$$

$$R_1 = 785.06 \Omega$$

$$I_{G(AV)max} = \frac{P_{G(AV)max}}{V_{GT}}$$

$$I_{G(AV)max} = \frac{0.5 W}{1.5 V}$$

$$I_{G(AV)max} = 0.33 A$$

$$I_{GT} < I_G < \frac{I_{G(AV)max}}{2}$$

$$0,035 A < I_G < 0,165 A \rightarrow I_G = 0.1 A$$

$$P_{R1} = I_G^2 * R_1 \rightarrow P_{R1} = (0.1 A)^2 * 785.06 \Omega$$

$$P_{R1} = 7.85 W$$

#### 4.3.1.3 Análisis Térmico del Triac

En esta sección se aborda la estimación de la potencia promedio máxima, que disipa el triac en su punto de operación, para establecer si requiere o no disipador de calor. Primero se establece la ventana de conducción del triac por cada semiciclo de señal AC, en la cual el tiempo mínimo de conducción del triac,  $t_H$ , se calcula así: [29]

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

$$t_H = \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{(15 \text{ mA})(1008.33 \Omega) + 5V}{183.84 \text{ V}}\right)}{120\pi \text{ rad/s}}][\text{rad}]$$

$$t_H = 290.96 \mu\text{s}$$

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

$$T = 0,0166 \text{ s}$$

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

$$toff = \frac{0.0166 \text{ s}}{2} - 290.96 \mu\text{s}$$

$$toff = 8.0423 \text{ ms}$$

$V_{Ton} = 5 V \rightarrow$  Voltaje de conducción del Triac BTA06

$$I_{Tp} = \frac{V_{1p} - V_{Ton}}{R_L} \rightarrow \text{Corriente Pico en el Triac}$$

$$I_{Tp} = \frac{189.84 V - 5 V}{1008.33 \Omega}$$

$$I_{Tp} = 0.18313 A$$

$$\overline{P_{Dmax}} = \frac{2}{T} \int_{tH}^{toff} V_{Ton} * I_{Tp} \text{Sen}120\pi t dt \rightarrow \text{El Triac conduce en los 2 semiciclos}$$

$$\overline{P_{Dmax}} = 2 * \frac{V_{Ton} * I_{Tp}}{T} \int_{tH}^{toff} \text{Sen}120\pi t dt$$

$$\overline{P_{Dmax}} = 2 * \frac{5 V * 0.18313 A}{0.0166 s} \int_{290.96\mu s}^{8.0423ms} \text{Sen}120\pi t dt$$

$$\overline{P_{Dmax}} = 2 * \frac{0.91565 W}{0.0166s} * \frac{1}{120\pi \text{ rad/s}} * (-\text{Cos}120\pi t)_{290.96 \mu s}^{8.0423 ms}$$

$$\overline{P_{Dmax}} = 0.29144W * [ -(-0.993987) - (-0.993991) ]$$

$$\overline{P_{Dmax}} = 0.57937 W$$

Al establecer la potencia promedio máxima que disipa el Triac en su punto de operación, se calcula su temperatura de unión ( $T_j$ ) utilizando la Ley de Ohm Térmica para el componente electrónico sin disipador de calor, la cual aplicada al Triac es:

$$T_j - T_a = \overline{P_{Dmax}} * R\theta_{ja}$$

*Ecuación 9 Ley de Ohm Térmica BT06 [5]*

Donde:

$T_j$  : Temperatura de Unión del Dispositivo en su Punto de Operación expresada en °C.

$T_a$  : Temperatura Ambiente del Sitio donde Opera el Triac, expresada en °C.

$R\theta_{ja}$  : Resistencia Térmica Unión Ambiente del Triac expresada en °C/W.

Se realizaron mediciones de temperatura ambiente del laboratorio CD201, durante la realización de este proyecto, hasta la puesta en marcha del prototipo. El valor máximo registrado fue de 26°C, el cual se asignó como  $T_a$ . La  $R\theta_{ja}$  del triac BTA06 es de 60°C/W (consultar datasheet). La temperatura de unión del triac es:

$$T_j = 26^{\circ}C + 0.57937W * \left(60^{\circ} \frac{C}{W}\right)$$

$$T_j = 60.76^{\circ}C$$

Este parámetro se compara luego con su temperatura de unión máxima ( $T_{jmax}=125^{\circ}C$ ); se establece un criterio para decidir si el triac requiere o no disipador de calor. Este es:

$$\frac{T_j}{T_{jmax}} < 0.5 \rightarrow \text{El triac no requiere disipador de calor}$$

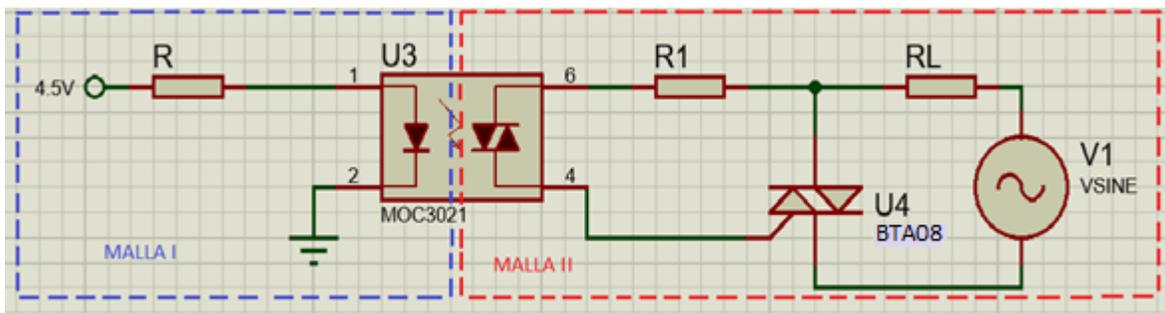
$$\dot{\iota} \frac{60.76^\circ\text{C}}{125^\circ\text{C}} < 0.5?$$

$$\dot{\iota} 0.486 < 0.5? \rightarrow \text{Si Cumple con la condici3n}$$

Por lo tanto, el Triac no requiere disipador de calor, se decide de todos modos acoplar un disipador de calor para asegurar el 3ptimo funcionamiento del dispositivo Triac.

#### 4.3.2 Calentador

Esta primera etapa, tal como se aprecia en la ilustraci3n 42, consta de 2 circuitos: Control (Malla I) y Potencia (Lazo II), los cuales se acoplan 3pticamente por medio del optoacoplador MOC3021, debido a que el primero se implementa sobre niveles DC mientras que el segundo est3 energizado por corriente alterna (AC).



Ilustraci3n 42 Etapa de Potencia

La carga del circuito de potencia para este caso consta del calentador Handy Heater ( $110V_{RMS}$  /  $400 W_{RMS}$ ), el cual genera la temperatura del fotobiorreactor para obtener las condiciones deseadas de las microalgas. La estimación de la resistencia del calentador, se establece despejándola de una de las fórmulas de la Ley de Joule, así:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{(110V_{RMS})^2}{400W_{RMS}} = 30.25\Omega$$

*Ecuación 10 Ley de Joule [29]*

El optoacoplador MOC3020 consta de diodos emisores infrarrojos de arseniuro de galio, acoplados ópticamente a un interruptor bilateral de silicio. Por medición directa se establecen los niveles de voltaje ( $V_{OH}$ ) y corriente ( $I_{OH}$ ) de salida en nivel lógico ALTO, del puerto digital que utiliza el sistema embebido PSoC 5LP:

- Voltaje de salida en nivel lógico ALTO ( $V_{OHmax}$ ): 4.5V.
- Corriente de salida en nivel lógico ALTO ( $I_{OHmax}$ ): 4 mA.

Estos datos se aplican en el análisis de la malla I. Para el lazo II, se realizaron mediciones del voltaje de línea presente en la instalación eléctrica del Laboratorio CD201 de la Universidad de Pamplona, sede principal, el cual arrojó un valor repetible de  $130V_{RMS}$  en cada uno de sus tomacorrientes.

### 4.3.2.1 Análisis Malla I

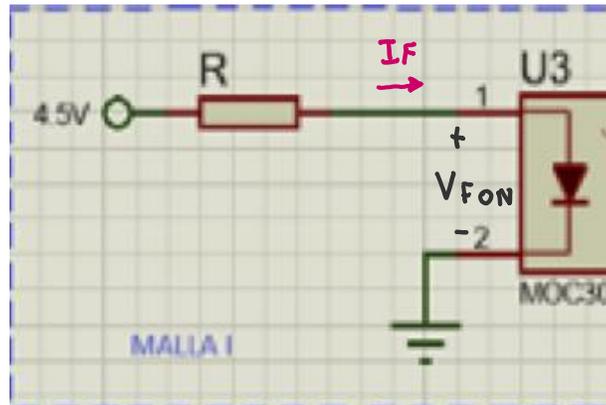


Ilustración 43 Análisis Malla I de etapa de potencia [5]

Al aplicar la LK en la malla I, se obtiene la siguiente ecuación:

$$-4.5V + I_F * R + V_{Fon} = 0V$$

Tomando en consideración que el voltaje de conducción del LED que está en el MOC3021

( $V_{Fon}$ ) es de 1.5V (consultar datasheet), el valor de la resistencia limitadora R es:

$$R = \frac{4.5V - 1.5V}{0.004A} = 750\Omega$$

Para conocer el valor de disipación de potencia de la resistencia, se aplica una de las variantes de la Ley de Joule, así:

$$P_R = I_F^2 * R = (0.004A)^2 * (750\Omega) = 0.012W$$

Por lo anterior se selecciona una resistencia limitadora de  $750\Omega / 0.25W$ , la cual se conecta en serie entre el puerto de salida digital del PSoC 5LP y el LED interno del MOC3021.

#### 4.3.2.2 Análisis Lazo II

Por lecturas tomadas en el laboratorio CD 201 de la universidad de Pamplona, el voltaje de línea obtenido en sus instalaciones es  $130V_{ac}$  ó  $130V_{RMS}$ . Se necesita conocer la amplitud del voltaje de línea ( $V_{1p}$ ), para calcular la resistencia limitadora  $R_1$  que se conecta en serie con el optotriac, luego de aplicar la LVK al lazo 2:

$$V_{1RMS} = 130V$$

$$V_{1p} = \frac{V_{RMS}}{0.707} = \frac{130V}{0.707}$$

$$V_{1p} = 183.84V$$

A continuación, se ilustra el Lazo II. En él se involucran la fuente de energía (AC) V1, RL, R1, el optotriac y la compuerta del Triac. Este lazo resulta del análisis de 4 escenarios de conducción /no conducción del optotriac y el triac simultáneamente:

- Optotriac OFF, Triac OFF

- Optotriac OFF, Triac ON
- Optotriac ON, Triac OFF
- Optotriac ON, Triac ON

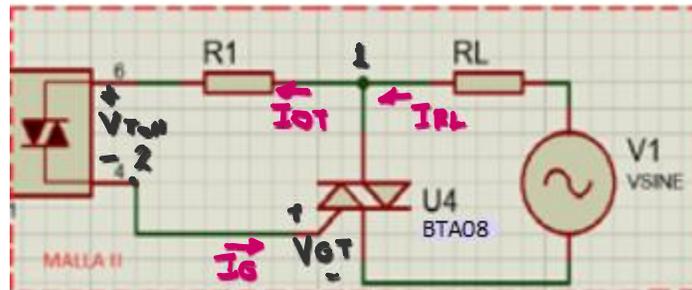


Ilustración 44 Análisis Lazo II de etapa de potencia [5]

Se escoge el escenario donde la corriente que fluye por el optotriac es mayor, para calcular la magnitud de su resistencia limitadora  $R_1$ ; ese escenario es el tercero donde solo conduce el optotriac, considerando también la amplitud de  $V_1$  ( $V_{1p}$ ). Aquí, se aplica la LVK, para un semiciclo de señal AC, la cual resulta:

$$-V_{1p} + I_{RL} R_L + I_{OT} R_1 + V_{Ton} + V_{GT} = 0$$

Ecuación 11 Ecuación LVK Lazo II [29]

Donde:

$I_{OT}$  : Corriente que fluye por el optotriac

$I_{RL}$  : Corriente que fluye por la resistencia de carga  $R_L$

$V_{Ton}$ : Voltaje de Conducción del Optotriac

$V_{GT}$  : Voltaje de Disparo de Compuerta del Triac

Ahora se aplica la LCK en los nodos 1 y 2 para establecer respectivamente:

$$I_{RL} = I_{OT}$$

$$I_{OT} = I_G$$

Por lo tanto:

$$I_{RL} = I_{OT} = I_G$$

Se sustituyen en la ecuación del lazo  $I_{RL}$  e  $I_{OT}$  por  $I_G$ , para despejar el valor de  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{V_{1p} - V_{Ton} - I_G * R_L - V_{GT}}{I_G}$$

$$R_1 = \frac{183.84 V - 3 V - 0.1 A * (30.25 \Omega) - 1.5 V}{0.1 A}$$

$$R_1 = 1763.15 \Omega$$

$$I_{G(AV)max} = \frac{P_{G(AV)max}}{V_{GT}}$$

$$I_{G(AV)max} = \frac{0.5 \text{ W}}{1.5 \text{ V}}$$

$$I_{G(AV)max} = 0.33 \text{ A}$$

$$I_{GT} < I_G < \frac{I_{G(AV)max}}{2}$$

$$0,025 \text{ A} < I_G < 0,165 \text{ A} \rightarrow I_G = 0.1 \text{ A}$$

$$P_{R1} = I_G^2 * R_1 \rightarrow P_{R1} = (0.1 \text{ A})^2 * 1763.15 \Omega$$

$$P_{R1} = 17.63 \text{ W}$$

#### 4.3.1.3 Análisis Térmico del Triac

En esta sección se aborda la estimación de la potencia promedio máxima, que disipa el triac en su punto de operación, para establecer si requiere o no disipador de calor. Primero se establece la ventana de conducción del triac por cada semiciclo de señal AC, en la cual el tiempo mínimo de conducción del triac,  $t_H$ , se calcula así: [29]

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

$$t_H = \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{(15 \text{ mA})(1763.15\Omega) + 5V}{183.84 \text{ V}}\right)}{120\pi \text{ rad/s}}][\text{rad}]$$

$$t_H = 455.98 \mu\text{s}$$

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

$$T = 0,0166 \text{ s}$$

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

$$toff = \frac{0.0166 \text{ s}}{2} - 455.98 \mu\text{s}$$

$$toff = 7.84 \text{ ms}$$

$V_{Ton} = 5 \text{ V} \rightarrow$  Voltaje de conducción del Triac BTA08

$$I_{Tp} = \frac{V_{1p} - V_{Ton}}{R_L} \rightarrow \text{Corriente Pico en el Triac}$$

$$I_{Tp} = \frac{183.84 \text{ V} - 5 \text{ V}}{1763.15 \Omega}$$

$$I_{Tp} = 0.1014 \text{ A}$$

$$\overline{P_{Dmax}} = \frac{2}{T} \int_{tH}^{toff} V_{Ton} * I_{Tp} \text{Sen}120\pi t dt \rightarrow \text{El Triac conduce en los 2 semiciclos}$$

$$\overline{P_{Dmax}} = 2 * \frac{V_{Ton} * I_{Tp}}{T} \int_{tH}^{toff} \text{Sen}120\pi t dt$$

$$\overline{P_{Dmax}} = 2 * \frac{5 V * 0.1014 A}{0.0166 s} \int_{455.98\mu s}^{7.84ms} \text{Sen}120\pi t dt$$

$$\overline{P_{Dmax}} = 2 * \frac{0.507 W}{0.0166s} * \frac{1}{120\pi \text{ rad/s}} * (-\text{Cos}120\pi t)_{455.98 \mu s}^{7.84 ms}$$

$$\overline{P_{Dmax}} = 0.1620W * [ -(-0.982755) - (-0.985261) ]$$

$$\overline{P_{Dmax}} = 0.3188 W$$

Al establecer la potencia promedio máxima que disipa el Triac en su punto de operación, se calcula su temperatura de unión ( $T_j$ ) utilizando la Ley de Ohm Térmica para el componente electrónico sin disipador de calor, la cual aplicada al Triac es:

$$T_j - T_a = \overline{P_{Dmax}} * R\theta_{ja}$$

*Ecuación 12 Ley de Ohm Térmica BT08 [29]*

Donde:

$T_j$  : Temperatura de Unión del Dispositivo en su Punto de Operación expresada en °C.

$T_a$  : Temperatura Ambiente del Sitio donde Opera el Triac, expresada en °C.

$R\theta_{ja}$  : Resistencia Térmica Unión Ambiente del Triac expresada en °C/W.

Se realizaron mediciones de temperatura ambiente del laboratorio CD201, durante la realización de este proyecto, hasta la puesta en marcha del prototipo. El valor máximo registrado fue de 26°C, el cual se asignó como  $T_a$ . La  $R\theta_{ja}$  del triac BTA06 es de 60°C/W (consultar datasheet). La temperatura de unión del triac es:

$$T_j = 26^{\circ}C + 0.3188W * \left(60^{\circ}\frac{C}{W}\right)$$

$$T_j = 45.12^{\circ}C$$

Este parámetro se compara luego con su temperatura de unión máxima ( $T_{jmax}=125^{\circ}C$ ); se establece un criterio para decidir si el triac requiere o no disipador de calor. Este es:

$$\frac{T_j}{T_{jmax}} < 0.5 \rightarrow \text{El triac no requiere disipador de calor}$$

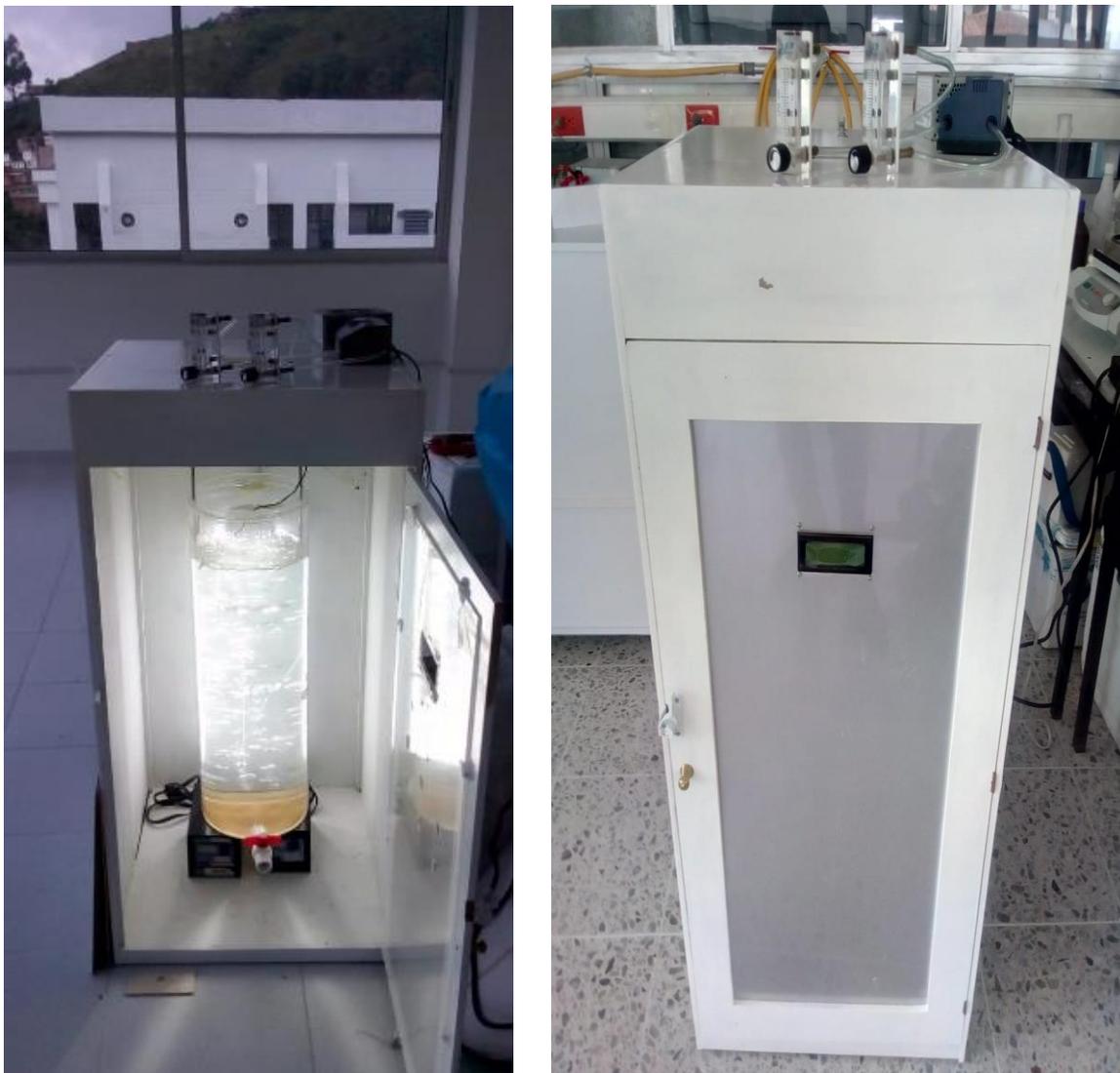
$$\dot{¿} \frac{45.12^{\circ}\text{C}}{125^{\circ}\text{C}} < 0.5?$$

$$\dot{¿} 0.360 < 0.5? \rightarrow \text{Si Cumple con la condición}$$

Por lo tanto, el Triac no requiere disipador de calor.

## 5 Resultados

### 5.1 Resultado estructural del prototipo



*Ilustración 45 Estructura física del prototipo [5]*

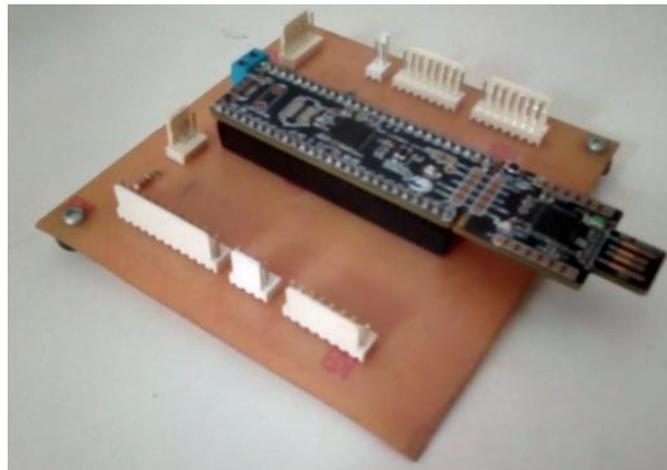
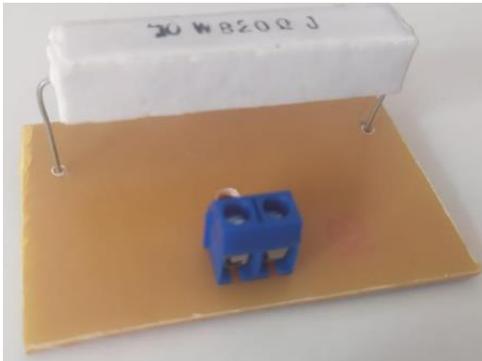
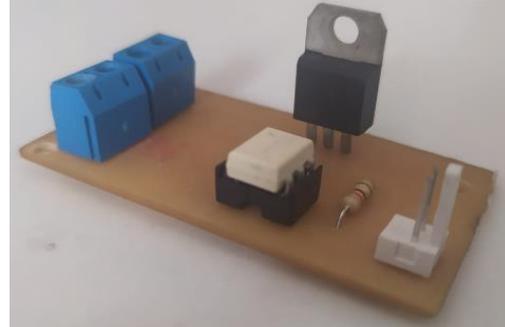
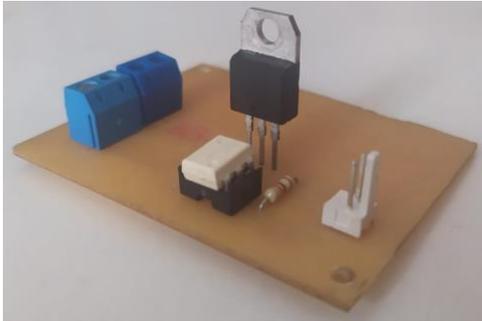
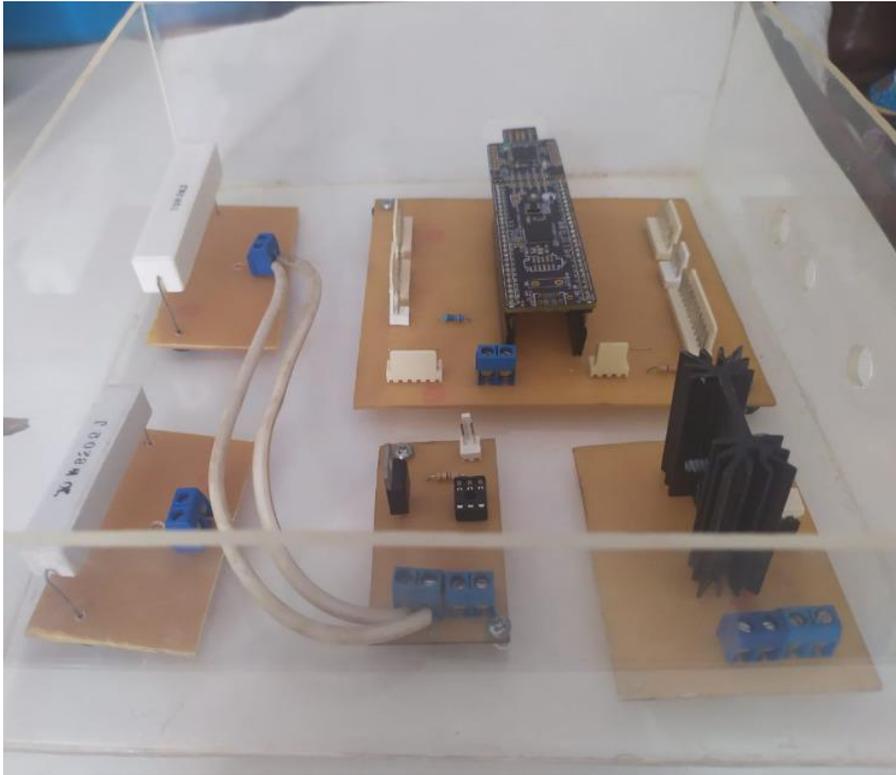


Ilustración 46 Tarjetas de control y potencia [5]



*Ilustración 47 Caja de protección de las tarjetas de control y potencia. [5]*

Para la referente a la parte procedimental relacionada al bioproceso se tuvieron en cuenta los siguientes pasos:

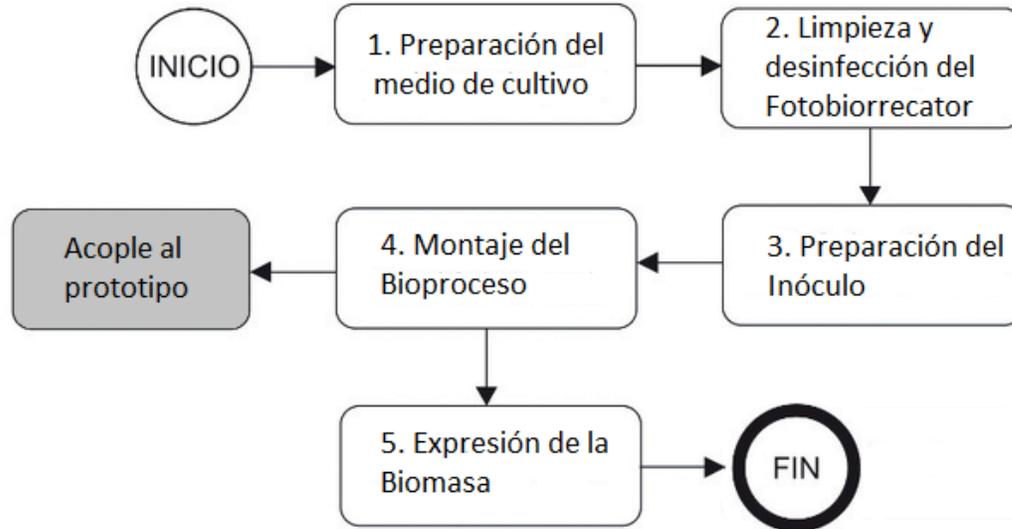


Ilustración 48 Sinopsis procedimental [5]

1. Preparación del medio de cultivo. Se prepararon 40 litros del medio de cultivo Bold's según la referencia bibliográfica
2. Limpieza y desinfección del Fotobiorreactor airlift. Se realiza un lavado con jabón y posteriormente se realiza desinfección con una solución de hipoclorito 500 ppm
3. Preparación del Inóculo de la microalga. Se cultiva la microalga *Scenedesmus* spp (aislada de un ecosistema alto andino del Departamento Norte de Santander) en el medio Bold's hasta obtener un inóculo robusto.
4. Montaje del Bioproceso. Se parte de un trabajo previo en el cual se habían definido mediante un diseño experimental las siguientes condiciones de trabajo aireación 2,1 LPM, fotoperiodo 18:06 h luz: oscuridad e intensidad luminosa de 4000 lux. Se dispone de 20 litros

de medio en cada uno de los dos fotobiorreactores: A: bajo condiciones de laboratorio y B: Automatizado. Se deposita un inóculo de 2 litros en cada uno de los fotobiorreactores. Se toma una muestra inicial y se continúa con estas mediciones cada dos días durante 20 días. Se realizan las respectivas gráficas de la biomasa producida en cada uno de los biorreactores.

5. Expresión de la Biomasa obtenida en mg. Se realizan las respectivas gráficas de la biomasa producida en cada uno de los biorreactores.

## **5.2 Validación del proyecto**

Para la validación del prototipo de temperatura, se decide realizar un seguimiento de crecimiento a través de la medición del peso seco, para este procedimiento se debe realizar una toma de muestras de la producción de la biomasa microalgal cada dos días, y se tomaron fotos para evidenciar el progreso de la misma, en donde se evidencia en los pares ordenados por día, que en el lado izquierdo se encuentra el fotobiorreactor que no cuenta con condiciones de control y en el lado derecho se encuentra el fotobiorreactor que cuenta con las condiciones de control.



DIA 1



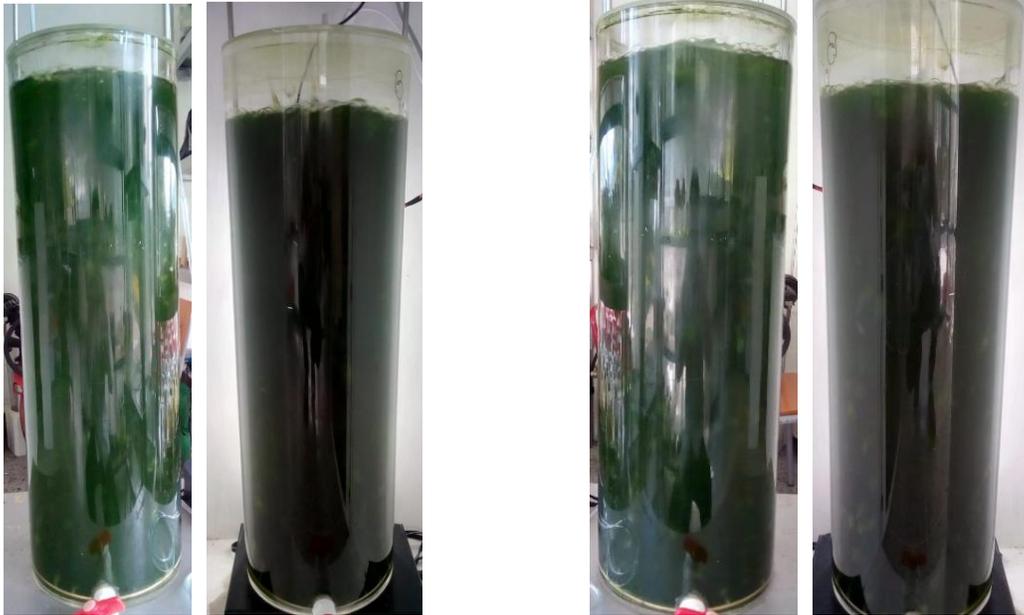
DIA 5



DIA 10



DIA 15



DIA 20

DIA 25

De las tomas de muestra se obtienen los siguientes resultados de la producción de biomasa microalgal expresada en miligramos (mg) a partir del inicio del proyecto:

Día	Biomasa mg/L	
	FBR A	FBR B
1	275,955	271,59
3	376,35	537,855
5	507,3	991,815
7	625,155	1345,38
9	673,17	1607,28
11	869,595	2218,38
13	1048,56	2715,99

15	1166,415	3025,905
17	1310,46	3353,28
19	1432,68	3637,005
21	1528,71	3898,905
23	1882,275	4073,505
25	1991,4	4274,295
27	2253,3	4501,275

Tabla 11 . Cantidad en miligramos de biomasa microalgal de los fotobiorreactores sin control (A), y con control (B). [5]

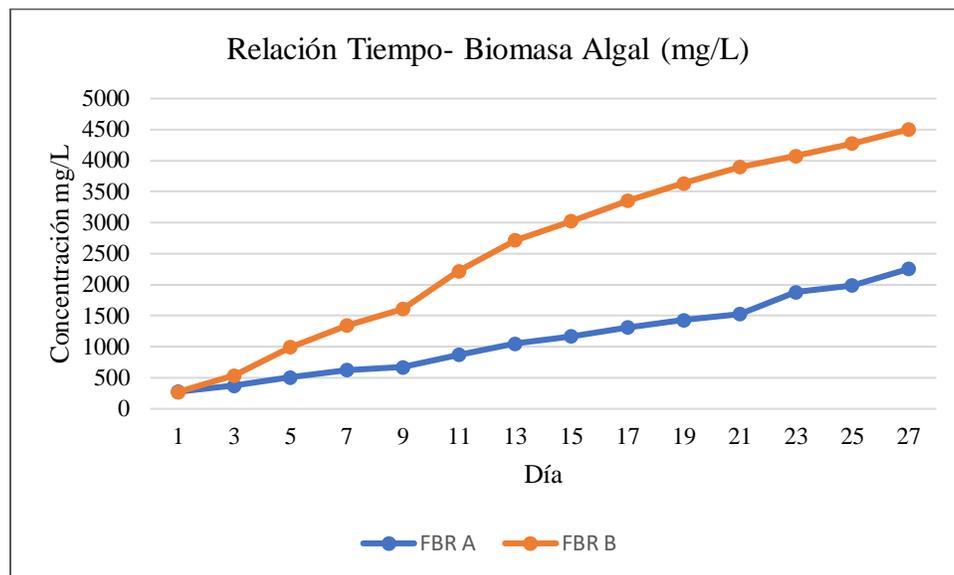


Ilustración 49 Gráfica Biomasa(mg) vs Tiempo [5]

En base a la tabla 11, se puede observar como en el fotobiorreactor B (Automatizado), se logra obtener un 199.76% más de biomasa microalgal en comparación con el fotobiorreactor A (bajo condiciones de laboratorio).

## 6 Conclusiones

- Se puede evidenciar que la selección de parámetro del prototipo, las cuales fueron, el flujo de aireación y agitación a 2.1 LPM, cantidad de unidades lux de 4000 lux, y una temperatura controlada en  $29\pm 1$  °C, lograron optimizar el crecimiento de la biomasa microalgal de una forma efectiva, entendiendo de esta forma que el prototipo cumple a cabalidad con los requerimientos planteados.
- Con base en los resultados obtenidos el sistema implementado logró significativos incrementos de biomasa microalgal con respecto a la obtenida con las condiciones ambientales del laboratorio (2,3 Kgr/L y 4,5 Kgr/L, respectivamente) Lo anterior muy seguramente se reflejará favorablemente en la disminución de los costos de producción
- Es indispensable recalcar que los resultados obtenidos servirán de soporte para realizar proyectos a mayor escala y para la obtención de metabolitos de interés como carotenoides y ácidos grasos, entre otros.

## **7 Recomendaciones y trabajos futuros**

1. Contemplar las diferentes variables que influyen el bioproceso buscando de esta forma dar un ambiente mucho más adecuado para el mismo.
2. Realizar estudios de costo beneficio sobre la elaboración de la biomasa microalgal.

## 8 Anexos

### MAXIMUM RATINGS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Rating	Symbol	Value	Unit
--------	--------	-------	------

### INFRARED EMITTING DIODE

Reverse Voltage	$V_R$	3	Volts
Forward Current — Continuous	$I_F$	60	mA
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Negligible Power in Triac Driver Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	100	mW
		1.33	mW/°C

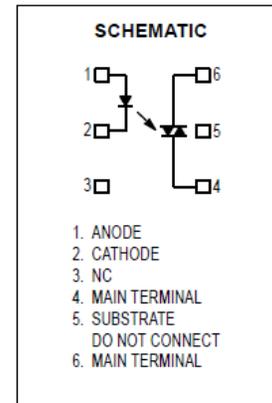
### OUTPUT DRIVER

Off-State Output Terminal Voltage	$V_{DRM}$	400	Volts
Peak Repetitive Surge Current (PW = 1 ms, 120 pps)	$I_{TSM}$	1	A
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	300	mW
		4	mW/°C

### TOTAL DEVICE

Isolation Surge Voltage <sup>(1)</sup> (Peak ac Voltage, 60 Hz, 1 Second Duration)	$V_{ISO}$	7500	Vac(pk)
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	330	mW
		4.4	mW/°C
Junction Temperature Range	$T_J$	-40 to +100	°C
Ambient Operating Temperature Range	$T_A$	-40 to +85	°C
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-40 to +150	°C
Soldering Temperature (10 s)	$T_L$	260	°C

1. Isolation surge voltage,  $V_{ISO}$ , is an internal device dielectric breakdown rating.  
For this test, Pins 1 and 2 are common, and Pins 4, 5 and 6 are common.



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

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

Ilustración 5152 Datasheet BT06 [31]

Table 3. Standard (4 quadrants)

Symbol	Parameter	Quadrant		BTA08/BTB08		Unit
				C	B	
$I_{GT}^{(1)}$	$V_D = 12\text{ V}, R_L = 33\ \Omega$	I - II - III	Max.	25	50	mA
		IV		50	100	
$V_{GT}$		All	Max.	1.3		V
$V_{GD}$	$V_D = V_{DRM}, R_L = 33\ \text{k}\Omega, T_J = 125\ ^\circ\text{C}$	All	Min.	0.2		V
$I_H^{(2)}$	$I_T = 500\ \text{mA}$	I - II - III	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/ $\mu\text{s}$
$(dv/dt)_c^{(2)}$	$(di/dt)_c = 3.5\ \text{A/ms}, T_J = 125\ ^\circ\text{C}$		Min.	5	10	V/ $\mu\text{s}$

1. Minimum  $I_{GT}$  is guaranteed at 5 % of  $I_{GT}$  max.
2. For both polarities of A2 referenced to A1

Table 4. Static electrical characteristics

Symbol	Test conditions		Value	Unit	
$V_{TM}^{(1)}$	$I_{TM} = 11\ \text{A}, t_p = 380\ \mu\text{s}$	$T_J = 25\ ^\circ\text{C}$	Max.	1.55	V
$V_{TO}^{(1)}$	threshold on-state voltage	$T_J = 125\ ^\circ\text{C}$	Max.	0.85	V
$R_D^{(1)}$	Dynamic resistance	$T_J = 125\ ^\circ\text{C}$	Max.	50	m $\Omega$
$I_{ORM} I_{RRM}$	$V_{DRM} = V_{RRM}$	$T_J = 25\ ^\circ\text{C}$	Max.	5	$\mu\text{A}$
		$T_J = 125\ ^\circ\text{C}$	Max.	1	mA

1. For both polarities of A2 referenced to A1

Table 5. Thermal resistance

Symbol	Parameter		Value	Unit		
$R_{\theta(j-c)}$	Max. junction to case thermal resistance (AC)		IPAK / D2PAK / DPAK / TO-220AB	1.6	$^\circ\text{C/W}$	
			TO-220AB Insulated	2.5		
$R_{\theta(j-a)}$	Junction to ambient (typ.)	$S = 2\ \text{cm}^2^{(1)}$	D <sup>2</sup> PAK	45	$^\circ\text{C/W}$	
		$S = 1\ \text{cm}^2^{(1)}$	DPAK	70		
	Junction to ambient (typ.)			TO-220AB / TO-220AB Insulated		60
				IPAK		100

1. S = Copper surface under tab.

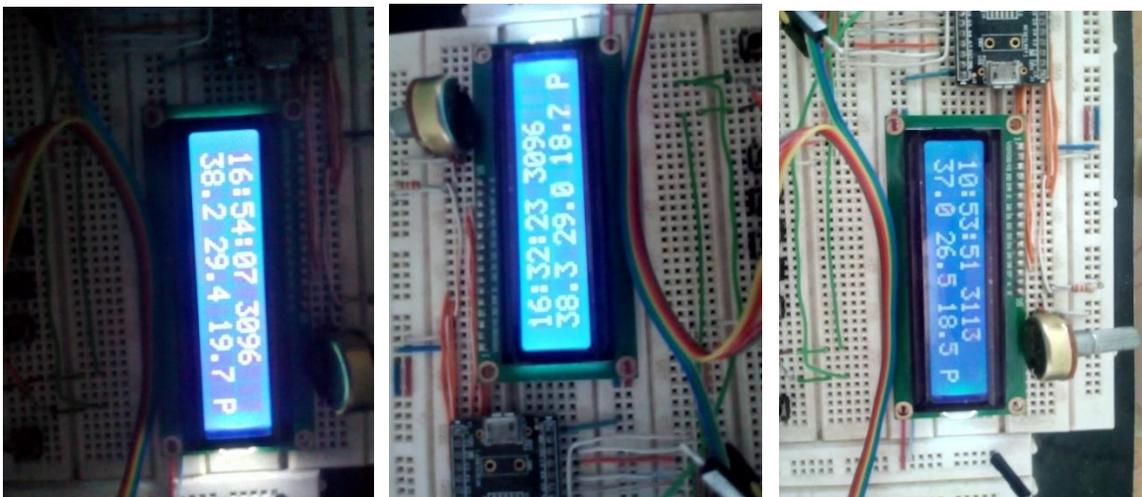
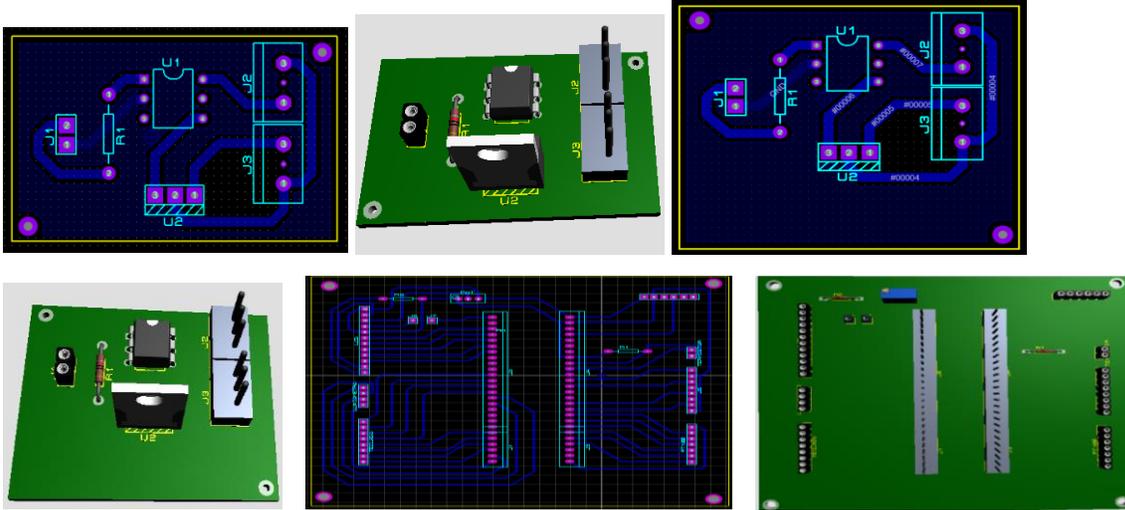
Ilustración [5253](#) Datasheet BT08 [32]



Ilustración 5354 Algunos de los equipos utilizados en el proceso. [8]



Ilustración 5455 Algunos de los procedimientos realizados en el proceso [8]



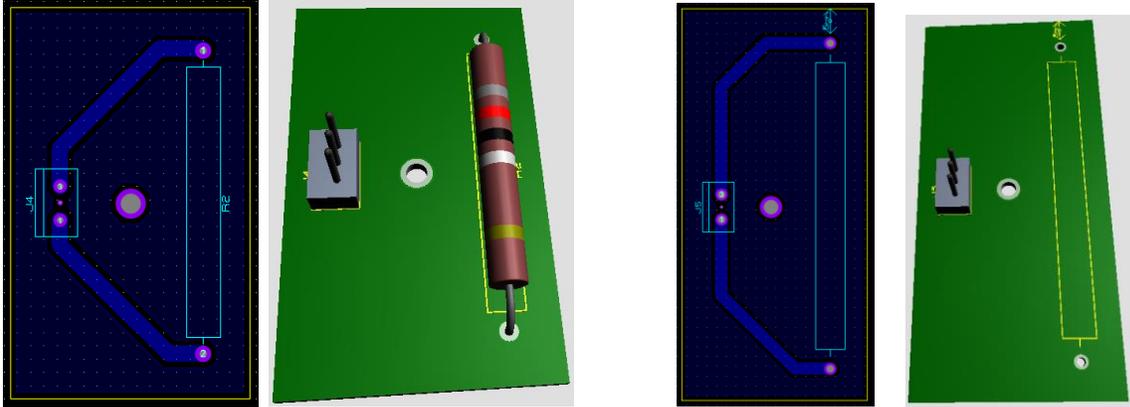


Ilustración 5556 Resultados de algunos de los procedimientos referentes a electrónica. [5]

## 9 Bibliografía.

- [1] R. Gonzalez-Castellanos, “Introducción a los Bioprocesos,” 2018, no. Actualizada, p. 5, [Online]. Available: file:///C:/Users/delia/Downloads/Introducción a Bioprocesos (act. 09-06-2018).pdf.
- [2] Benavente, Montañez, Aguilar, Méndez, and Valdivia, “Tecnología De Cultivo De Microalgas En Fotobiorreactores,” *Rev. Científica la Univ. Autónoma Coahuila*, vol. 4, no. 7, p. 12, 2012.
- [3] T. H. Mehlitz, “Temperature Influence and Heat Management Requirements of Microalgae Cultivation in Photobioreactors in Agriculture, with Specialization in: Agricultural Engineering Technology,” 2009.
- [4] A. P. Koller, L. Wolf, T. Brück, and D. Weuster-Botz, “Studies on the scale-up of biomass production with *Scenedesmus* spp. in flat-plate gas-lift photobioreactors,” *Bioprocess Biosyst. Eng.*, vol. 41, no. 2, pp. 213–220, 2018, doi: 10.1007/s00449-017-1859-y.
- [5] “Elaboración propia.” .
- [6] J. Fernandez, “Ingeniería de Procesos aplicada a la Biotecnología de Microalgas,” *Universidad de Almería*, 2014.  
<https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1->

microalgas.html.

- [7] H. Nanduca, “Utilización de aguamiel de café y melaza en aguas residual sintética en el cultivo de la microalga *Scenedesmus* sp. para la producción de lípidos,” 2015.
- [8] “Protocolo establecido por Laboratorio.” .
- [9] M. Fernández, “Diseño , montaje y caracterización de fotobiorreactores airlift para el cultivo de la microalga *Chlorella sorokiniana*,” 2013.
- [10] H. Lores, “Estudio a escala piloto del efecto de diferentes condiciones de operación sobre la eliminación de nutrientes en un cultivo de microalgas,” 2015.
- [11] N. I. of G. M. Sciences, “Hola Informativa Sobre Los Ritmos Circadianos,” pp. 1–3, 2017.
- [12] S. Gomáriz, B. Domingo, J. Matas, and M. Reyes, *Teoría de control*, vol. 5, no. 1. 2017.
- [13] Lifelong Learning, “Ingeniería de los sistemas embebidos.,” *Ind. Syst. engineering*, pp. 1–19, 2011.
- [14] L. Ramanna, I. Rawat, and F. Bux, “Light enhancement strategies improve microalgal biomass productivity,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, no. June 2016, pp. 765–773, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.202.



real/reloj-de-tiempo-real-rtc-reloj-tiempo-real-relojes-de-tiempo-real-rtcs-ds1307-dfrobot-detail.

- [23] Mactronica, “No Title.” <https://www.mactronica.com.co/termistor-sensor-de-temperatura-ntc-10k>.
- [24] Homecenter, “No Title.” <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/376026/calentador-portatil-handy-heater-calefaccion>.
- [25] Cypress Semiconductor, “No Title.” <https://www.cypress.com/documentation/development-kitsboards/cy8ckit-059-psoc-5lp-prototyping-kit-onboard-programmer-and>.
- [26] A. e I. I. Dpto. Electrónica, “Análisis en el dominio del tiempo de sistemas de primer y segundo orden,” pp. 129–158.
- [27] W. Bolton, *MECATRÓNICA SISTEMAS DE CONTROL ELECTRÓNICO EN LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA*, 5a Edición. México.
- [28] Cypress Semiconductor, “Thermistor Calculator Features Input / Output Connections,” pp. 1–10, 2014.
- [29] J. Ospino, “Electrónica de potencia.” EEST, 2016.
- [30] Fairchild Semiconductor, “6-Pin DIP Random-Phase Optoisolators Triac Driver

Output MOC3021,” *Test*, pp. 1–7, 1995.

[31] STMicroelectronics, “BTA06 and BTB06 Series,” *Order A J. Theory Ordered Sets Its Appl.*, pp. 2–7.

[32] STMicroelectronics, “Bta08, btb08, t810 t835, t850,” no. August, 2018.