

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO PARA UN
EXPERIMENTO SOBRE EL CRECIMIENTO
MICROBIANO EN EL SATÉLITE
PUCP-SAT 4X**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR:

Camilo Emmanuel Miranda Llanos

ASESOR:

Jorge Arturo Heraud Pérez

Lima, octubre, 2024

Informe de Similitud

Yo, Jorge Arturo HERAUD Pérez, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la Tesis/el trabajo de investigación titulado


“DISEÑO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO PARA UN
EXPERIMENTO SOBRE EL CRECIMIENTO MICROBIANO
EN EL SATÉLITE PUCP-SAT 4X”

Del autor: Camilo Emmanuel MIRANDA Llanos

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 11 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 24 de septiembre, 2024. Creo importante aclarar que éste índice incluye una gran cantidad de palabras de uso general, como nombre de conocidas universidades, frases coloquiales y otras de uso común que en nada tienen que ver con plagio, uso indebido de conocimiento de terceros o publicaciones, por lo que el 11% indicado resulta ser una exageración no atribuible al alumno autor de la Tesis.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 21 de octubre, 2024.

Apellidos y nombres del asesor: HERAUD Pérez, Jorge Arturo	
<u>Paterno Materno, Nombre1 Nombre 2</u>	
DNI: 07833101+	Firma 
ORCID: 0000-0002-2863-7543	

RESUMEN

Esta investigación tiene como justificación la necesidad de comprender los efectos de las condiciones extremas del espacio exterior en el crecimiento de microorganismos, apoyándose en la electrónica y la espectrofotometría como herramientas principales de medición y adquisición de datos. El objetivo del presente trabajo es diseñar un sistema electrónico que sirva como soporte a un experimento biológico a desarrollarse en el picosatélite ThinSAT a 200km de altura, permitiendo monitorear el crecimiento del microorganismo *Saccharomyces Cerevisiae* expuesto a las condiciones extremas del espacio, obteniendo datos de densidad poblacional de la levadura, temperatura y humedad. Dichos datos permiten observar el desarrollo del microorganismo, tras el envío de dichos datos a Tierra para su procesamiento, interpretación y análisis, donde se compara con un experimento gemelo desarrollado en condiciones terrestres que permite apreciar los efectos del espacio exterior en su ciclo de vida.

Con este trabajo se contribuye no solo al diseño de un prototipo viable para futuros trabajos biológicos en el espacio, sino que también se abre las puertas a nuevas oportunidades de investigación y experimentos con distintas condiciones de prueba y distintos microorganismos, en especial los enfocados a cultivos peruanos. Los resultados de este trabajo aportan al estado del arte de herramientas alternativas de medición, brindando un conocimiento que puede ser crucial en la exploración espacial y la comprensión de la vida en entornos extremos.

A mi madre, Trudy Llanos, cantante y enfermera de vocación, por todo su esfuerzo y enseñarme que “Pan que no se lucha, se come con vergüenza”.

A mi padre, Hernán Miranda, escritor y abogado de vocación, que en paz descansa, por apoyarme junto a mi madre y ser ejemplo de perseverancia.

Al Dr. Jorge Heraud, mi asesor, por todo su apoyo, confianza y sabiduría, que, en tantas conversaciones y reflexiones más allá de la tesis, me dio lecciones de vida.

Y agradezco especialmente a la Dra. Sayda Mujica, que en paz descansa, bióloga y co-asesora de este proyecto, por su constante apoyo y entusiasmo por terminarlo.

ÍNDICE GENERAL

1	CAPÍTULO 1: LA INGENIERÍA ESPACIAL AL SERVICIO DE LAS CIENCIAS DE LA VIDA.....	8
1.1	Problemática	8
1.2	Estado del arte	9
1.2.1	El CubeSat	9
1.2.2	El Gene-Sat.....	10
1.2.3	El Pharma-Sat.....	10
1.2.4	Investigación en la PUCP.....	11
1.3	Justificación de la propuesta de estudio.....	13
1.4	Objetivos	14
1.4.1	Objetivo General:.....	14
1.4.2	Objetivos específicos:	14
2	CAPÍTULO 2: SOPORTES DESDE LA ELECTRÓNICA, LAS CIENCIAS ESPACIALES Y CIENCIAS DE LA VIDA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA CARGA ÚTIL Y EL DESARROLLO DEL EXPERIMENTO	15
2.1	El ThinSat.....	15
2.1.1	Fases del programa	15
2.1.2	Análisis de la información del ThinSat	16
2.1.3	Dimensiones físicas del ThinSat	16
2.1.4	Energía	17
2.1.5	Características eléctricas y funcionales	18
2.1.6	Programación del ThinSat	18
2.1.7	Sensores.....	19
2.1.8	Comunicación.....	20
2.2	Fundamentos para la carga útil	21
2.2.1	El microorganismo a enviar: <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	21
2.2.2	Medición del crecimiento de las levaduras: Espectrofotometría	24
2.2.3	Modelamiento matemático del crecimiento microbiano.....	27
3	CAPÍTULO 3: DISEÑO DE LA CARGA ÚTIL	30
3.1	Descripción del diseño propuesto	30

3.2	Aplicación de la longitud de onda del haz de luz	32
3.2.1	Experimento en laboratorio	33
3.3	Componentes electrónicos	36
3.3.1	Fuente de Luz	36
3.3.2	Sensor de Luz	39
3.3.3	Sensor de temperatura y humedad	41
3.4	Paquete de datos a transmitir	44
3.5	Programación del microcontrolador para un experimento autónomo	45
3.6	Análisis de datos	49
3.6.1	Del Sensor de Luz	49
3.6.2	Del Sensor de Temperatura y humedad	50
3.6.3	Modelamiento matemático	51
3.7	Prototipos de prueba	52
3.7.1	Primer prototipo	52
3.7.2	Segundo prototipo	53
4	CAPITULO 4: ENSAYOS Y RESULTADOS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA	55
4.1	Programa de funcionamiento autónomo.	55
4.2	Datos medidos con el espectrofotómetro	56
4.3	Pruebas similares con condiciones diferentes	61
4.4	Balance Energético De Componentes.....	65
4.5	Etapas de comunicaciones	66
5	CONCLUSIONES	67
6	RECOMENDACIONES	68
7	TRABAJOS FUTUROS	68
8	BIBLIOGRAFÍA:.....	69

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Esquemático CubeSat Standard [4].....	10
Figura 2. Imagen obtenida con el diseño de César Vilcherrez (A) vs. microscopio óptico 100x (B) [8].....	13
Figura 3. Bosquejo de una unidad del ThinSat [9]	17
Figura 4. Dispositivo Testing Adapter y conector FTDI	19
Figura 5. Envío serial de la información de la carga útil en el ThinSat.....	21
Figura 6. Observación de levaduras vivas por microscopía óptica [13].....	22
Figura 7. Ciclo de crecimiento de levaduras [20].....	25
Figura 8. Disminución de la luz al atravesar una sustancia.....	25
Figura 9. A) Modelo de Gompertz para crecimiento de <i>Saccharomyces Cerevisiae</i> en caldo melaza + lactosuero [18].....	29
Figura 10. Diagrama de bloques de la conversión de los datos del espectrofotómetro.	31
Figura 11. Diagrama de bloques de obtención de resultados	32
Figura 12. Diagrama de bloques de las Etapas del Proyecto en su totalidad	32
Figura 13. Espectro visible de la luz que puede percibir el ojo humano. [27].....	33
Figura 14. A la izquierda, frasco de dextrosa utilizada. A la derecha, composición química de la dextrosa.	34
Figura 15. Papa de variedad Yungay, pelada y picada.	35
Figura 16. Proceso de obtención de caldo de cultivo a base de papa y dextrosa.	35
Figura 17. Curva de intensidad luminosa vs. corriente directa en el LED de código 150060AS75020 seleccionado [28].....	38
Figura 18. Circuito básico de fuente de luz con corriente limitada.	38
Figura 19. Respuesta Espectral del Sensor de AVAGO (izquierda) y EVERLIGHT (derecha).	39
Figura 20. Diagrama esquemático del circuito electrónico para el fototransistor.	40
Figura 21. Curva electro-óptica de Corriente de luz vs. Iluminancia [30].....	41
Figura 22. A la izquierda, dimensiones del sensor de temperatura y humedad Sensirion SHT15. A la derecha, circuito típico de conexión a microcontrolador [31].	42
Figura 23. Conversión de SORH a humedad relativa [31].....	43
Figura 24. A la izquierda, diagrama de flujo general de la carga útil. A la derecha, diagrama de flujo del proceso de medición de los valores que arrojan los sensores de la carga útil.....	46
Figura 25. A la izquierda, diagrama de flujo del proceso de lectura del sensor de luz. A la derecha, diagrama de flujo del proceso de transmisión al modem del satélite.....	47
Figura 26. Curvas características del efecto de la temperatura en sensor de luz y fuente de luz respectivamente.	51
Figura 27. A la izquierda, primer modelo prototipo. A la derecha, frasco de tinta de impresora color magenta y gotero para simular el aumento de la concentración con la adición de mayor número de gotas.....	52

Figura 28. A la izquierda, valor ADC vs. Concentración de tinta por el número de gotas. A la derecha, valor ADC en el tiempo (ms) para una misma concentración de tinta.....	53
Figura 29. Modelo 3D del contenedor del mini-biorreactor.....	53
Figura 30. Código de calibración del espectrofotómetro	55
Figura 31. Datos de calibración del espectrofotómetro obtenidos con el programa descrito....	56
Figura 32. Prototipo de medición por espectrofotometría	57
Figura 33. Curva ideal de crecimiento de microorganismo, modelada con tinta amarilla.....	59
Figura 34. Medición de concentración de tinta con espectrofotómetro	60
Figura 35. Concentración conocida vs. Concentración hallada	61
Figura 36. Curva de Concentración de tinta AMARILLA vs. Valor de tensión en el Sensor	61
Figura 37. Curva de Concentración de tinta AZUL vs. Valor de tensión en el Sensor.....	62
Figura 38. Curva de Concentración de tinta ROJA vs. Valor de tensión en el Sensor.....	62
Figura 39. Curva de Concentración de tinta Amarilla vs. Valor de tensión en el Sensor.....	63
Figura 40. Concentración conocida vs. Concentración hallada (Tinta Roja).....	64
Figura 41. Curva de respuesta en el tiempo del sensor de luz	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Disposición de pines del conector FTDI.....	19
Tabla 2. Sensores presentes en el TSLPB.....	20
Tabla 3. Posibles fuentes de luz propuestas.....	37
Tabla 4. Posibles sensores de luz propuestos.....	39
Tabla 5. Sensor de temperatura y humedad propuesto.....	42
Tabla 6. Asignación de pines de sensor de temperatura y humedad SHT15.....	43
Tabla 7. Valores medidos por el espectrofotómetro para tinta amarilla	57
Tabla 8. Consumo energético de los componentes electrónicos seleccionados* [32]	65

CAPÍTULO 1:

LA INGENIERÍA ESPACIAL AL SERVICIO DE LAS CIENCIAS DE LA VIDA

1.1 Problemática

En el Instituto de Radioastronomía (INRAS) de la PUCP se viene trabajando en la preparación del entorno autónomo para poder contar con una unidad de investigación y experimentación con microorganismos en el espacio a manera de cargas útiles con experimentos microbiológicos que sean enviados en pequeños satélites (picosatélites, nanosatélites y microsátélites). Estos estudios podrían ser de gran ayuda en campos como la medicina o agricultura, especialmente cultivos originarios del Perú, contribuyendo, por ejemplo, al desarrollo de nuevas técnicas de cultivo de organismos en condiciones diferentes a las terrestres.

Siguiendo con esta línea de investigación en el INRAS, el presente trabajo de tesis busca desarrollar el soporte electrónico para un experimento microbiano, usando espectrofotometría. El experimento tiene la finalidad de registrar el crecimiento microbiano del microorganismo *Saccharomyces Cerevisiae*, por medio de la turbidez que se genera de manera creciente y proporcional a la replicación y crecimiento de esta levadura en un micro-tanque contenedor, a medida que se le suministren los nutrientes para su desarrollo y reproducción. Dicho experimento se pretende realizar a bordo del picosatélite PUCP-SAT 4X, como carga útil a una órbita muy baja, de 200 km de altitud, donde se probarán los efectos de las condiciones extremas del espacio exterior, en el crecimiento del microorganismo. Debido a las condiciones presentes en una órbita de esta altitud, el experimento tendrá una vida útil de únicamente 5 días, durante los cuales se recolectarán los datos del aumento de biomasa como consecuencia de su crecimiento por espectrofotometría; además de la temperatura y humedad del entorno. Por lo que las tareas que este trabajo trae consigo son: el diseño de un sistema autónomo de medición del crecimiento microbiano de un organismo dado; el inicio y término del experimento es otra de las tareas a controlar de manera autónoma; así como la implementación del sistema de comunicaciones que permita el envío de la información

a una estación en Tierra para su posterior análisis e interpretación. A su vez, se realiza el mismo experimento en Tierra, lo cual servirá para comparar los resultados obtenidos. Cabe resaltar que la aplicación de espectrofotometría se lleva a cabo debido a las limitaciones de comunicación presentes en el satélite principal, el cual brinda una baja tasa de transmisión y requiere de datos compactos y ligeros, los cuales son posibles de obtener con pocos bytes de información producto de las lecturas obtenidas con el espectrofotómetro y los sensores.

Otra de las limitaciones es el espacio disponible en el modelo de satélite a usar que es un ThinSat, el mismo que será detallado más adelante en el capítulo 2.

1.2 Estado del arte

Se han realizado los últimos años diversos experimentos o misiones espaciales con plataformas no tripuladas destinadas a la investigación en ciencias de la vida como cargas útiles dentro de diversos tipos de picosatélites modelo "CubeSat". Un hito que marcó a las ciencias en ingeniería espacial es la creación de estos CubeSat, clasificados de esta manera debido a su bajo peso, el cual es menor a 1kg. [1]

1.2.1 El CubeSat

Es un estándar de diseño de picosatélites, propuesto por Robert Twiggs, Director del Laboratorio de Desarrollo de Sistemas Espaciales del Departamento de Aeronáutica y Astronáutica de la Universidad de Stanford [1]. Anteriormente, en 1984, Twiggs planeó diseñar, construir y lanzar un satélite en menos de año y medio, pero debido a que tenía otros proyectos que involucraban otros microsátélites y su elevada complejidad, el plan de Twiggs no se llegó a concluir, por lo que planteó el diseño de satélites de un menor tamaño en forma de cubos de $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, cuya construcción abarca alrededor de un año y tiene un costo aproximado de \$35,000 [2]. Lo que buscaba principalmente Twiggs era resolver el problema de las misiones espaciales tripuladas, las cuales eran costosas y poco prácticas, ya que tiene que pasarse por largos periodos de espera y no se cuenta con facilidad de acceso a los transbordadores espaciales, mucho menos para entidades privadas o universidades, las cuales sí tendrían la posibilidad de interactuar con el espacio exterior a través del uso de satélites más pequeños y menos costosos como los picosatélites.

El primer CubeSat fue desarrollado en el año 2003, en la *Figura 1* se muestra un esquemático del CubeSat Standard [3].

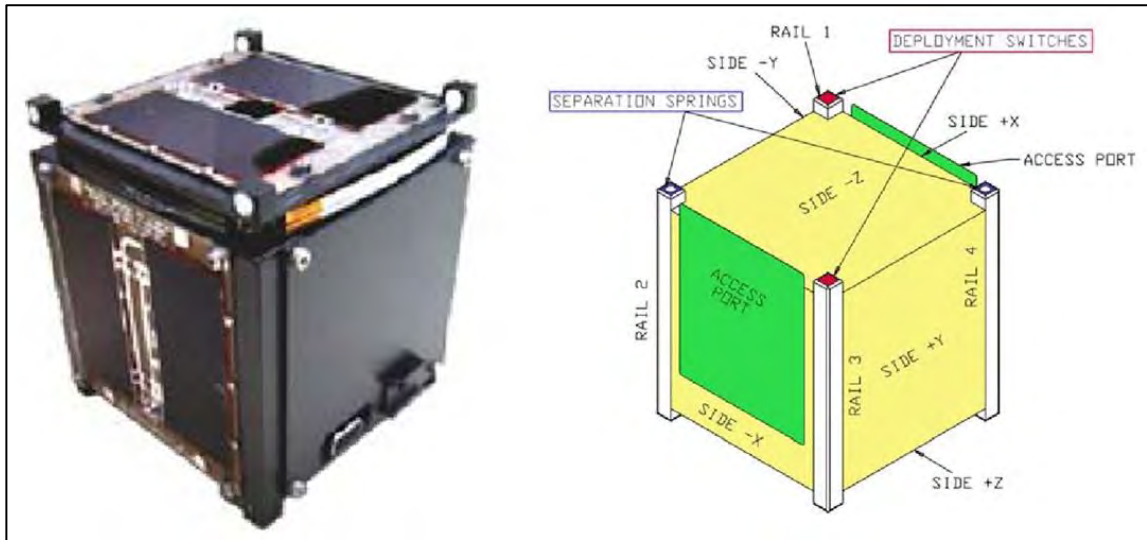


Figura 1. Esquemático CubeSat Standard [4]

1.2.2 El Gene-Sat

Es una misión espacial realizada el 2006 por NASA como una nueva plataforma de investigación astrobiológica en los satélites CubeSat. El Gene-Sat debía estar programado para iniciar el experimento microbiológico automáticamente una vez que entre en órbita baja y sea liberado desde la nave principal, considerando que los microorganismos y los reactivos debían sobrevivir 6 semanas antes de iniciar el experimento y que la transición y comunicación directa desde la base con el satélite sería posible solo unos pocos minutos cada día. [2]

Algo rescatable de esta misión y que se consideró como objetivo, fue que el Gene-Sat fuese autónomo, incluyendo el inicio del experimento, el control de la temperatura, la alimentación de las celdas; así como grabar y enviar toda la información a Tierra. Este trabajo, probó que estos pequeños satélites son capaces de soportar experimentos con microorganismos y ser monitoreados desde Tierra durante su desarrollo.

1.2.3 El Pharma-Sat

Este proyecto constó de un arreglo de 3 CubeSats, cuyo objetivo principal fue estudiar los efectos de la microgravedad sobre la susceptibilidad de un anti-fungicida también en *Saccharomyces cerevisiae* [5]

En este proyecto se usó un agente antimicótico que es frecuentemente usado en el tratamiento de serias infecciones invasivas producidas por hongos que son hallados generalmente en pacientes con inmunodeficiencia, se trata de *Voriconazole*; lo que se buscó fue tener datos de como este agente afectaba a la levadura en dicho ambiente espacial, respecto a una muestra de control en Tierra, a condiciones gravitacionales normales. En este proyecto, todos los elementos del experimento fueron totalmente autónomos y transmitía datos directamente a Tierra; a su vez, contaba con subsistemas de absorción óptica de tres colores, redes de micro fluido, suministro de reactivos, control ambiental en miniatura, y un sistema de gestión de energía. Dicho experimento tuvo una duración de tan solo 96 horas aproximadamente [6].

1.2.4 Investigación en la PUCP

En el Instituto de Radioastronomía INRAS de la Pontificia Universidad Católica del Perú, se han realizado 3 trabajos de relacionados a la investigación y experimentación con microorganismos en el espacio. El principal objetivo de estos trabajos es el de construir el entorno y condiciones de la carga útil capaz de soportar un experimento microbiológico en las condiciones extremas del espacio de manera autónoma, que suministre información confiable a Tierra para la correcta interpretación de los resultados que el experimento arroje y de este modo promover y realizar investigación en Ciencias y Tecnologías Espaciales, que aporten al estudio del comportamiento de un ser vivo relacionado a los cultivos nativos del Perú.

1.2.4.1 Primeros estudios para el diseño de la carga útil que permita un experimento microbiológico

El trabajo “*Diseño de un sistema de monitoreo para un experimento de microbiología en un picosatélite*” [2], desarrollado por Erick Gonzales, logró identificar los componentes necesarios para llevar a cabo este experimento bajo las condiciones extremas del espacio, diseñó un sub-sistema para el control del inicio del experimento utilizando una microválvula, con una cámara fotográfica, iluminación artificial y un lente que aseguraba la correcta visualización de manera uniforme. El diseño también comprendió un sub-sistema de monitoreo de temperatura y humedad relativa; este prototipo resultó ser muy grande para el espacio que se permitía en el PUCP-SAT1.

1.2.4.2 Esfuerzos por lograr visualizar las imágenes de los experimentos

El trabajo desarrollado por Álvaro Bueno se enfocaba en obtener un registro digital de un microorganismo por medio de imágenes durante el desarrollo de un experimento bajo condiciones de micro-gravedad en órbita terrestre [7]. Su diseño se basa en el uso de un sensor de imágenes que realiza la captura de la sombra de un objeto cada vez que los puntos de iluminación sean activados, con el método de barrido de microscopía de perspectiva de sub-píxel, para de ese modo se obtenga la figura del objeto que genera la sombra de dicha luz. Con el diseño propuesto, se buscó obtener una imagen con resolución similar a la obtenida por un microscopio convencional.

Entre las ventajas que presenta el diseño de Bueno, se tiene que no requiere de lentes para el enfoque, al trabajar con las sustancias expuestas de manera directa a la superficie del sensor de imágenes, con únicamente una capa transparente que lo protegía de la corrosión llamada “capa de pasivación”. Otra ventaja de este método es que se logra detalles microscópicos en la imagen, alcanzando una resolución aproximada de 15.63 micrómetros. La desventaja es la complejidad del método, que a su vez requiere de un posterior procesamiento de imágenes.

Respecto al trabajo que aquí se presenta, el espacio reservado para el experimento en éste sistema de toma de fotos es de un cubo de 5 cm de arista, por lo que dicho prototipo calza con las dimensiones de un CubeSat, mas no con el ThinSat que se propone en el presente trabajo ya que sus dimensiones son aún más limitadas.

1.2.4.3 Avances en el sistema de toma de imágenes.

El trabajo “*Diseño de un sistema de registro de imágenes usando microscopía de barrido de perspectiva de sub-píxel (spsm) para ensayos con microorganismos en órbita*” [8], desarrollado por César Vilcherrez, propone un diseño óptimo de adquisición de imágenes para un experimento de microbiología en el espacio, . El diseño propuesto es bastante similar al de su predecesor Bueno [7], pues consta de un sensor de imagen, la iluminación, el microcontrolador pero adicionalmente se adiciona una memoria Flash externa del tipo FIFO (First-Input-First-Output) AL422B para la adquisición de una imagen con una resolución de 192K píxeles como máximo, usando además un algoritmo de súper-resolución para la construcción de las imágenes.

A nivel de ensayo del prototipo implementado, se presenta sus resultados con piel de cebolla y alas de insectos, las cuales comparó con un microscopio óptico (100x) obteniendo resultados satisfactorios, en la Figura 2 se compara el resultado de la imagen obtenida con el prototipo de Vilcherrez (B), con la del microscopio óptico (A).

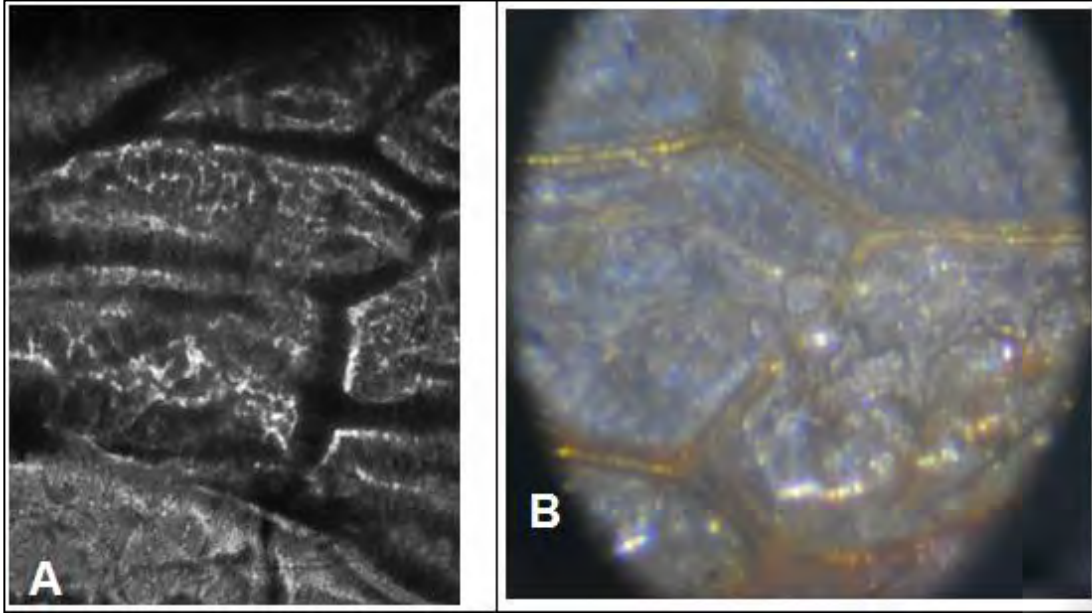


Figura 2. Imagen obtenida con el diseño de César Vilcherrez (A) vs. microscopio óptico 100x (B) [8]

El trabajo que aquí se propone se nutre de las experiencias mencionadas y pretende aportar a un determinado ensayo.

1.3 Justificación de la propuesta de estudio

El trabajo propuesto, está dirigido a la implementación del sistema electrónico para un micro-ensayo de un experimento de astrobiología. Su diseño y prueba de funcionamiento permitirá reconocer y dar respuesta a los elementos y necesidades para de manera autónoma poder hacer experimentos microbiológicos en las condiciones extremas del espacio exterior y captar algunos de los parámetros que nos permita conocer cómo responde un microorganismo a dichas condiciones, especialmente en su crecimiento. Con los datos obtenidos tras este trabajo se podrá contar con un diseño de prototipo muy cercano al que pueda ser usado para el experimento microbiológico que se propone como carga útil en un picosatélite.

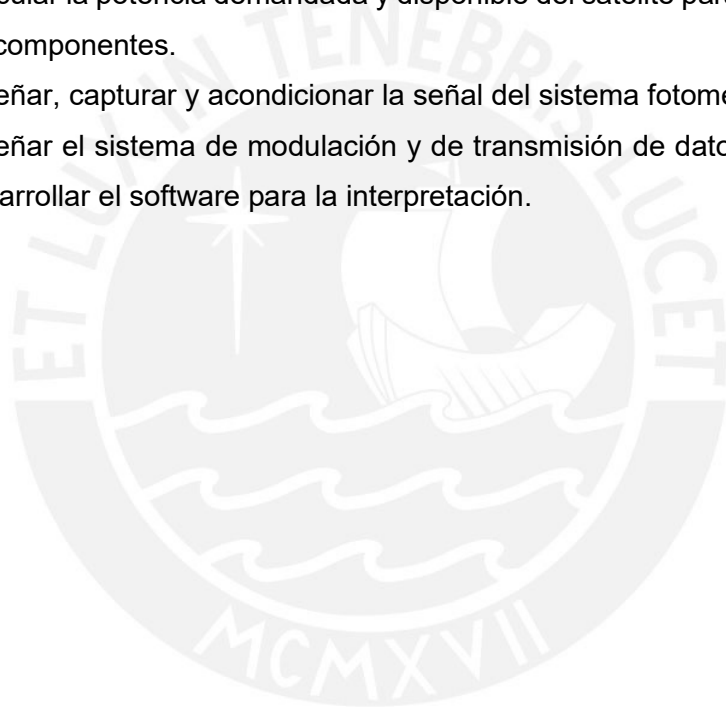
1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general:

Diseño del sistema electrónico, que, de manera autónoma, dé soporte al experimento microbiológico, siendo la medición de la tasa de crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae*, por medio de espectrofotometría, el parámetro biológico a considerar.

1.4.2 Objetivos específicos:

- a) Diseñar el sistema de medición por espectrofotometría de la turbidez que genera el crecimiento microbiano a las longitudes de onda requeridas.
- b) Calcular la potencia demandada y disponible del satélite para la correcta elección de componentes.
- c) Diseñar, capturar y acondicionar la señal del sistema fotométrico.
- d) Diseñar el sistema de modulación y de transmisión de datos a Tierra, así como desarrollar el software para la interpretación.



CAPÍTULO 2:

SOPORTES DESDE LA ELECTRÓNICA, LAS CIENCIAS ESPACIALES Y CIENCIAS DE LA VIDA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA CARGA ÚTIL Y EL DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

2.1 El ThinSat

Se trata de un proyecto liderado por Bob Twiggs, con su compañía Twiggs Space Lab LLC (“TSL”), empresa dedicada a la investigación espacial y a animar a los estudiantes a perseguir intereses en ciencia y tecnología. Junto a TSL, viene asociada la institución Virginia Commercial Space Flight Authority (“VCSFA”), también llamada “Virginia Space”; y la institución NearSpace Launch, Inc., asociados en la creación de un programa de apoyo a estudiantes universitarios y de otras organizaciones en aplicaciones de investigación.

2.1.1 Fases del programa

El programa del proyecto ThinSat consta de tres fases:

a. Fase 1:

Los estudiantes se familiarizan con sensores, fundamentos electrónicos, software, etc., y se les brinda oportunidades de aprendizaje sobre sistemas satelitales e instrumentos de ingeniería relacionada a dicha área. Practican con pequeños satélites o globos que se elevan hasta 4.5km de altitud aproximadamente, donde recolectan información atmosférica para su posterior análisis e interpretación.

b. Fase 2:

Los estudiantes diseñan ahora cargas útiles que serán montadas en globos que se elevarán a una altura de aproximadamente 35km, basándose en un modelo de ingeniería brindado que incluye interfaces eléctricas, conector USB, software para el tipo de satélite llamado “ThinSat”, sensores de velocidad, aceleración y gravedad, y la oportunidad de estudiar los diferentes niveles de atmósfera, con disponibilidad de dicha información de manera directa y en tiempo real.

c. Fase 3:

En esta fase, los estudiantes son responsables de diseñar, construir y probar las cargas útiles que irán en los satélites, así como sus respectivos sensores, todos ellos serán enviados en la misión OA-10. Las cargas son enviadas al TSL por las instituciones responsables, y, por último, los estudiantes se encargarán de analizar la información, crear reportes y presentarlos.

Respecto a la misión OA-10, se trata de un contrato con NASA por medio del cual la institución norteamericana Orbital ATK brinda 28,700kg a la estación espacial internacional (ISS) para 10 misiones, la primera fue completada a inicios del 2014 y la última fue la misión OA-10, con 3,350kg de carga, realizada entre setiembre del 2017 y finales del 2018. Estos lanzamientos llegan a aproximadamente 250km de altura (ELEO, Extreme Low Earth orbit), realizados desde el puerto Mid-Atlantic Regional Spaceport (MARS), instalación de NASA en Virginia, regulada por la autoridad de vuelo espacial comercial conocida como "Virginia Space", con el sistema de lanzamiento ANTARES, utilizando envíos de carga de la aeronave Cygnus, encargada de llevar suministros a la Estación Espacial Internacional.

2.1.2 Análisis de la información del ThinSat

Por medio del portal web de Virginia Space, los estudiantes pueden tener acceso a información en tiempo real en la plataforma llamada "Space Data Dashboard", donde se puede visualizar tableros con los valores de los sensores montados en el satélite lanzado, en tiempo real, o descargar dicha información para ser utilizada en programas analíticos como Excel o Matlab. Adicionalmente, se puede hacer un seguimiento de la ubicación del satélite en órbita, brindando datos de latitud, longitud, altitud, el trayecto recorrido y el que se espera siga recorriendo.

2.1.3 Dimensiones físicas del ThinSat

Tiene un tamaño de 4.5"x4.5"x 5/8", como se puede apreciar en el bosquejo mostrado en la *Figura 3*.

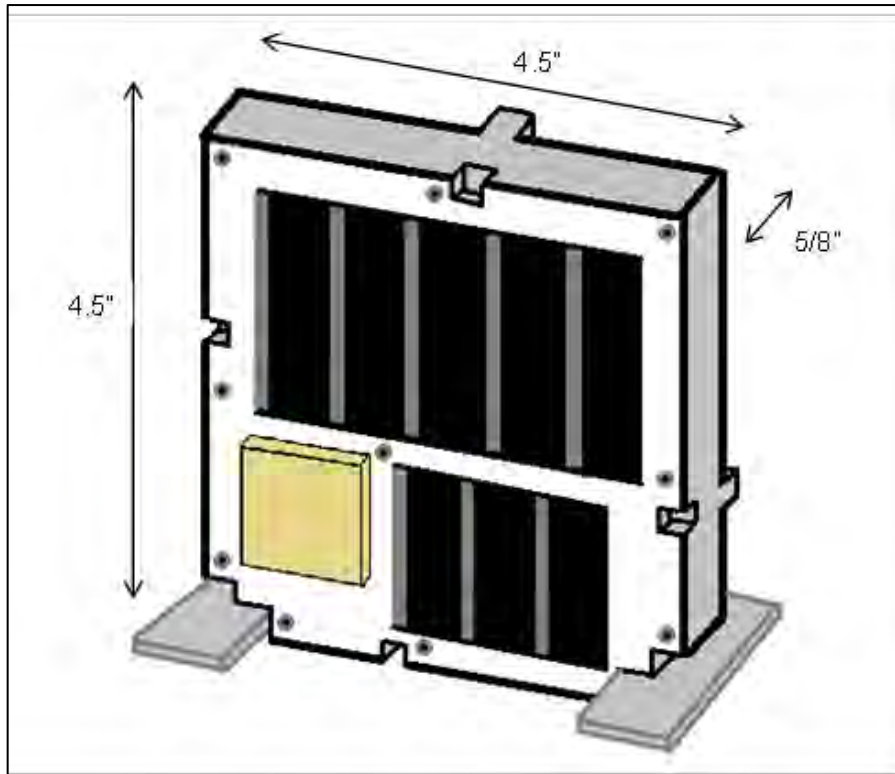


Figura 3. Bosquejo de una unidad del ThinSat [9]

Los ThinSat al ser lanzados a orbita irán montados en Contenedores-Dispensadores (CSD) que llevará un arreglo de 21 ThinSats apilados en 7 sets de 3 ThinSats, los cuales están asegurados al CSD con un riel metálico de 2 pulgadas, el cual unirá 3 ThinSats adyacentes. Dicho riel se aprecia en la parte inferior de la Figura 3 en cada lado. Adicionalmente tendrán 4 pines de alineamiento que los mantendrán unidos entre ellos, uno en cada lado del ThinSat.

Serán separados al ser expulsados del CSD, y a su vez, se desplegarán paneles solares unidos por barras de Nitinol, una aleación de níquel y titanio con la propiedad de regresar a su forma original desplegada (memoria de forma). Estos paneles otorgan el suministro de energía para que los ThinSat vuelen de forma autónoma.

2.1.4 Energía

Se cuenta con una corriente máxima de 200mA, con niveles de tensión de 3.3 V y 5 V; sin embargo, dicha energía proviene de una batería, que suministrará 100mA por cada nivel de tensión presente, por lo que se debe consumir como máximo alrededor de

100mA para evitar acabar la carga de la batería. El tiempo en que la potencia es entregada es de solo 10 minutos por cada hora.

2.1.5 Características eléctricas y funcionales

El ThinSat cuenta con 2 placas, una primaria y otra secundaria que son destinadas a servir como interfaz entre el ThinSat Bus y la carga útil que se envía dentro. La placa primaria es llamada TSLPB (Twiggs Space Lab Primary Board) y cuenta con las siguientes características:

- a) 6 señales analógicas y 2 señales digitales que son enviadas al ThinSat Bus por un conector NSL (NearSpace Launch, Inc.) como salidas análogo-digitales o como paquetes seriales.
- b) 6 sensores digitales y un módulo IMU (acelerómetro, giroscopio y magnetómetro en 3 ejes), los cuales transmiten mediante comunicación serial I²C.
- c) Usa el micro controlador ATmega328P, el cual trabaja con la plataforma Arduino Pro Mini 3.3V y se programa o monitorea mediante un puerto integrado en el ThinSat llamado "Diagnostic Connector". Este micro controlador brinda una comunicación Serial (UART), una EEPROM de 32K x 8Bits, 3 puertos analógicos, una interfaz I²C, y 7 pines de entrada y salida de propósito general que pueden ser usados también para comunicación Serial o SPI.

2.1.6 Programación del ThinSat

Tal como se mencionó en el subtítulo anterior, es posible el monitoreo y programación del TSLPB a través del "Diagnostic Connector", para lo cual se requiere un adaptador FTDI 3.3V para lograr comunicarse con una computadora. Para probar la conectividad del TSLPB con el ThinSat Bus se requerirá un dispositivo TSL Testing Adapter ("TSLTA"), así como el entorno de programación de Arduino IDE. El TSLTA permite también resetear o reiniciar externamente el TSLPB y enviarle señales digitales, como, por ejemplo, interrupciones.

En la Figura 4 se puede apreciar el uso del TSLTA conectado al puerto del Diagnostic Connector para la respectiva programación o monitoreo del TSLPB.

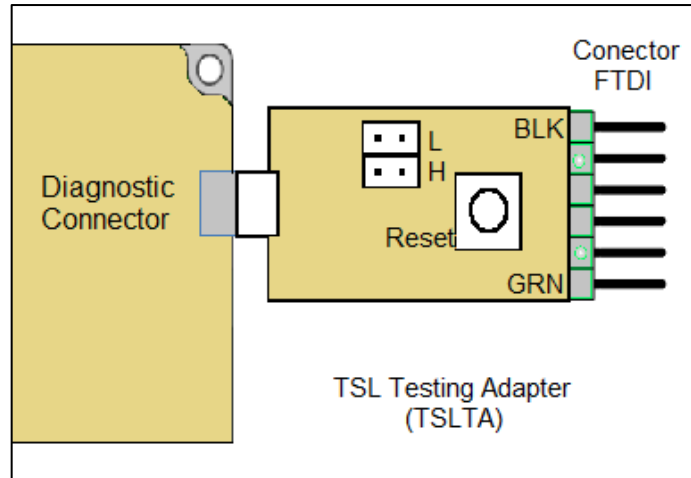


Figura 4. Dispositivo Testing Adapter y conector FTDI

Mediante el conector FTDI se envía las señales del TSLPB a la computadora, para ser monitoreadas por Arduino IDE. La manera de conectar las señales del TSLPB con el FTDI se muestra en la *Tabla 1*. Las señales digitales enviadas a través de los pines L y H serán recibidas por el TSLPB en el puerto D2 del Arduino.

Tabla 1. Disposición de pines del conector FTDI

FTDI	Señal
BLK (1)	GND
2	CTS
3	VCC
4	TXD
5	RXD
GRN (6)	RST

2.1.7 Sensores

El TSLPB, como ya se mencionó al inicio del subcapítulo 2.1.5, cuenta con sensores de señales analógicas, que operan en el rango de 0 a 3.3V. En la *Tabla 2* se puede apreciar de manera más completa todas las señales presentes de dichos sensores, así como su dirección I²C.

Tabla 2. Sensores presentes en el TSLPB

Señal	Sensor	Dirección I ² C
Sensor Solar	SFH2430	NA
Sensor Infrarrojo	TSL260-R-LF-ND	NA
Temperatura interna	TMP336GRTZ	NA
Temperatura externa	TMP336GRTZ	NA
Monitor de corriente	INA169	NA
Monitor de tensión VCC	NA	NA
DT1 (Temperatura)	LM75A	0x4A
DT2 (Temperatura)	LM75A	0x4C
DT3 (Temperatura)	LM75A	0x4D
DT4 (Temperatura)	LM75A	0x48
DT5 (Temperatura)	LM75A	0x49
DT6 (Temperatura)	LM75A	0x4B
Acelerómetro de 3 ejes	MPU-9250	0x69
Giroscopio de 3 ejes	MPU-9250	0x69
Magnetómetro de 3 ejes	MPU-9250	0x69
Temperatura interna del IMU	MPU-9250	0x69

2.1.8 Comunicación

Modos de operación:

a) Plug & Play

Trabaja cuando el TSLPB está conectado directamente al ThinSat Bus y las 6 señales analógicas, antes descritas, son leídas y transmitidas como parte de la transmisión de la nave.

b) Serial

Se maneja una comunicación síncrona con el puerto serial del ThinSat Bus, enviando un paquete de 38 bytes bajo la siguiente distribución:

- 3 bytes de preámbulo (0x 50 50 50)
- 35 bytes de datos de la carga útil

Considerando los siguientes parámetros de configuración:

- Velocidad de transmisión 38.4 Kbps
- 8 bits de datos
- Sin Paridad

- 1 bit de parada

Por último, luego de enviar la señal con los datos deseados de manera serial, se recibe una señal de retorno, que confirma o rechaza el correcto envío del mensaje, lo que vendría a ser la señal ACK, o NAK, según sea el caso.

- Respuesta ACK: 0x AA 05 00
- Respuesta NAK: 0x AA 05 FF

Toda la etapa de transmisión de datos, puede apreciarse de forma gráfica en la *Figura 5*.

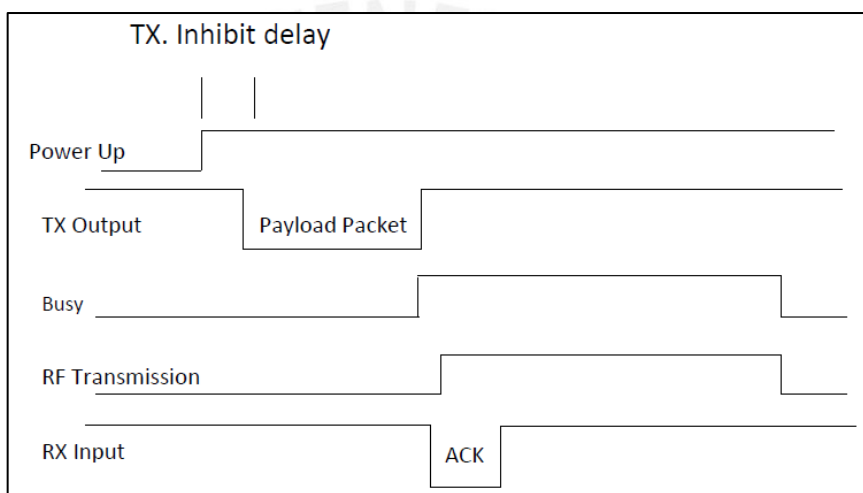


Figura 5. Envío serial de la información de la carga útil en el ThinSat

Fuente: [10]

2.2 Fundamentos para la carga útil

Como se sabe, la carga útil que se enviará en este experimento consta de una muestra biológica, donde se tiene como principal objetivo la medición del crecimiento de un microorganismo sometido a las condiciones extremas del espacio, a la vez de compararlo con un experimento gemelo en tierra, logrando apreciar las diferencias, que puede haber o no, en el crecimiento de un ser vivo microbiano.

2.2.1 El microorganismo a enviar: *Saccharomyces cerevisiae*

Se trata de una levadura, tradicionalmente usada en la preparación del pan, vino y de la cerveza. Es considerada un hongo unicelular e inocuo. Según el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de Cataluña, existen evidencias de su uso en la

producción de bebidas fermentadas en China, Irán y Egipto, desde los años 7000 y 3000 a.C. [11].

2.2.1.1 Propiedades de *Saccharomyces Cerevisiae*

Se optó por utilizar esta levadura en este experimento debido a que es un organismo inocuo y unicelular, además de tratarse de un potente modelo biológico de organismos eucariotas, como lo son también las plantas y animales, lo que significa que sus células contienen un núcleo bien definido, y dentro de éste, el material genético (ADN Y ARN) envuelto en una membrana nuclear, contrario a los organismos procariotas que carecen de ello y son más primitivos. Un detalle particular de este tipo de células es que las eucariotas son bastante más grandes (10-100 μm) que el común las procariotas (0,2-2,0 μm), lo cual es favorable al realizar un análisis cuantitativo. [12].

En la *Figura 6* se puede observar las células de una cepa de esta levadura que fueron captadas por microscopía óptica con contraste por Nomarsky [13] de una cepa de *Saccharomyces cerevisiae*, patentada, que se utiliza para hacer vino Albariño.

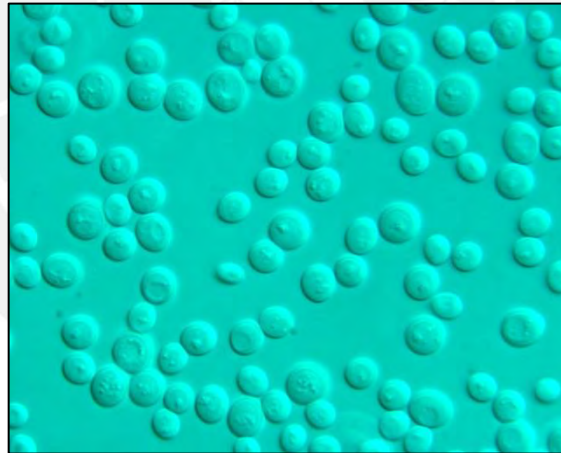


Figura 6. Observación de levaduras vivas por microscopía óptica [13]

2.2.1.2 Uso actual de *Saccharomyces Cerevisiae*

Como ya se mencionó en líneas anteriores, este microorganismo es usado en la elaboración de panes, vinos y cervezas; por otro lado, actualmente este organismo es uno de los más usados en laboratorios, siendo el genoma eucariota mejor conocido [14], tanto en los aspectos estructurales como funcionales, completándose su secuenciación en el año 1996, donde se puede citar lo siguiente de una publicación del Diario español *La Vanguardia* tras este descubrimiento: “Se ha calculado que casi un 50% de los genes

de la levadura son bastante similares a los de los humanos. El estudio del genoma de la levadura contribuirá de distintas formas al proyecto de secuenciación y análisis del genoma humano, permitiendo conocer mejor cuál es la manera en que se configura el cuerpo humano y su fisiología; cual es nuestro pasado evolutivo y de qué forma se produce la enfermedad y el proceso degenerativo del envejecimiento” [15]. Hoy en día esta levadura se ha convertido en la base de determinadas herramientas de laboratorio ampliamente utilizadas y tiene aplicaciones como por ejemplo en la industria farmacéutica, donde se hace uso de cepas de levaduras que expresan genes humanos, para el diseño de nuevos medicamentos.

2.2.1.3 Crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae*

En cuanto a la formación de *Saccharomyces cerevisiae*, se sabe que esta levadura se reproduce tanto sexualmente mediante esporas, como asexualmente por gemación y formación de colonias, siendo su principal alimento los azúcares, descomponiéndolos mediante un proceso conocido como fermentación [16]. La forma en que se reproducirán en el caso del experimento a desarrollar será la asexual, pues se encontrará presente en un ambiente anaeróbico (sin presencia de oxígeno para crecer), y generará alcohol; sin embargo, al aumentar la concentración de este mismo alcohol, las levaduras morirán, finalizando así el proceso de fermentación.

Debido a que la alimentación de estos microorganismos depende principalmente de azúcares, se usa comúnmente el agar de papa y dextrosa (PDA) como medio de cultivo microbiológico de alto contenido de carbohidratos, con un pH que fluctúa entre 5 y 6 [17]. Siguiendo la curva de crecimiento de microorganismos y teniendo como referencia los estudios de la Escuela de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional de Trujillo se estima que este proceso constará de un crecimiento exponencial con una duración de 15 horas aproximadamente, luego de las cuales la tasa de reproducción disminuirá y se mantendrá una biomasa constante por alrededor de 7 horas más, etapa conocida como fase estacionaria, tras lo cual esta disminuirá y habrá culminado el ciclo de vida del organismo. Cabe mencionar que en dicho proceso se usó como sustrato la melaza de caña y suero lácteo, teniendo como medio de cultivo control, jugo de uva suplementado, elementos que brindan también las condiciones necesarias para el crecimiento de levaduras [18].

Entre los factores a considerar para el crecimiento y desarrollo de la levadura está la presión osmótica, evitando medios hipertónicos o hipotónicos que puedan dañar a las células; la temperatura, la cual debería estar óptimamente entre 33°C y 34°C, si es muy superior a ello produciría una disminución de la biomasa y descenso de proteínas, pero de ser muy baja provocaría un estado de latencia; la desecación, que debe ser evitada pues inhibiría el desarrollo; el pH, que debería estar entre 4 y 5 para un ideal crecimiento. Es importante tener presente que el producto de la fermentación, el alcohol, en caso superarse el 8% puede actuar como inhibidor del crecimiento [19].

2.2.2 Medición del crecimiento de las levaduras: Espectrofotometría

Se consideran las siguientes fases Crecimiento de levaduras:

1. Fase de Latencia o Adaptación: al principio no aumenta porque se están adaptando las condiciones del medio en el que se encuentran (pH, nutrientes nivel de azúcares).
2. Fase de Aceleración: Una vez adaptadas, las levaduras empiezan a multiplicarse. Esta fase junto a la anterior puede durar unas 24 horas dependiendo de la temperatura, y finaliza al saturarse con anhídrido carbónico.
3. Fase de Crecimiento Exponencial: La población de levaduras crece exponencialmente. Se desarrollan de 4 a 5 generaciones de levaduras.
4. Fase de Ralentización: La población de levaduras crece lentamente.
5. Fase Estacionaria: Empiezan a faltar nutrientes o algún elemento y las levaduras que mueren son las que mantienen a las nuevas, la población permanece estacionaria.
6. Fase de Declive: La existencia de muchos elementos tóxicos producidos por las propias levaduras conlleva a que la población de levaduras disminuya.

La Figura 7 muestra este crecimiento de manera gráfica.

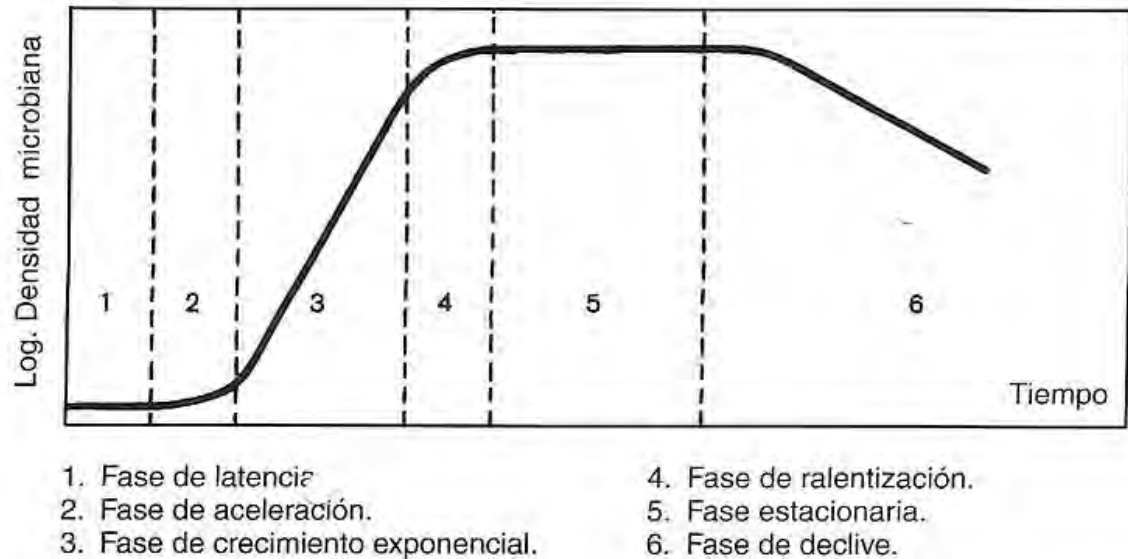


Figura 7. Ciclo de crecimiento de levaduras [20]

Uno de los métodos para la medición de la tasa de crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae*, es el de espectrofotometría, que trata de medir la cantidad de luz que una muestra absorbe cuando un haz de fotones a una determinada longitud de onda la atraviesa, tal como se muestra en la *Figura 8*. Ante esto, primero definimos los principales términos asociados con este concepto, que vendría a ser la transmitancia y absorbancia de la luz [21].

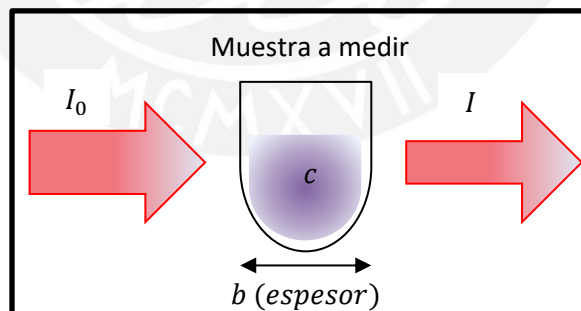


Figura 8. Disminución de la luz al atravesar una sustancia

2.2.2.1 Transmitancia:

Cuando la luz atraviesa una solución homogénea con la muestra a medir, los fotones chocan con las moléculas de dicho elemento, y debido a que tal longitud de onda es sensible a dicho elemento, el haz de luz no logra atravesarlo completamente, sino que algunos fotones son absorbidos por las moléculas. Ya que la luz es absorbida en cierta

parte, se conoce como transmitancia a la relación entre la intensidad luminosa que es transmitida al salir de la muestra, respecto a la que fue incidida sobre ella.

La fórmula de transmitancia sería entonces la mostrada en la ecuación

:

$$T_{\lambda} = \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

Donde:

T_{λ} = Transmitancia de la muestra a una longitud de onda λ

I = Intensidad de luz luego de atravesar la muestra

I_0 = Intensidad de luz antes de atravesar la muestra

Al ser la relación entre dos valores de una misma unidad de medida, la transmitancia viene a ser un valor adimensional.

2.2.2.2 Absorbancia:

Se define simplemente como el logaritmo negativo en base 10 de la transmitancia. Es preferible trabajar con esta expresión puesto que presenta una relación lineal con algunos parámetros de la muestra.

La fórmula de absorbancia sería entonces la indicada en la ecuación (2):

$$A_{\lambda} = -\log_{10} T_{\lambda} \quad (2)$$

Donde:

A_{λ} = Absorbancia de la muestra

T_{λ} = Transmitancia de la muestra a una longitud de onda λ

2.2.2.3 Ley de Beer-Lambert.

Los conceptos de transmitancia y absorbancia, obedecen a la ley de Beer – Lambert, propuesta de forma independiente por Wilhel Beer y Johann Lambert en los años 1760 y 1852 respectivamente [22], quienes establecen una relación directamente proporcional de la absorbancia, antes descrita, con las propiedades de la muestra que es atravesada por la luz, según la ecuación (3):

$$A_{\lambda} = \alpha_{\lambda} \times c \times b \quad (3)$$

Donde:

A_λ = Absorbancia de la muestra

α_λ = Absortividad, constante de proporcionalidad, que depende mucho del instrumento de medición y longitud de onda a emplear (litro/mol*cm)

c = Concentración de la muestra en la solución (mol/litro)

b = Espesor de la muestra que atraviesa la luz (cm)

Cabe mencionar, que las expresiones antes descritas, así como la Ley de Beer-Lambert, cumplen para disoluciones diluidas (líquidos), así como para una sola longitud de onda predefinida, por lo que la luz incidida deberá ser monocromática, debido a que la absortividad es constante siempre que la longitud de onda lo sea también.

Como se puede rescatar de lo expuesto, la espectrofotometría permite realizar un análisis cualitativo, al identificar el tipo de sustancia química que se tiene de muestra, así como un análisis cuantitativo, al determinar la concentración de la misma. [23].

Para el caso particular de este trabajo de tesis, el fin cualitativo se aprovecha en la etapa de diseño para hallar la longitud de onda asociada al microorganismo *Saccharomyces cerevisiae*, de manera que se use una fuente luminosa que emita un haz en dicha longitud espectral para que pueda reaccionar con mayor eficiencia con la muestra. El fin cuantitativo se aplicará cuando parte de la luz sea absorbida por el microorganismo, y parte de ella pueda ser medida por el sensor en el otro extremo de la muestra, obteniendo así el valor de la absorbancia para cada instante de tiempo, la cual variaría a medida que la turbidez de la muestra aumente por el incremento de la densidad poblacional del microorganismo, tras hacer uso de los nutrientes para su crecimiento.

2.2.3 Modelamiento matemático del crecimiento microbiano

Los datos que se recauden con el espectrofotómetro a diseñar en este trabajo de tesis, a fin de poder ser validados y de obtener curvas comparativas, deben ser modelados a partir de curvas que puedan predecir el comportamiento del crecimiento del organismo en el tiempo y en el experimento autónomo en las condiciones del espacio exterior.

Entre los modelos a considerar, está el de Gompertz y el modelo Logístico, ya que son los más óptimos para obtener un modelo predictivo del crecimiento de microorganismos, según estudios realizados en una aplicación en medio de leche estéril, brindando un balance entre simplicidad y efectividad [18].

Estos modelos son simplificaciones que representan los complejos procesos bioquímicos que controlan el crecimiento microbiano, siendo estadísticamente válidos y con ajustes que no difieren significativamente, pudiéndose apreciar en sus representaciones gráficas los siguientes parámetros:

- a) La velocidad específica de crecimiento
- b) El tiempo de generación
- c) El valor asintótico superior y equivalente a la máxima densidad poblacional alcanzada por la levadura
- d) La fase de adaptación.

Inicialmente la curva de Gompertz había sido creada como un modelo empírico para describir la distribución de edad humana en una comunidad dada, con un análisis de tablas de mortalidad; sin embargo, luego se encontraron aplicaciones de esta curva en biofísica, con particular interés en el modelamiento de crecimiento de tumores con una tasa exponencialmente decreciente dependiente del tiempo [24].

A fin de aplicarla en la medición de crecimiento biológico, se puede usar la expresión matemática modificada del Modelo de Gompertz propuesta por Zwietering et al. (1990) la cual es la detallada en la ecuación (4):

$$y(t) = y_0 + (y_{max} - y_0)e^{\left[-e^{1 + \mu_{max} \times e^{\left(\frac{\lambda - t}{y_{max} - y_0}\right)}\right]} \quad (4)$$

Donde:

$y(t) = \ln N(t)$, siendo $N(t)$ la densidad poblacional de la levadura ($cel \times mL^{-1}$) al tiempo "t"

$y_0 = \ln N_0$, siendo N_0 la densidad poblacional inicial de la levadura ($cel \times mL^{-1}$).

$y_{max} = \ln N_{max}$, siendo N_{max} la máxima densidad bacteriana alcanzada ($cel \times mL^{-1}$).

μ_{max} = máxima velocidad específica de crecimiento ($hora^{-1}$).

λ = fase Lag o de adaptación (*horas*), se refiere a la fase inicial cuando aún no hay incremento celular, porque el organismo se toma un tiempo para adaptarse al nuevo ambiente y sintetizar las enzimas necesarias [25].

Otro dato a extraer de este modelo podría ser el Tiempo de generación (T_g), que es el tiempo que tarda en aparecer la segunda generación de células respecto a las que había inicialmente, es decir, el tiempo que tarda en alcanzar $N(t) = 2N_0$. Este valor T_g se relaciona con el de la velocidad de crecimiento según la expresión de la ecuación (5):

$$T_g = \frac{\ln 2}{\mu_{max}} \quad (5)$$

En la *Figura 9* se puede apreciar un modelamiento del crecimiento de la levadura en caldo de melaza y lactosuero, evidenciándose la aproximación de esta ecuación con los puntos obtenidos del conteo celular mediante microscopía óptica en laboratorio

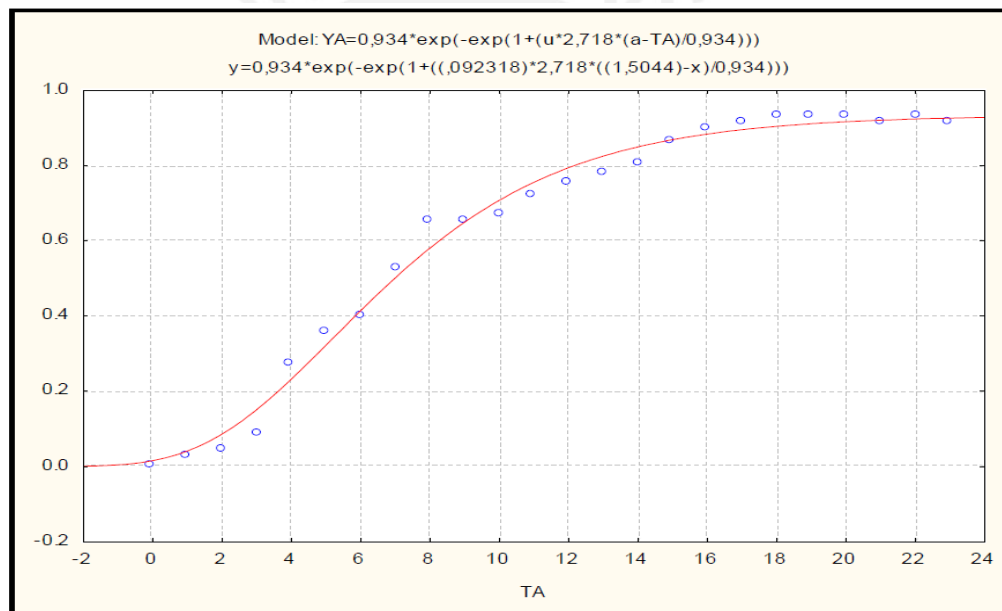


Figura 9. A) Modelo de Gompertz para crecimiento de *Saccharomyces Cerevisiae* en caldo melaza + lactosuero [18].

La ventaja de usar este modelo es que permite obtener los parámetros de la cinética de crecimiento de manera directa, y poder compararlos con experimentos gemelos a distintas condiciones de crecimiento, apreciándose así el efecto de dichas condiciones.

CAPÍTULO 3:

DISEÑO DE LA CARGA ÚTIL

El presente capítulo trata sobre el diseño de cada componente de éste trabajo, incluyendo tanto la parte electrónica como la microbiológica, se detallan los ensayos que se hicieron para determinar la viabilidad de la propuesta, teniendo presente los fundamentos teóricos y metodológicos tratados en el capítulo anterior. Los ensayos previos abarcan al diseño de los circuitos eléctricos que forman el espectrofotómetro y también el acondicionamiento de los materiales para crear las condiciones necesarias para el crecimiento de los microorganismos en un primer prototipo.

3.1 Descripción del diseño propuesto

Dentro de un envase de 2 ml de capacidad, se coloca el caldo de cultivo Papa Dextrosa (glucosa) que sirve de alimento y medio de cultivo para el crecimiento de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* luego se añade una asada (microorganismos) a manera de inóculo, se toma muestra en este momento para obtener el valor de la concentración de biomasa inicial N_0 . Esta celda sirve al mismo tiempo de biorreactor, para lo cual se ha de colocar en un entorno agitado. Se han de tomar valores de crecimiento con el espectrofotómetro en la misma celda.

Una fuente emisora de luz a una longitud de onda definida emite un haz de fotones a una intensidad incidente I_0 para atravesar el envase con la muestra y obtener al otro extremo en un sensor de luz, sensible a la misma longitud de onda, una intensidad de luz transmitida $I(t)$, para cada instante de tiempo.

El sensor de luz cuenta con un circuito electrónico que brinda la tensión de sus terminales a un microcontrolador de manera analógica y a través de un conversor análogo-digital (ADC) de 10 bits, se obtiene su valor equivalente en un número entero que puede ir de 0 a 1023. Al mismo tiempo, se mide la temperatura y humedad dentro del espacio inmediato al envase del experimento, con el sensor a detallar más adelante, que brinda dichos valores en forma digital. Todos estos valores serán tomados y almacenados cada 30 minutos, para luego ser enviados por un terminal serial al bus principal del satélite, el

cual se encargará de transmitir dichos datos a tierra a través del *GlobalStar Network* en un paquete máximo de 35 bytes para su posterior análisis.

Una vez los datos sean recibidos en Tierra, se realiza un análisis por medio del software Matlab, en donde el valor digital recibido del espectrofotómetro (del ADC) será convertido por considerando la Ley de Ohm a un valor de impedancia (Ohm) o de corriente (amperios). En este caso se propone un sensor de luz detallado en las páginas siguientes, de cuyas hojas técnicas es posible obtener la curva característica electro-óptica del sensor, que brinda el valor de la intensidad luminosa correspondiente a la señal eléctrica medida. Dicho valor (lux) será usado para compararse con el valor incidente I_0 y obtener así la absorbancia de la muestra en cada instante de tiempo. Por último, por medio de la ley de Beer-Lambert, se usará dicho valor de absorbancia para obtener la concentración de la levadura, que vendría a ser su densidad poblacional para un tiempo determinado.

Esto se puede comprender de manera gráfica a través del diagrama de bloques mostrado en la *Figura 10*



Figura 10. Diagrama de bloques de la conversión de los datos del espectrofotómetro.

Cabe mencionar que se debe conocer la concentración inicial de la muestra para poder cumplir con el análisis planteado. Esto no presenta un problema, ya que se ha de elaborar una “curva patrón” en Tierra con concentraciones de levadura conocidas, en el volumen de estudio correspondientes a la absorbancia, la que ha de servir de referencia para determinar las nuevas concentraciones correspondientes a los valores de impedancia que arroje el sensor en un experimento en las condiciones del espacio exterior.

Como paso final del experimento, este diseño plantea el uso de un modelamiento matemático que permita obtener valores estándar que puedan ser comparados; pues,

como ya se explicó, se realizará un experimento idéntico al de órbita, en Tierra, a fin de comparar los efectos de las condiciones extremas del espacio con un experimento gemelo en Tierra en el crecimiento del microorganismo. Esto se plantea de modo resumido en la *Figura 11*

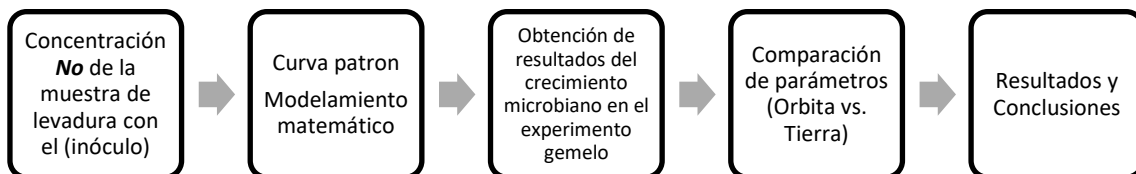


Figura 11. Diagrama de bloques de obtención de resultados

Es importante mencionar que el proyecto en su totalidad, abarca otras etapas que complementan a las de este trabajo y para una mejor comprensión de ello, en la *Figura 12* se presenta el bloque 6 que supone el diseño de una válvula que ponga al alcance del microorganismo el medio de cultivo, tarea que forma parte de un trabajo de mecánica y viene desarrollándose paralelamente al presente.

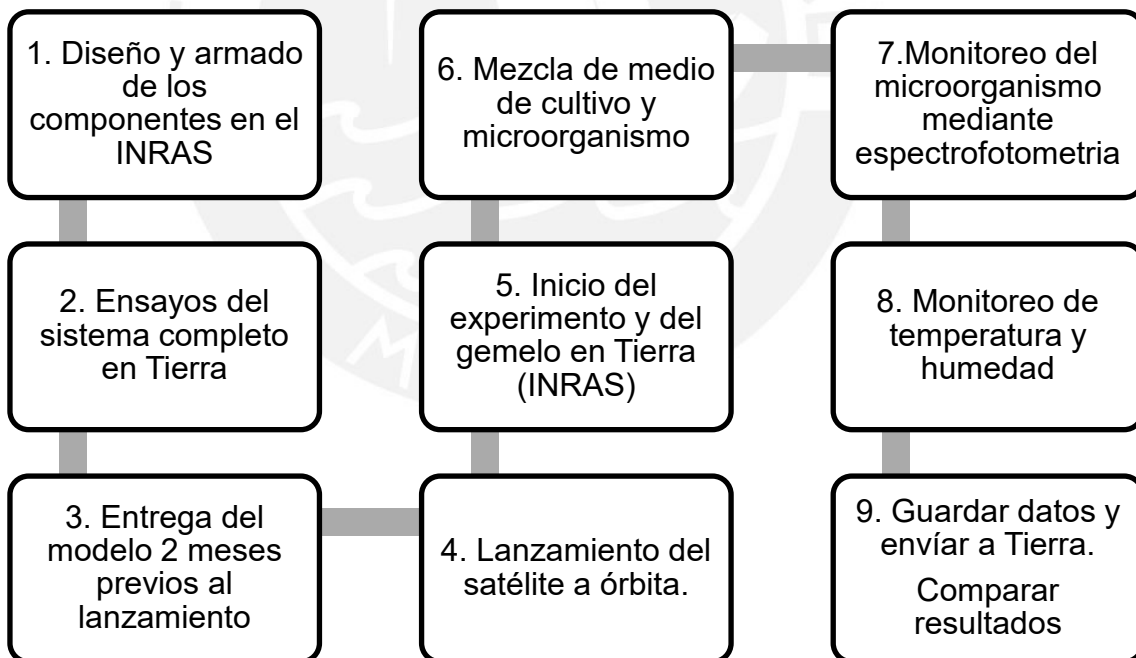


Figura 12. Diagrama de bloques de las Etapas del Proyecto en su totalidad

3.2 Aplicación de la longitud de onda del haz de luz

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, se hará un barrido por espectrofotometría del medio de cultivo para determinar la longitud de onda a la que es conveniente hacer

las mediciones de concentración de acuerdo al crecimiento microbiano. Es decir, la determinación cualitativa de la espectrofotometría para conocer la longitud de onda asociada al medio de cultivo con el que se trabajará.

Tomando de base trabajos realizados anteriormente, se sabe que el *Saccharomyces cerevisiae* posee una afinidad de absorción de luz a una longitud de onda de 600 - 620 nm [26], que corresponde a luz de color amarilla - naranja, como se aprecia en el Espectro Visible por el ojo humano de la *Figura 13*. En los experimentos realizados en el trabajo en mención, se realiza la medición de la cinética de crecimiento de una cepa empleada a nivel industrial para la producción de Tequila, similar a la que se usará en este proyecto, empleando espectrofotometría a una longitud de onda de 600nm.

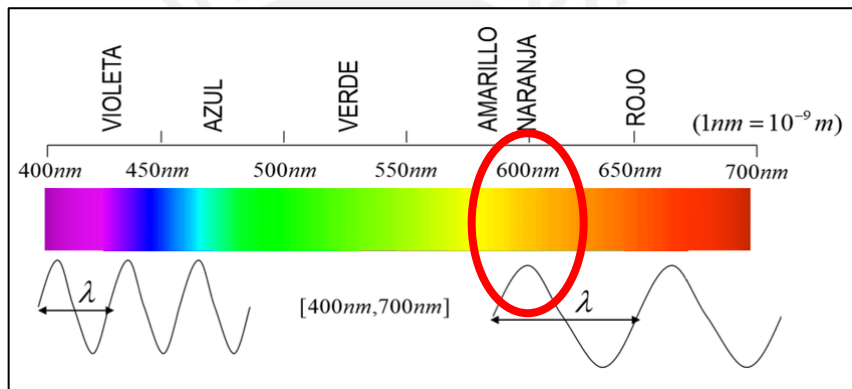


Figura 13. Espectro visible de la luz que puede percibir el ojo humano. [27]

Así mismo, para corroborar tal longitud de onda, se ha procedido con un experimento propio en el Laboratorio de Procesos Industriales de la PUCP (Pabellón O), en el cual se realizó un barrido espectral sobre una muestra de *Saccharomyces Cerevisiae*. A fin de obtener una gráfica que relacione la intensidad de luz transmitida versus la longitud de onda de la misma, señalando un pico en el que la luz transmitida sea la menor posible, es decir, será esa longitud de onda la que defina el tipo de fuente de luz a usar y el sensor respectivo.

3.2.1 Experimento en laboratorio

A fin de obtener el parámetro descrito en el ítem anterior, se debe preparar una muestra de la levadura vertida en un medio de cultivo apropiado.

Medio de cultivo

Entre las opciones que se tenían para el nutriente que consumiría la levadura, se sabe que debía ser un medio de cultivo que presente un alto contenido de carbohidratos y un pH adecuado. El medio más usado en laboratorios es el Agar Papa Dextrosa (PDA) [17]; sin embargo, lo que se precisa para este experimento es una solución líquida y homogénea por la cual pueda atravesar luz, es por ese motivo que se optó por un caldo de cultivo de Papa Dextrosa (PD) sin Agar, ya que este último elemento genera un resultado gelatinoso que no es de conveniencia.

Para el cultivo se siguió la fórmula de preparación indicada en Manual de Laboratorio para fitopatología general [17], que requirió de los siguientes ingredientes:

- 200 ml de agua destilada
- 4 gr de Dextrosa/Glucosa, *Figura 14*
- 40 gr de papas peladas y picadas, *Figura 15*

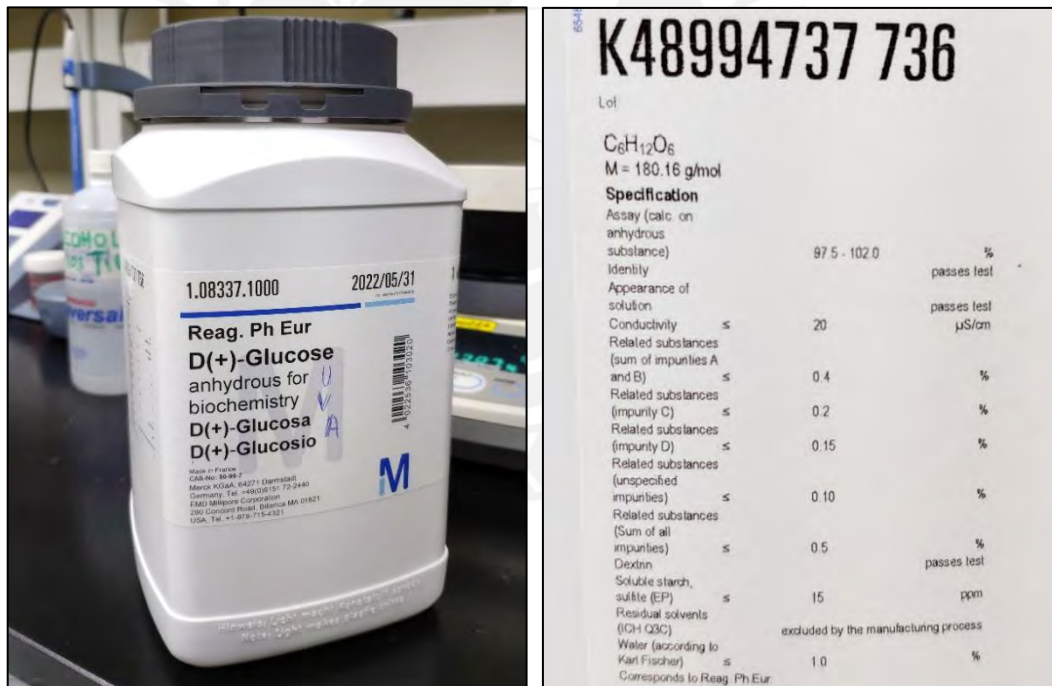


Figura 14. A la izquierda, frasco de dextrosa utilizada. A la derecha, composición química de la dextrosa.

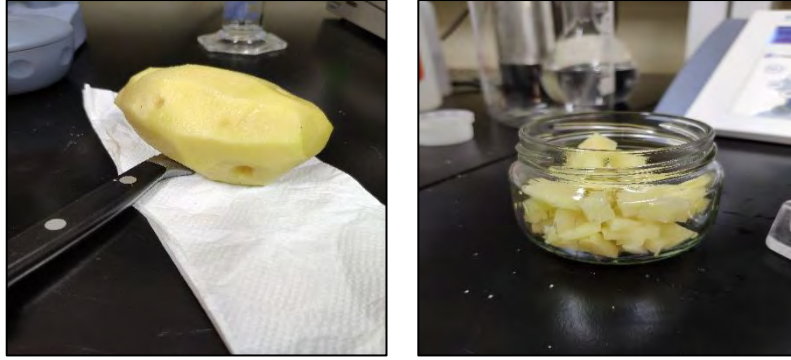


Figura 15. Papa de variedad Yungay, pelada y picada.

Primeramente, se peló y picó la papa en pequeños trozos hasta obtener 40 gr de esta. Dicha cantidad sería sancochada en 100 mL de agua destilada por aproximadamente 40 minutos para posteriormente ser colada. Este proceso se muestra en la *Figura 16*, donde se obtiene finalmente la esencia de papa en una cantidad que deberá ser reajustada a 100mL, pues se perdió volumen al hervir.

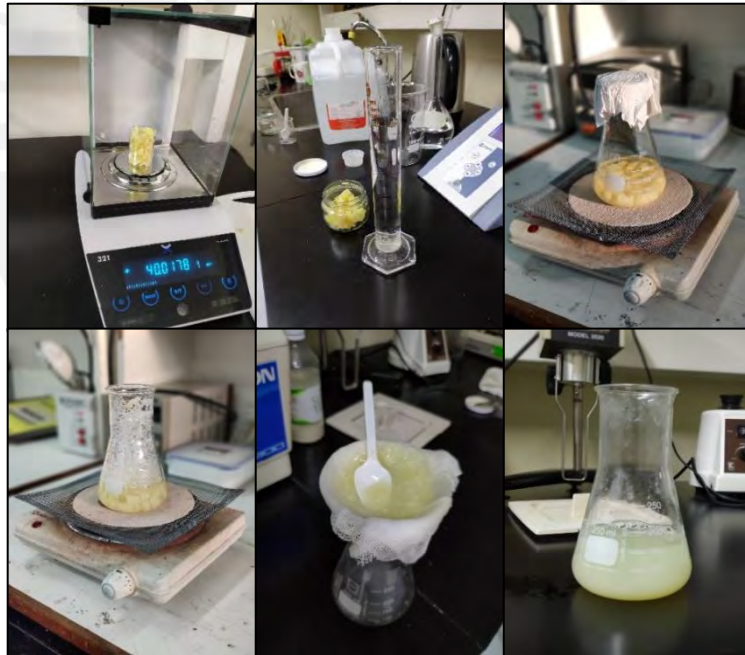


Figura 16. Proceso de obtención de caldo de cultivo a base de papa y dextrosa.

Paralelo a esto, se usó el resto de los 200 mL iniciales de agua destilada para disolver la Dextrosa. Esta solución fue mezclada con la de la papa y dejada reposar en un refrigerador para que se conserve hasta su aplicación con *Saccharomyces cerevisiae*.

En un ambiente cerrado, a fin de evitar el ingreso de agentes externos o contaminantes, se vertió una muestra del inóculo de la levadura en el cultivo y se mezcló hasta formar un líquido homogéneo. De la solución adquirida, se tomó 2 ml de muestra en un frasco prismático, el cual sería llevado al espectrofotómetro para iniciar el barrido espectral.

La configuración del espectrofotómetro fue tal que se aplica a la muestra un haz en el espectro de luz visible, limitado entre 400 nm y 700 nm. Con la información obtenida, se procede a la correcta elección de componentes, siendo el parámetro filtro la longitud de onda de 620 nm, tanto para la fuente de luz como para el sensor que la captará luego de ser transmitida a través de la muestra.

3.3 Componentes electrónicos

Como principal componente, encargado de todo el proceso de recolección de datos se tiene al microcontrolador. Según las especificaciones técnicas y avances de los demás participantes del proyecto que viene realizándose desde años anteriores, se está trabajando con la plataforma Tiva-C del fabricante Texas Instruments; sin embargo, a nivel de prototipo funcional se propone el uso de la plataforma Arduino, con el microcontrolador ATmega 2560 del fabricante Atmel, compatible con el micro controlador ATmega328P del ThinSat debido a la disponibilidad de librerías útiles para la aplicación, así como la compatibilidad con el software Matlab, que será usado para el análisis de datos.

Cabe resaltar que, al tratarse esta tesis de un proyecto aplicativo con énfasis en la investigación, que busca recopilar información para obtener resultados comparativos en base al espectrofotómetro construido y aclarar preguntas biológicas, no hay un enfoque o necesidad de construir una placa integrada propia con un chip de microcontrolador, por lo que se encuentra viable el empleo de plataformas como Tiva-C o Arduino.

3.3.1 Fuente de Luz

Según el valor de longitud de onda asociada al caldo de cultivo para *Saccharomyces cerevisiae* hallado de manera experimental, es posible encontrar diversas fuentes de luz que cumplan con este parámetro, además de requerirse ser estables, direccionables y de energía continua. En este caso se opta por luz proveniente de un diodo emisor de luz

(LED), de un color cercano al ámbar y naranja, obteniendo 3 posibilidades según se muestra en la *Tabla 3*

Tabla 3. Posibles fuentes de luz propuestas

Código	Fabricante	Empaque	Temperatura	Consumo	Intensidad	Longitud de onda	Precio (USD)
WP710A10 NT	Kingbright	Bulk	-40°C +85°C	62.5 mW 25 mA	-	607 nm	0.2
150060AS7 5020	Wurth Elektronik	Tape and Reel	-40°C +85°C	48 mW 20 mA	140 mcd	610 nm	0.35
SSL- LX3040SO D	Lumex	Cut Tape, Reel	-40°C +85°C	100 mW 20 mA	100 mcd	610 nm	0.52

La intensidad luminosa expresada en milicandelas (mcd) que nos conviene trasladar a unidades de lux, obedeciendo la fórmula de la ecuación (6):

$$E_{V(lux)} = \frac{I_{V(cd)}}{distancia_{(m)}^2} \quad (6)$$

Donde:

$E_{V(lux)}$ = Valor de Iluminancia en luxes.

$I_{V(cd)}$ = Valor de Intensidad luminosa en candelas.

$distancia_{(m)}$ = valor de la distancia en metros desde la fuente de luz, hasta la superficie incidente, que para este caso es el sensor de luz, a una distancia de 1cm (grosor del frasco contenedor del microorganismo)

Para el caso del segundo y tercer elemento de la *Tabla 3*, la iluminancia en lux vendría a ser 1400 lux y 1000 lux respectivamente.

Tras analizar las opciones presentes, se opta por emplear la segunda opción, ya que brinda la mayor cantidad de intensidad luminosa a una misma corriente directa de 20mA, lo que permite optimizar el diseño al reducir la iluminancia variando la resistencia que irá asociada al LED, disminuyendo el valor de la corriente directa según se muestra en la *Figura 17*, para alcanzar una intensidad de 100 mcd aproximadamente.

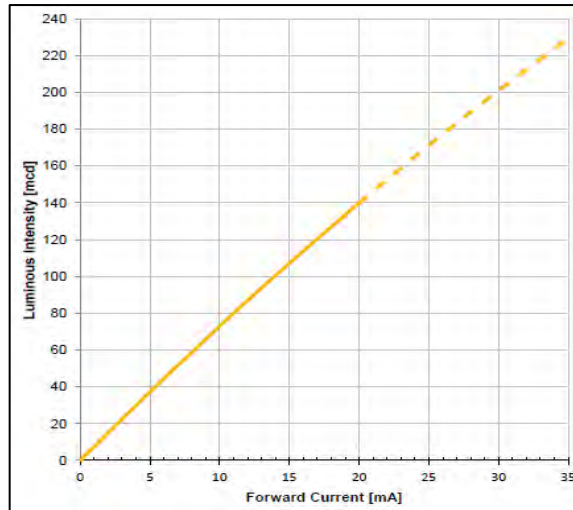


Figura 17. Curva de intensidad luminosa vs. corriente directa en el LED de código 150060AS75020 seleccionado [28]

El circuito electrónico que definirá la corriente directa del LED en 14 mA se muestra en la *Figura 18*, que básicamente se basa en la ley de Ohm aplicada a un circuito en serie de un LED y una resistencia R_{LED} . La alimentación de este circuito es manejada por el microcontrolador, a fin de encender únicamente en los instantes donde se deba realizar la medición.

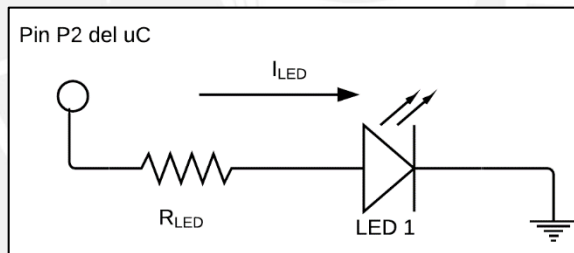


Figura 18. Circuito básico de fuente de luz con corriente limitada.

El valor de la resistencia sería dado por la ecuación $R_{LED} = \frac{V_{P2} - V_{LED1}}{I_{LED}}$ (7):

$$R_{LED} = \frac{V_{P2} - V_{LED1}}{I_{LED}} \quad (7)$$

Donde:

V_{LED1} = Caída de tensión del LED, necesaria para su funcionamiento. Es igual a 2 V, según hoja técnica

V_{P2} = Valor de alimentación de 5 V suministrado por el microcontrolador

I_{LED} = Corriente directa que circulara por el LED, igual a 14 mA

R_{LED} = 214 Ω . Con 220 Ω como valor comercial más cercano

3.3.2 Sensor de Luz

De entre muchos fabricantes y diversos modelos se tienen 3 opciones que cumplen con la característica principal de la limitación en longitud de onda, además de la tensión de operación y temperatura a la que puede funcionar. Las propuestas se presentan en la *Tabla 4*, de las cuales se debe elegir aquella que cumpla lo anteriormente indicado. Para un diseño final, se tiene en cuenta la limitación de tamaño del ThinSat, por lo que la tercera alternativa conviene por su empaque ChipLED; sin embargo, presenta un ancho de banda muy extenso en comparación al de la segunda opción, lo cual se puede observar en la *Figura 19*. Lo que se busca es que este sensor esté centrado en la longitud de onda de la luz que será emitida del otro extremo.

Tabla 4. Posibles sensores de luz propuestos.

Sensor	Fabricante	Empaque	Comunicación	Temperatura	Consumo	Longitud de onda	Precio (USD)
TSL2571	ams / TAOS	ODFN	I ² C	-30°C +70°C	3.8 V 20 mA	625 nm	1.65
EAALST05 RDMA0	EVERLIGHT AMERICAS	SMD	Analógica	-40°C +85°C	5 V 20 mA	630 nm	0.17
APDS-9300	AVAGO	Miniature ChipLED	I ² C	-30°C +85°C	3.8 V 20 mA	640 nm	1.48

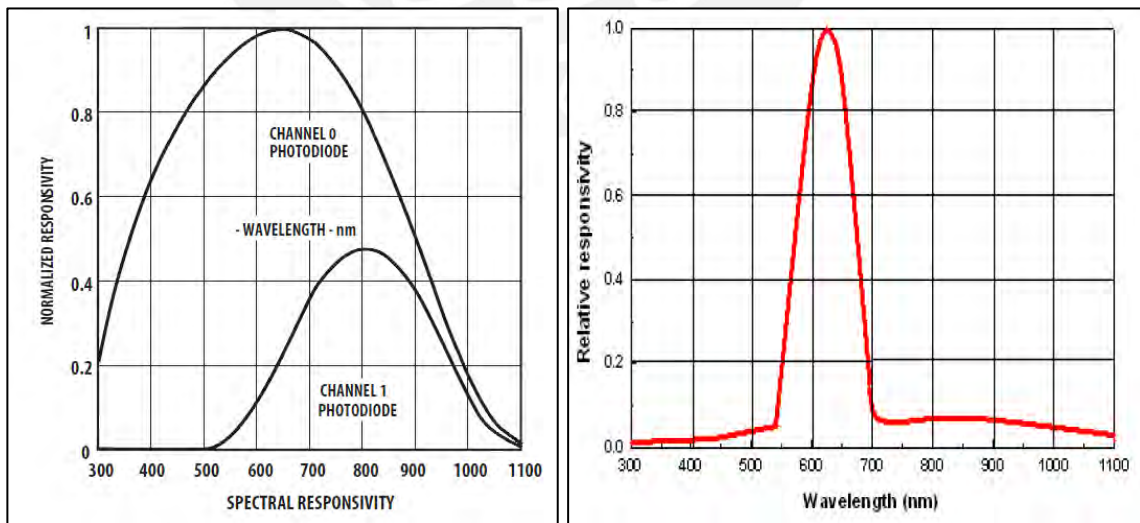


Figura 19. Respuesta Espectral del Sensor de AVAGO (izquierda) y EVERLIGHT (derecha).

Fuente: [29] [30]

El principio de funcionamiento de la primera y tercera opción es bastante similar, pues cuentan con dos sensores fotodiodos y un sistema completo con ADC y comunicación I²C, mientras que la segunda opción es únicamente un fototransistor, que por medio de un circuito similar a un divisor resistivo brinda un nivel de tensión que va a un pin de entrada analógico del microcontrolador.

A pesar de las ventajas electrónicas del primer y tercer elemento, una desventaja es el tipo de montaje, pues se dificulta la soldadura al trabajar a nivel de un prototipo funcional, por lo que se opta por el segundo sensor, además de tener un funcionamiento más simplificado y una mayor sensibilidad a la longitud de onda requerida.

El circuito electrónico a emplear para el sensor en cuestión es el detallado en la *Figura 20*, que tiene como objetivo obtener un valor de corriente llamado *Light Current* (I_{PH}) producto del emisor del fototransistor, que al pasar por la resistencia de carga R_L tenga una caída de tensión que sea medida por el pin analógico A1 del microcontrolador.

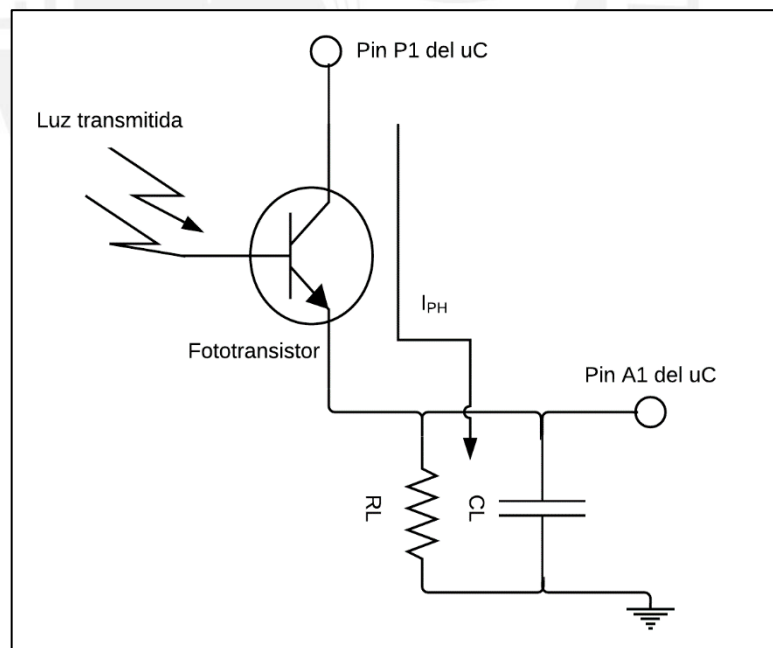


Figura 20. Diagrama esquemático del circuito electrónico para el fototransistor.

Según la ley de Ohm y la propiedad eléctrica del fototransistor, la caída de tensión en R_L vendría a ser igual al mostrado en la ecuación (8):

$$V_{A1} = I_{PH} \times RL \leq V_{A1(SATURACION)} = V_{P1} - 0.4V \quad (8)$$

Donde:

V_{P1} = Señal del microcontrolador que activa el circuito (5V)

$V_{A1(SATURACION)}$ = Tensión de saturación del fototransistor (5V – 0.4V = 4.6V)

RL = Resistencia de carga que permitirá cumplir el requerimiento de máxima luz y una tensión menor a la de saturación

I_{PH} = Corriente de luz del orden de los μA que tendrá una relación directa con la intensidad luminosa (lux) que recae en el sensor, como se aprecia en la *Figura 21*.

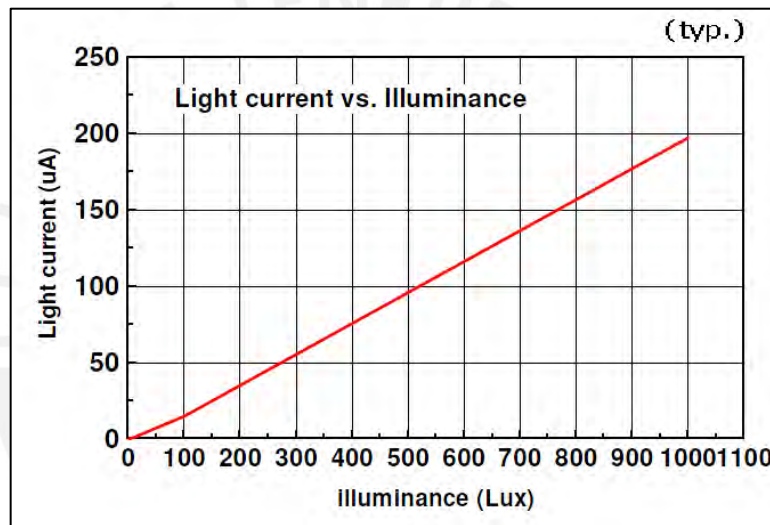


Figura 21. Curva electro-óptica de Corriente de luz vs. Iluminancia [30]

De la gráfica mostrada en la Figura 21, podemos tomar el valor de 200 μA como corriente

I_{PH} máxima para una intensidad de aproximadamente 1000 Lux, para calcular $RL \leq \frac{4.6V}{I_{PH}}$.

De lo que se obtiene un valor de $RL \leq 23 \text{ k}\Omega$. Se escoge el valor inferior comercial más cercano, $RL = 22 \text{ k}\Omega$

3.3.3 Sensor de temperatura y humedad

Un parámetro a considerar que influye en el diseño es la temperatura, pues a la altura a la que orbitará el satélite, estará expuesto a temperaturas que oscilarán entre -40°C y $+85^{\circ}\text{C}$, producto de 3 grandes fuentes que irradian calor: El Sol a 6000 Kelvin, La Tierra a 350 Kelvin, el espacio profundo a 3 Kelvin aproximadamente; sin embargo, no se sabe

exactamente la temperatura a la que podrá llegar a estar la carga útil, que puede ser distinta a la exterior del satélite ThinSat que cuenta con sus propios sensores de temperatura.

Esta temperatura debe ser tomada en cuenta puesto que afecta el crecimiento del microorganismo y provoca variaciones en la medición de otros sensores.

Se propone el sensor de temperatura y humedad SHT15 del fabricante SENSIRION, el cual presenta óptimas características de tamaño, calibración, comunicación y consumo energético. Así mismo, este sensor fue usado en trabajos pasados de Tesis mencionados en el primer capítulo. Las dimensiones se aprecian en la *Figura 22*, así como la forma en la que se conectará al microcontrolador de este trabajo.

La *Tabla 5* muestra un resumen de los valores más significativos de dicho sensor.

Tabla 5. Sensor de temperatura y humedad propuesto.

Sensor	Fabricante	Tamaño	Empaque	Consumo	Rango de medición	Precio (USD)
SHT15	Sensirion	5 x 7.5 mm	Montable en superficie tipo LCC	3.3 V ~ 5 mA	-40°C ~ +123°C	12.412

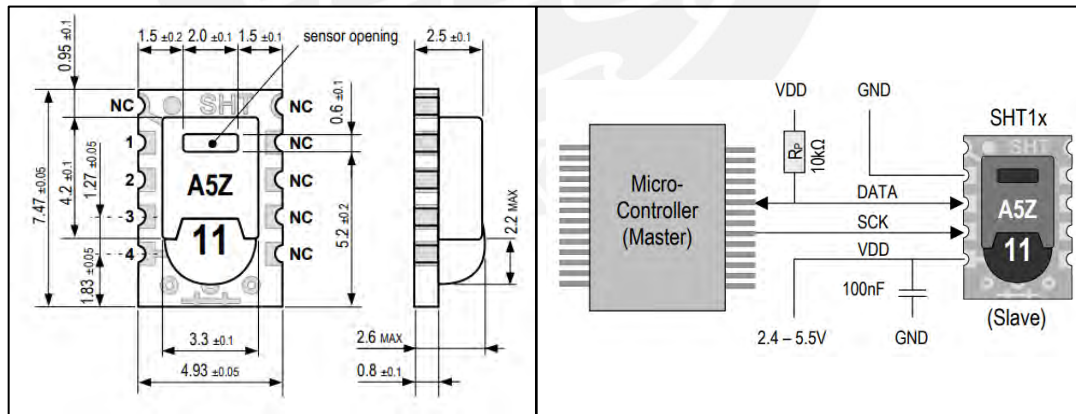


Figura 22. A la izquierda, dimensiones del sensor de temperatura y humedad Sensirion SHT15. A la derecha, circuito típico de conexión a microcontrolador [31].

De los pines que presenta el sensor solo 4 son disponibles para su uso, según la *Tabla 6*. Los demás pines son reservados y deben ser dejados desconectados, según indica su hoja técnica.

Tabla 6. Asignación de pines de sensor de temperatura y humedad SHT15.

Pin	Nombre	Función
1	GND	Tierra referencia
2	DATA	Transmisión Serial Bidireccional
3	SCK	Señal de reloj (solo entrada)
4	VDD	Tensión de alimentación

La manera de recopilar los datos del sensor será por transmisión serial al microcontrolador a través de comandos y lectura de datos utilizando los pines 2 y 3. Estos comandos son detallados en la hoja técnica del fabricante en una tabla de códigos para cada función disponible; sin embargo, existen librerías para plataformas como Arduino que permiten leer directamente los valores con una línea de código, obteniendo finalmente 2 bytes de información de medición, con una resolución de 12 bits para temperatura y otros 2 bytes para humedad, con la misma resolución. El valor digital de la señal de humedad que es leído del sensor mediante la señal SO_{RH} , luego es convertido a un valor de humedad relativa según la gráfica mostrada en la Figura 23.

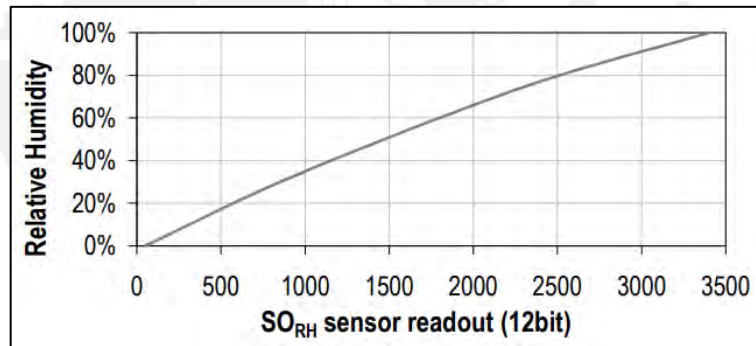


Figura 23. Conversión de SO_{RH} a humedad relativa [31].

Así mismo, el valor digital de la señal de temperatura que es leído del sensor como SO_T es calculado mediante la fórmula de la ecuación (9):

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T \quad (9)$$

Donde:

$$d_1 = -40.1^\circ C$$

$$d_2 = 0.04^\circ C$$

Para los valores de VDD = 5V, y resolución de medición de 12 bits

Este paso final de interpretación de datos se realizará luego de haberlos enviado a Tierra, pues es conveniente transmitirlos tal cual fueron leídos para conservar el formato inicial de 12 bits por parámetro.

3.4 Paquete de datos a transmitir

Como se comentó anteriormente, los datos recolectados por los sensores de la carga útil deberán ser enviados a Tierra para su posterior análisis. Para ello, es necesario empaquetar dichos valores en los 35 bytes que se tienen disponibles para transmitir al bus principal del satélite. La información a enviar constará básicamente de 5 elementos.

- a) Concentración de la muestra: Obtenido del espectrofotómetro como un número decimal de punto flotante, para lo cual se requiere de **4 bytes**.
- b) Incertidumbre o coeficiente de variación estimado: el cual deriva de la desviación estándar y el promedio de cada medición. Este valor es necesario para determinar el grado de precisión de nuestro espectrofotómetro, que se espera sea menor al 15% para ser considerado aceptable. También se requiere de **4 bytes**.
- c) Los valores de temperatura para cada instante en que se mida la concentración: según la hoja técnica del sensor seleccionado, este dato es enviado digitalmente en **2 bytes**
- d) Los valores de humedad para cada instante en que se mida la concentración: según la hoja técnica del sensor seleccionado, este dato es enviado digitalmente en **2 bytes**
- e) El tiempo en el que se realizó la medición. Este tiempo será relativo a la “hora cero” que viene dada por el inicio del experimento en órbita, tras desplegarse los alerones del satélite. Debido a que el experimento tendrá una duración de 5 días aproximadamente, y se contabilizarán los minutos transcurridos, serán alrededor de 7200 minutos, por lo que **2 bytes** serán suficientes para almacenar dicho número.

Como se puede ver, el total de información a ser transmitida será de 10 bytes, por lo que queda suficiente espacio adicional que no será usado, y puede ser dirigido a otros posibles sensores o para información que requieran transmitir los otros miembros del proyecto general. Se propone agregar un byte adicional “0xFF” entre cada uno de los

cinco elementos anteriores para poder diferenciarlos, aunque no es de carácter imperativo pues se conoce el tamaño de cada elemento.

3.5 Programación del microcontrolador para un experimento autónomo.

Se requiere que el experimento se maneje de manera automática una vez haya entrado en órbita; para ello, se contará con una señal que será enviada al microcontrolador una vez se hayan desplegado los alerones. Esta señal puede simularse como un interruptor de cambio de estado o simplemente un pulsador de inicio. En las Figura 24 y Figura 25 se muestran los flujogramas para el inicio del experimento y los procesos consecuentes.



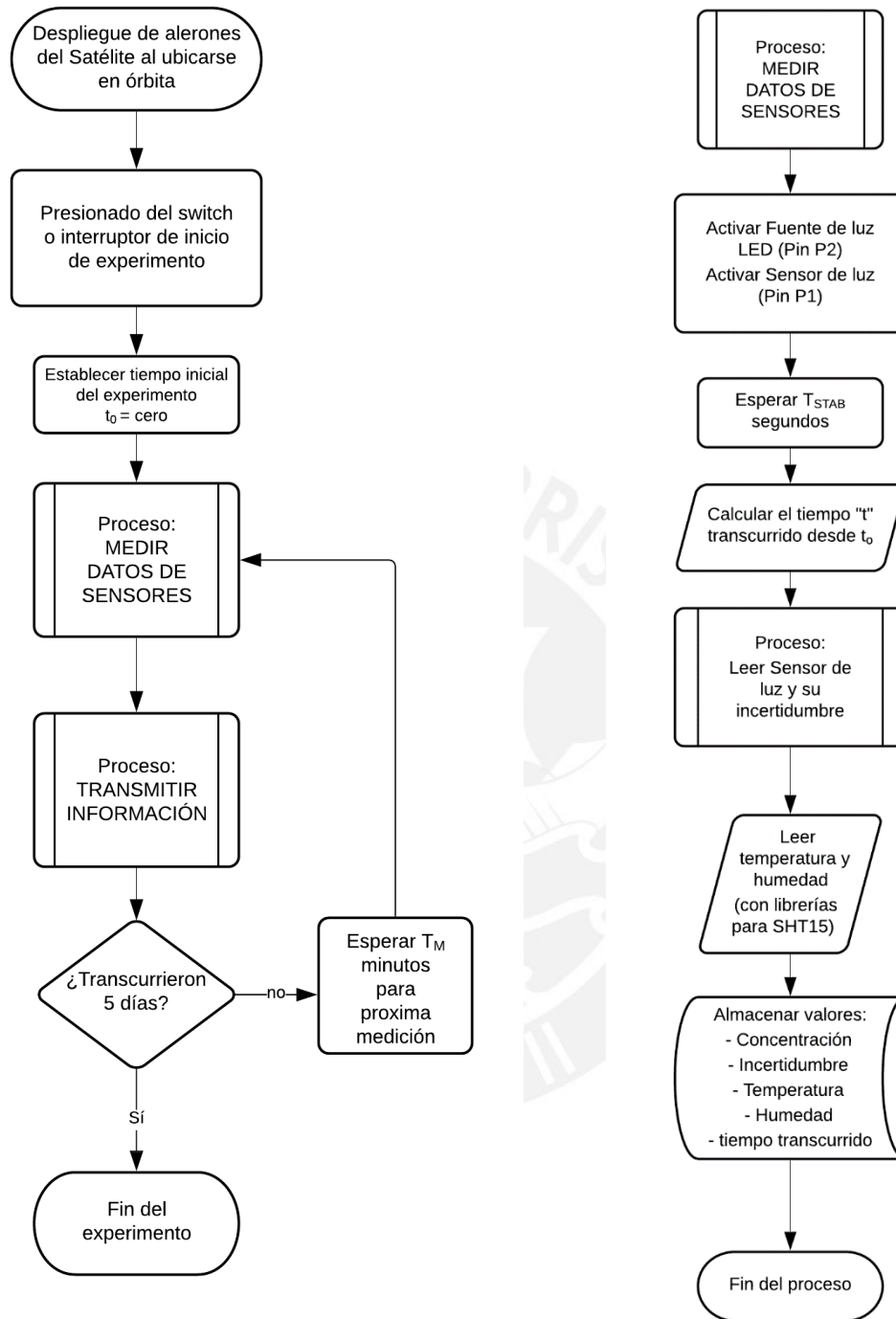


Figura 24. A la izquierda, diagrama de flujo general de la carga útil. A la derecha, diagrama de flujo del proceso de medición de los valores que arrojan los sensores de la carga útil.

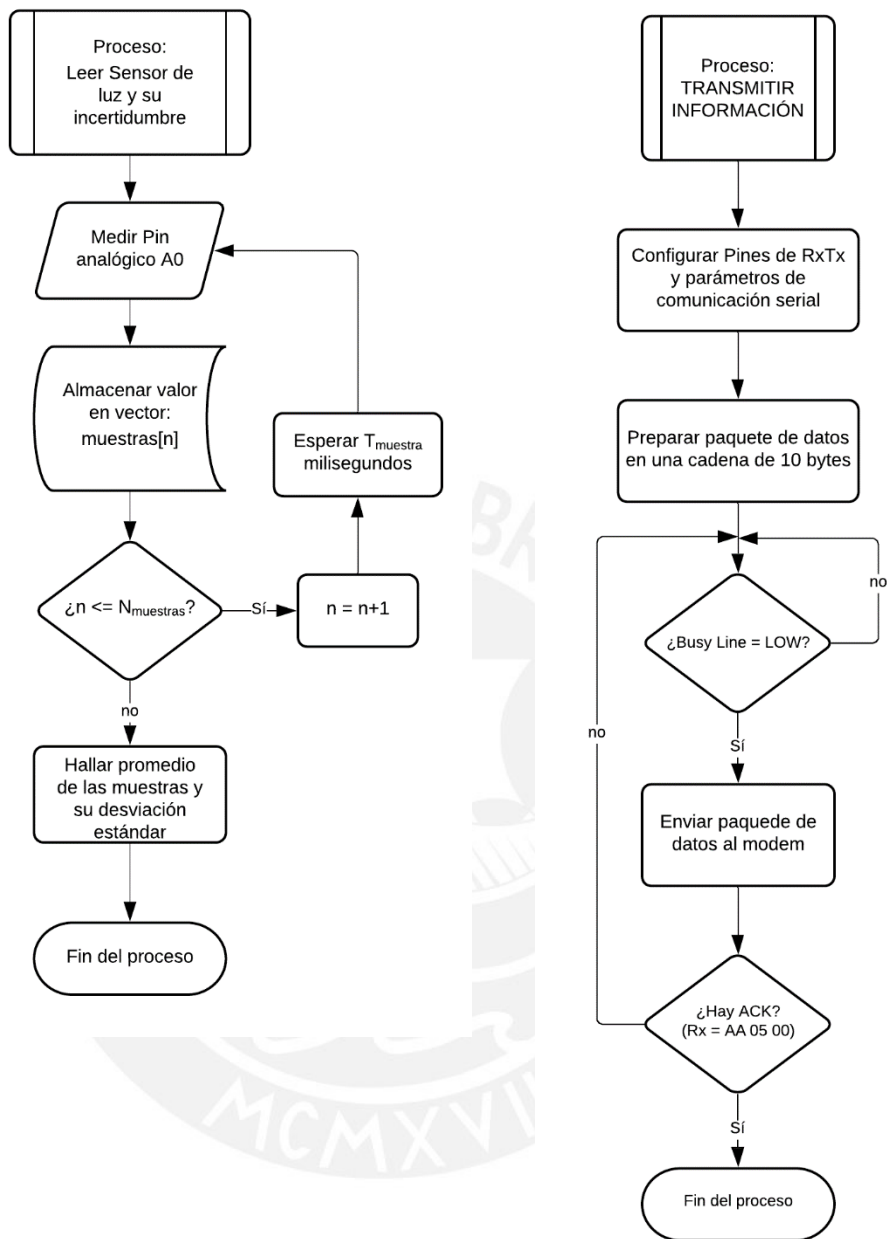


Figura 25. A la izquierda, diagrama de flujo del proceso de lectura del sensor de luz. A la derecha, diagrama de flujo del proceso de transmisión al modem del satélite.

En los diagramas mostrados líneas arriba, se busca explicar de manera gráfica el código de programación que tendrá el microcontrolador para realizar sus tareas. Algunos detalles o valores que no quedan claros se explican a continuación:

- T_M = Es el tiempo en el que se realizarán las mediciones al microorganismo. Se propone que sea de 60 minutos, pues según trabajos pasados, detallados en el capítulo anterior, es en esos intervalos de tiempo donde se aprecian cambios significativos en el crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae*, además de que el ThinSat provee de potencia a la carga útil por únicamente 10 minutos cada hora.
- T_{STAB} = Es el tiempo en el que tarda en estabilizarse el valor que tiene el sensor de luz al captar una intensidad luminosa, luego de haber estado a oscuras. Se propone un valor de 10 segundos, el cual se definirá de acuerdo a observaciones de manera experimental en las pruebas piloto a realizarse, las mismas que serán detalladas en el siguiente capítulo.
- $N_{muestras}$ = Es el número de veces que se medirá la concentración de la muestra para un instante de tiempo cercano, a fin de obtener un valor promedio para ese instante de tiempo y pueda estimarse un coeficiente de variación. Se propone 250 muestras por medición. Un número superior conllevaría problemas al buscar hallar el promedio mediante “suma de elementos / número de elementos” pues se obtendría un valor flotante muy alto que saturaría el tamaño del tipo de variable integer o double.
- $T_{muestra}$ = Es el tiempo de muestreo que toma la medición entre los 250 valores. Debe tratarse de un tiempo pequeño en el que el microorganismo no presente cambios y todas las mediciones sean prácticamente idénticas. Se propone 100 mili segundos, con lo que la obtención de un valor promedio sería luego de 25 segundos después de iniciada la medición.
- Busy Line = Es una señal de comunicación serial con el Bus principal del satélite, que requiere estar en un nivel bajo para poder transmitir la información de nuestra carga útil al modem, para su posterior envío a Tierra.
- ACK = Es la señal de reconocimiento de una correcta recepción de la información enviada al modem. El código propuesto leerá dicha señal en el terminal Rx del microcontrolador buscando un valor sexagesimal de “AA0500” a fin de reenviar la información si hubo errores en el envío.

3.6 Análisis de datos

Una vez se cuente con los datos en Tierra; estos serán obtenidos a través de un archivo CSV de la plataforma GlobalStar [9], para luego ser importadas en programas analíticos como MATLAB.

Al principio del capítulo se mencionó en la *Figura 10* cómo sería la interpretación de los datos del espectrofotómetro diseñado. A continuación, se tratará esto a detalle.

3.6.1 Del Sensor de Luz

El valor que se tiene inicialmente es un número de 10-bits que va de 0 a 1023. Este valor indica la tensión medida en los terminales de RL, según la *Figura 20*. Tras dividir por RL se obtiene la corriente de luz (light current) que presenta una relación lineal con la iluminancia (lux) como se observa en la *Figura 21*.

Mediante una ecuación basada en esa gráfica, se puede determinar en MATLAB el valor exacto de la iluminancia en cada instante de tiempo en que se realizan las mediciones.

La ecuación aproximada sería la (10):

$$\text{Iluminancia} = 5 \cdot I_{PH} + 25 \quad (10)$$

La manera de hallar la concentración del microorganismo a partir de este valor, es, como ya se sabe, usando la ley de Beer Lambert, descrita en la ecuación (11):

$$-\log_{10} \frac{I}{I_0} = \alpha_{\lambda} \times c \times b \quad (11)$$

De estos valores, I es dado, I_0 es conocido (Iluminancia medida sin el organismo), b es el ancho del contenedor (1cm), por lo que los valores desconocidos son la constante α_{λ} y la concentración c variable en el tiempo.

Como conocemos la concentración inicial que tuvo el organismo al iniciar el experimento, se puede deducir α_{λ} , y por tanto se tiene la ecuación (12)

$$\text{Concentración}(t) = \frac{-\log_{10} \frac{I(t)}{I_0}}{\alpha_\lambda \cdot b} \quad (12)$$

Se tiene también el coeficiente de variación, que viene dado por la ecuación (13):

$$C_V = \frac{\text{Desviación estándar } (\sigma)}{\text{Promedio } (\bar{x})} \cdot 100\% \quad (13)$$

Con valores conocidos para cada punto en el que se midió.

Por último, mediante la función “errorbar” de MATLAB obtendremos una gráfica que requiere tres vectores: x, y, err, donde x será el tiempo, y será la concentración, y err será el coeficiente de variación, idealmente inferior a 15% para considerarse aceptable.

3.6.2 Del Sensor de Temperatura y humedad

Los valores que se leen directamente del sensor son SO_T y SO_{RH} , y son precisamente estos valores los transmitidos a Tierra sin ningún previo análisis. Sin embargo, ya se conoce como hallar fácilmente sus interpretaciones en grados Celsius y % de humedad, según la ecuación y gráfica de conversión explicadas en el subcapítulo 3.3.3

No obstante, un punto importante a resaltar es el efecto de las temperaturas extremas a las que será sometido el experimento, en la medición de los sensores. Como se puede apreciar en la *Figura 26*, los valores extremos de temperatura hacen que sea necesario un ajuste en el parámetro medido a fin de que muestre verdaderamente el valor óptico. Para el caso del Fototransistor, se puede extraer una ecuación lineal que brinde un factor de ajuste ante cambios de temperatura, que sería la de la ecuación (14):

$$k = 0.003 \cdot T + 0.92 \quad (14)$$

Donde:

k = es un factor por el cual se multiplicará a la corriente de luz para obtener la iluminancia.
 T = temperatura en grados Celsius ($^{\circ}C$) obtenida del SHT15, para cada valor entre -40 y $85^{\circ}C$.

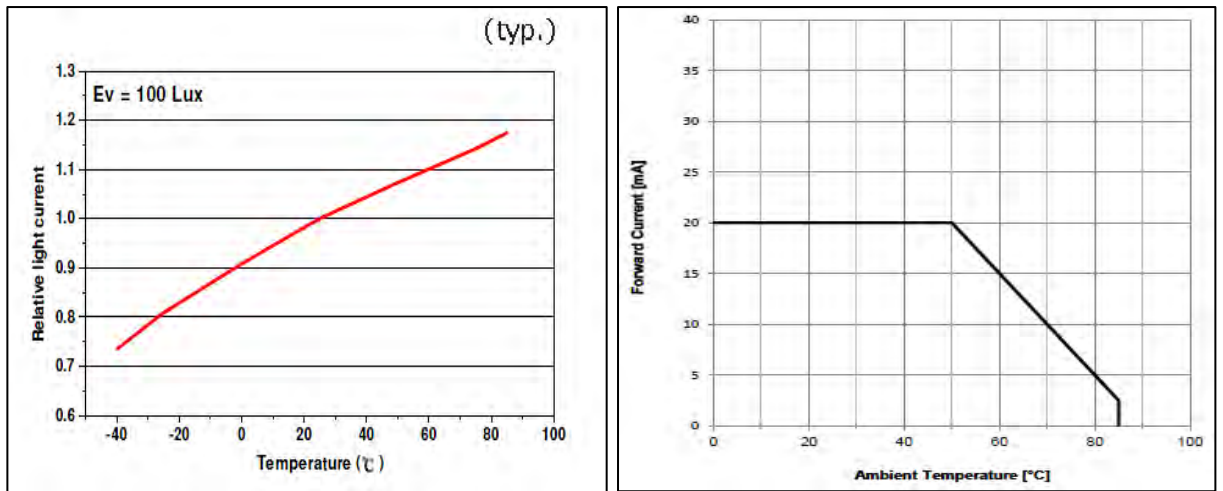


Figura 26. Curvas características del efecto de la temperatura en sensor de luz y fuente de luz respectivamente.

Para el caso de la fuente de luz (LED), la corriente directa de 20mA se mantiene constante hasta los 50°C, luego de lo cual se puede aplicar una ecuación lineal que viene a ser la (15):

$$I_c = -0.5 \cdot T + 45 \quad (15)$$

Donde:

I_c = es el valor de la corriente directa.

T = temperatura en grados Celsius (°C) obtenida del SHT15, para valores superiores a 50°C

3.6.3 Modelamiento matemático

A través del software de Matlab, nuevamente, se propone realizar el modelamiento de la *Concentración(t)* según el modelo de Gompertz, analizado en el capítulo anterior. Tras este modelamiento se obtendrán de manera directa parámetros comparables que permitan dar respuesta a las preguntas biológicas planteadas sobre el crecimiento microbiano, ahondando en ello el cuarto capítulo de la Tesis.

Así también se considera hacer un seguimiento o cinética del crecimiento mediante cultivo por duplicado en placas Petri con medio Agar PDA para determinar la concentración y obtener una curva patrón de comparación y validación del modelo matemático que se propone.

3.7 Prototipos de prueba

3.7.1 Primer prototipo

Las primeras pruebas y experimentos, se realizaron en un prototipo inicial basado en los principios metodológicos descritos en el capítulo anterior, solo que no con la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, sino con gotas de tinta que simulaban el crecimiento microbiano, a medida que se incrementaba su concentración en la solución, como se aprecia en la *Figura 27*. El circuito electrónico para las funciones de espectrometría consta básicamente de un fotoresistor y un LED de luz roja que reaccione, idealmente, con tinta de un color similar. Dichas señales están controladas por un Arduino Mega y analizadas posteriormente en Excel.

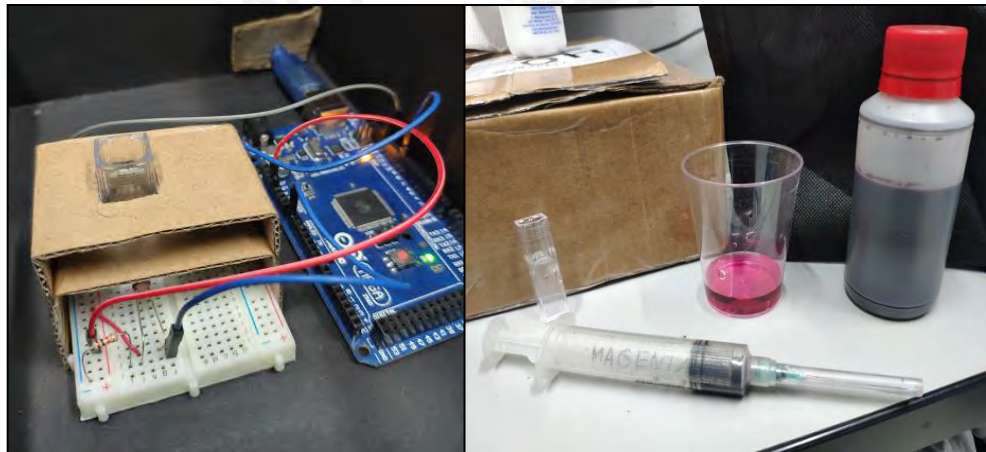


Figura 27. A la izquierda, primer modelo prototipo. A la derecha, frasco de tinta de impresora color magenta y gotero para simular el aumento de la concentración con la adición de mayor número de gotas.

Algunos problemas que presentó este prototipo, fue que la estructura de cartón donde se sostenía el frasco era muy flexible, provocando que este quede descentrado respecto a los elementos de medición y presente marcados errores en el sensado. Otro problema fue que, la medición se realizó dentro de una caja no sellada, de modo que ingresaba luz externa lo que provocaba una alta incertidumbre en el resultado de las lecturas.

Los resultados de estas pruebas permitieron validar la idea de diseño y ahondar en la búsqueda de mejores soluciones. Algunos de estos resultados son los mostrados en la *Figura 28*, donde se aprecia que efectivamente el incremento de la concentración de una solución provoca una disminución de la transmitancia de luz, lo que se refleja en la tensión (ADC) del fotoresistor que capta cada vez menos luz. Así mismo, se ve en la

segunda gráfica que la respuesta del sensor tras activarse no es automática, sino que toma un tiempo en alcanzar su valor asintótico, de 5 a 8 segundos.

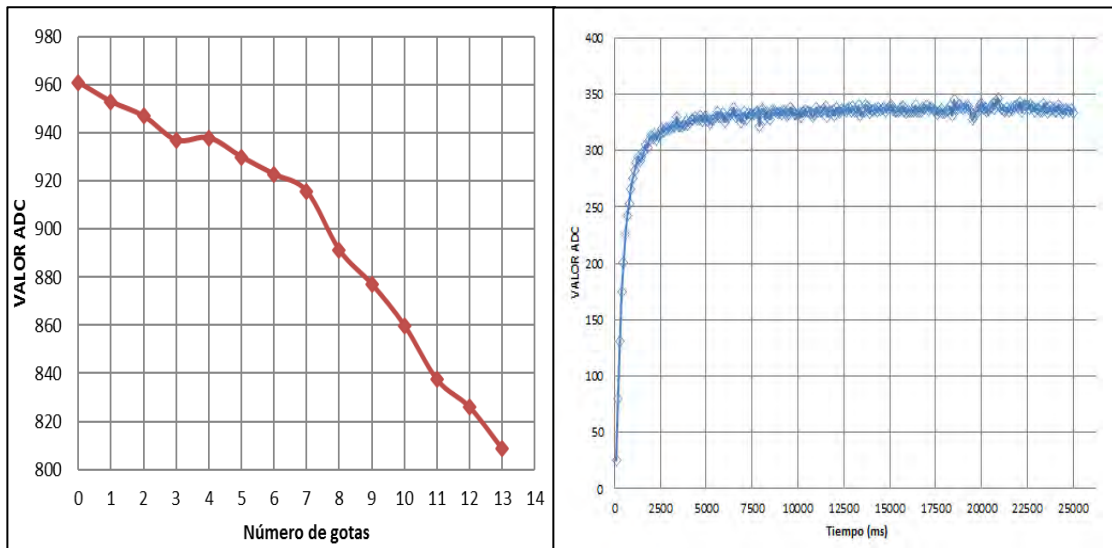


Figura 28. A la izquierda, valor ADC vs. Concentración de tinta por el número de gotas. A la derecha, valor ADC en el tiempo (ms) para una misma concentración de tinta

3.7.2 Segundo prototipo

Tras los inconvenientes en la medición encontrados en el primer prototipo, se construyó un segundo modelo que corregía el movimiento del frasco contenedor, pues cuenta con una estructura más sólida que la mantiene estable, apreciable en la Figura 29. Así mismo se mejoró enormemente en el tamaño respecto al modelo anterior y se agregó una tapa negra que impide el paso de luces externas.

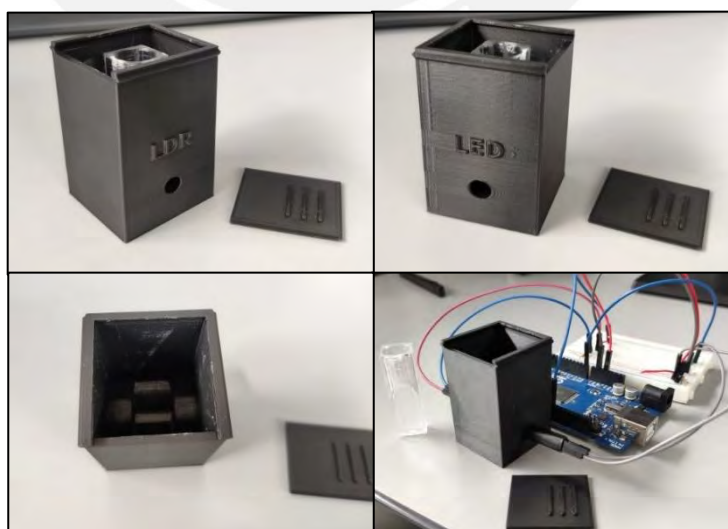


Figura 29. Modelo 3D del contenedor del mini-biorreactor

Este prototipo será usado para trabajar directamente con la levadura en un proceso batch y obtener datos de los experimentos gemelos para ser procesados en Tierra. La operatividad del diseño se presenta en el siguiente capítulo a fin de validar la propuesta de diseño como viable para trabajos futuros.



CAPITULO 4:

ENSAYOS Y RESULTADOS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

4.1 Programa de funcionamiento autónomo.

El programa descrito en los diagramas de flujo del capítulo anterior se encarga de la captura, acondicionamiento y transmisión de datos al bus principal del satélite. Los datos enviados son recibidos en el software de Matlab según parte del programa detallado en la *Figura 30*, extracto encargado de calibrar el espectrofotómetro considerando como datos a la concentración inicial conocida y al valor medido por el sensor para esta. Así mismo, se considera que las mediciones se realizan cada 30 minutos, en un tiempo total de 3 días.

```
Datos = zeros(1,5);
%Lectura de Datos recibidos
Datos(1) = 950; % Valor entre 0-1023 con decimal
Datos(2) = 1; % Desviacion estandar, aprox 1
Datos(3) = 20; % °C
Datos(4) = 90; % Porcentaje de humedad
Datos(5) = 10; % Tiempo (Minutos)
%Formato:
%(1.concentracion, 2.incertidumbre, 3.temperatura, 4.humedad, 5.tiempo)

%Conversion de tensión del Sensor de Luz a su Resistencia (Ley de ohm)
VCC = 5;
R1 = 10000;
V_LDR = Datos(1)*5/1023;
R_LDR = (VCC - V_LDR)*R1/V_LDR;

%Conversión de Resistencia a Iluminancia (Datasheet Sensor de Luz)
R = R_LDR/1000; % Kohm
I = (100./R).^(4/3); % LUX

%Absorbancia = C*b*alfa (Ley de Beer-Lambert)
%Calibrado de valores iniciales
I_0 = 1000; % Intensidad luminosa transmitida sin muestra (lux)
Absorbancia_1 = -log10(I/I_0);
C_1 = 0.25; % Concentracion inicial de la muestra (gotas/ml)
b = 1; % Espesor de la muestra (cm)
alfa = Absorbancia_1/(C_1*b); % Constante de absortividad (ml/gotas*cm)
```

Figura 30. Código de calibración del espectrofotómetro

Los datos para una primera medición, mostrados en la *Figura 31*, son adquiridos conociendo la concentración inicial de la muestra (0.25 gotas/ml) en este caso; con lo que se busca obtener el valor de la constante “alfa” de absortividad, que será usada para las próximas mediciones.

Absorbancia_1	0.1808
alfa	0.7232
b	1
C_1	0.2500
Datos	[950 1 20 90 10]
I	659.4790
I_0	1000
R	0.7684
R1	10000
R_LDR	768.4211
V_LDR	4.6432
VCC	5

Figura 31. Datos de calibración del espectrofotómetro obtenidos con el programa descrito.

De la misma manera, una vez obtenida la constante de absortividad, el resto de las mediciones se realizan automáticamente con otra porción de código similar, para mostrar los datos en una gráfica que incluya la incertidumbre de medida, hallada tras tomar 250 muestras para un mismo punto.

4.2 Datos medidos con el espectrofotómetro

Lo que se busca con estas pruebas es validar el comportamiento esperado del espectrofotómetro construido; para ello, se realizan experimentos con gotas de tinta de un color que presente una longitud de onda asociada cercana a la de la fuente de luz a emplear. Para este caso, se usó tinta amarilla de impresora y un LED comercial color ámbar, como se aprecia en la *Figura 32*.

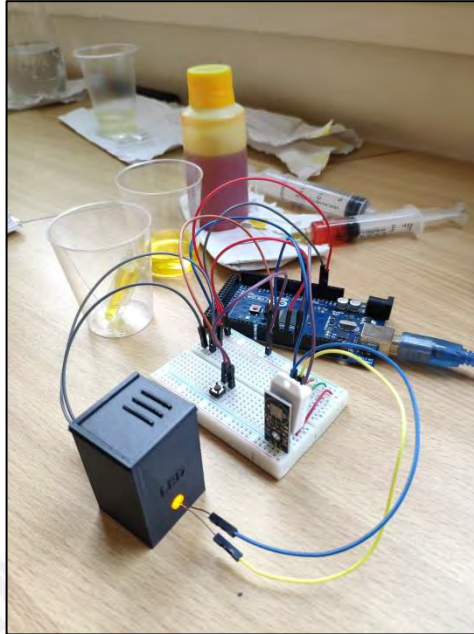


Figura 32. Prototipo de medición por espectrofotometría

Las mediciones fueron realizadas disolviendo gotas de tinta en un vaso de 20 ml de agua mineral que simula el bio-reactor. La concentración de tinta se presenta en la *Tabla 7*. Al conocer las concentraciones que tendrá cada muestra, es posible realizar una analogía con las medidas que se obtendrán del espectrofotómetro, incluyendo la incertidumbre de medición que este aparato presente.

Tabla 7. Valores medidos por el espectrofotómetro para tinta amarilla

N° de muestra	TINTA (N° de gotas)	TINTA (N° GOTAS/ml)	Tensión en Sensor de Luz (0 - 1023 -> 0 - 5V)	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	TIEMPO (seg)
1	5	0.25	983.67	0.47	60
2	5	0.25	983.29	0.47	120
3	5	0.25	983.12	0.45	180
4	5	0.25	982.94	0.41	240
5	5	0.25	982.74	0.45	300
6	6	0.30	975.61	0.49	330
7	7	0.35	969.74	0.47	360
8	8	0.40	968.89	0.62	390
9	9	0.45	965.24	0.45	420
10	10	0.50	976.82	0.41	450
11	12	0.60	964.57	0.52	480
12	14	0.70	975.04	0.37	510
13	16	0.80	974.02	0.43	540

14	18	0.90	974.62	0.48	570
15	20	1.00	971.91	0.43	600
16	23	1.15	972.81	0.48	630
17	26	1.30	974.62	0.49	660
18	29	1.45	975.91	0.43	690
19	32	1.60	973.49	0.5	720
20	35	1.75	971.23	0.47	750
21	39	1.95	971.16	0.48	780
22	43	2.15	972.33	0.51	810
23	47	2.35	975.98	0.33	840
24	51	2.55	976.82	0.48	870
25	55	2.75	972.32	0.57	900
26	60	3.00	971.11	0.41	930
27	65	3.25	970.43	0.52	960
28	70	3.50	969.49	0.5	990
29	75	3.75	968.46	0.46	1020
30	80	4.00	972.57	0.41	1050
31	82	4.10	972.15	0.73	1080
32	84	4.20	973.45	0.56	1110
33	86	4.30	969.82	0.62	1140
34	87	4.35	971.95	0.41	1170
35	88	4.40	970.05	0.44	1200
36	89	4.45	969.85	0.42	1230
37	89	4.45	973.36	0.51	1260
38	89	4.45	973.4	0.49	1290
39	89	4.45	973.41	0.5	1320
40	89	4.45	973.34	0.47	1350

En la última columna de la *Tabla 7*, se agrega un vector tiempo que simule el comportamiento de un microorganismo en sus etapas de latencia, crecimiento exponencial, y población máxima, así como la adición de gotas según la distribución descrita a continuación:

- 5 gotas en 5 muestras cada 60 segundos. (Fase “lag”, de adaptación)
- Agregar 1 gota por muestra, 5 veces cada 30 segundos. (Fase de crecimiento exponencial)
- Agregar 2 gotas por muestra, 5 veces cada 30 segundos. (Fase de crecimiento exponencial)

- Agregar 3 gotas por muestra, 5 veces cada 30 segundos. (Fase de crecimiento exponencial)
- Agregar 4 gotas por muestra, 5 veces cada 30 segundos. (Fase de crecimiento exponencial)
- Agregar 5 gotas por muestra, 5 veces cada 30 segundos. (Fase de crecimiento exponencial)
- Agregar 2 gotas por muestra, 3 veces cada 30 segundos. (Fase de crecimiento exponencial)
- Agregar 1 gotas por muestra, 3 veces cada 30 segundos. (Fase de crecimiento exponencial)
- No Agregar más gotas, 5 veces cada 30 segundos (Fase de máxima población)

Se logra una curva cercana a la ideal, mostrada en la *Figura 33*.

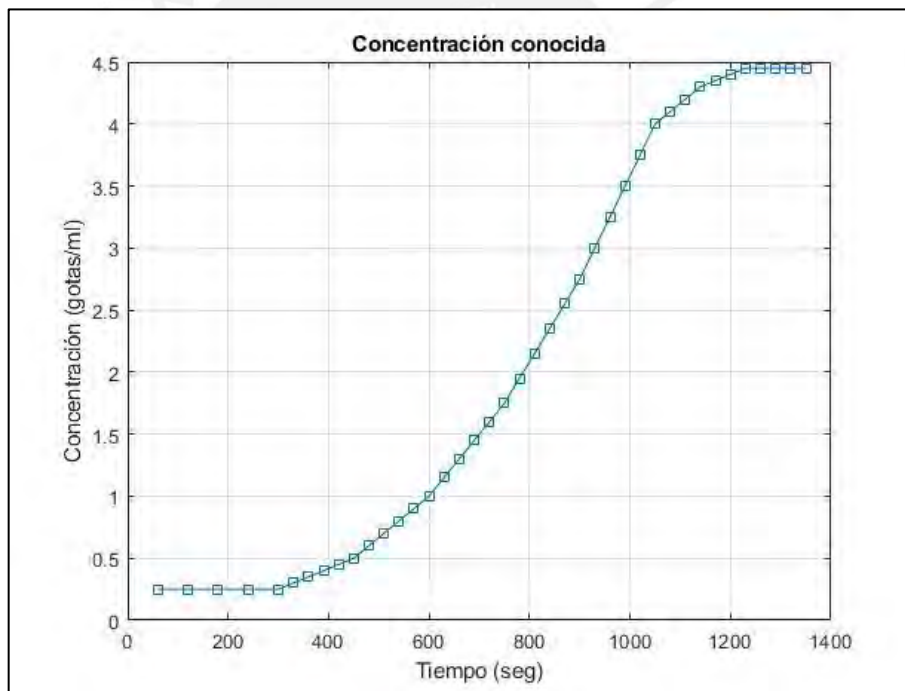


Figura 33. Curva ideal de crecimiento de microorganismo, modelada con tinta amarilla.

Tras obtener la curva ideal mediante este experimento simulando la concentración de las gotas en cada instante de tiempo definido, lo que se busca es obtener una curva cercana a esta pero que sea dada a partir del análisis mediante el espectrofotómetro construido, del cual se obtienen valores que obedecen el comportamiento exponencial

hasta cierto punto, luego del cual se observan medidas muy cercanas entre sí independientemente del incremento de gotas de tinta, como se observa en la *Figura 34*.

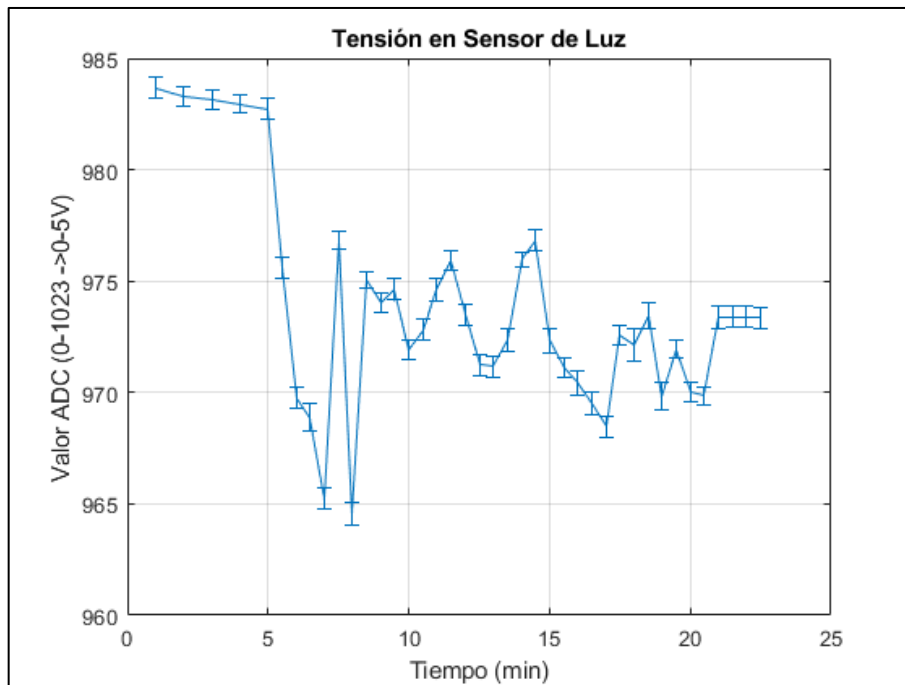


Figura 34. Medición de concentración de tinta con espectrofotómetro

Se concluye que este comportamiento sucede debido a la saturación del elemento cuya concentración se vuelve cercana a la de tinta pura y transmite luz incidida independientemente de la variación de su concentración. Así mismo, este valor oscila entre picos altos y bajos de 970 a 975 productos de la manipulación continua del frasco contenedor de la muestra, que se retiraba del espectrofotómetro para colocar la nueva mezcla de otro recipiente.

Tras procesar los datos medidos, se tiene una gráfica comparativa entre lo real y lo medido, en la *Figura 35*, observándose una aproximación en los primeros valores y en los penúltimos. Fuera de este rango, el equipo se comporta de manera no deseada por las razones concluidas líneas arriba.

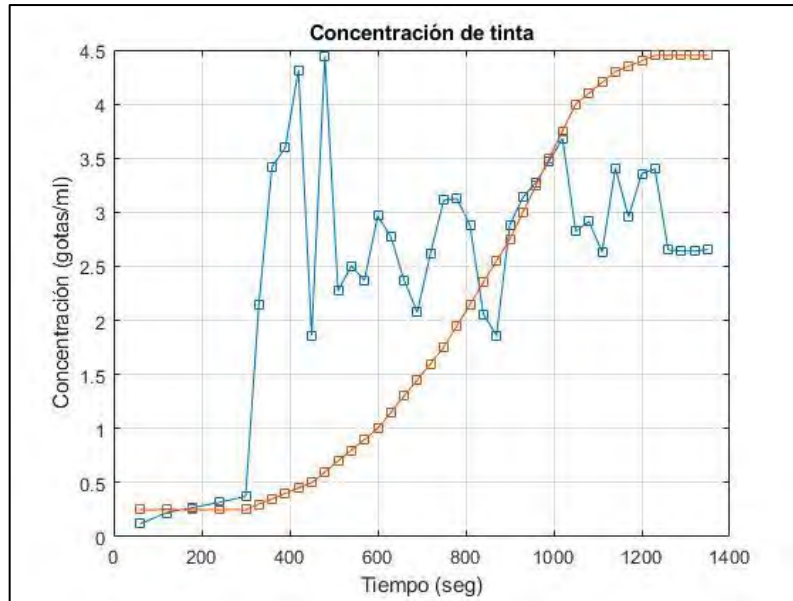


Figura 35. Concentración conocida vs. Concentración hallada

4.3 Pruebas similares con condiciones diferentes

Al realizar un experimento similar con otros colores de tinta y diferente color de luz (roja en este caso), se obtienen gráficas que no presentan una relación lineal entre la luz transmitida y la concentración dada, como sucede en las tintas amarilla y azul de la Figura 36 y la Figura 37, cosa que sí sucede en la tinta roja mostrada en la Figura 38, lo cual se comprende puesto que se trabaja con una luz de un color similar al de esa tinta.

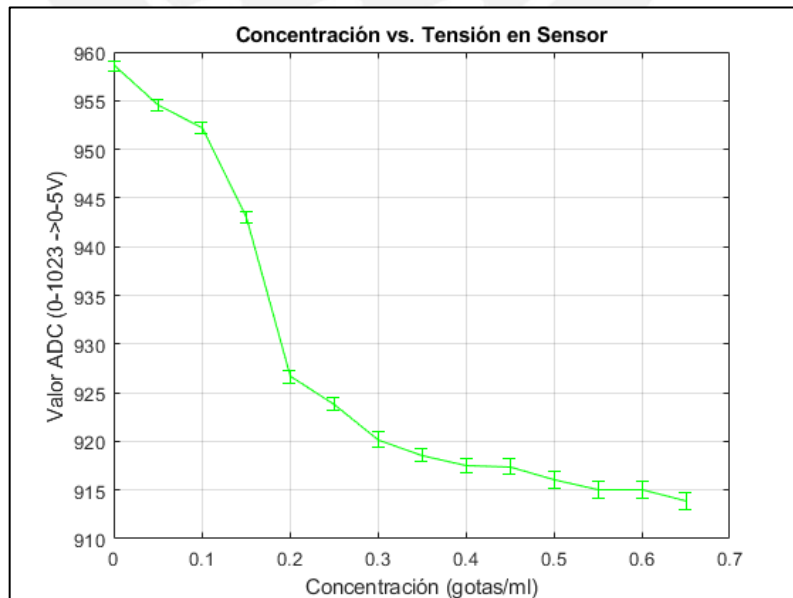


Figura 36. Curva de Concentración de tinta AMARILLA vs. Valor de tensión en el Sensor

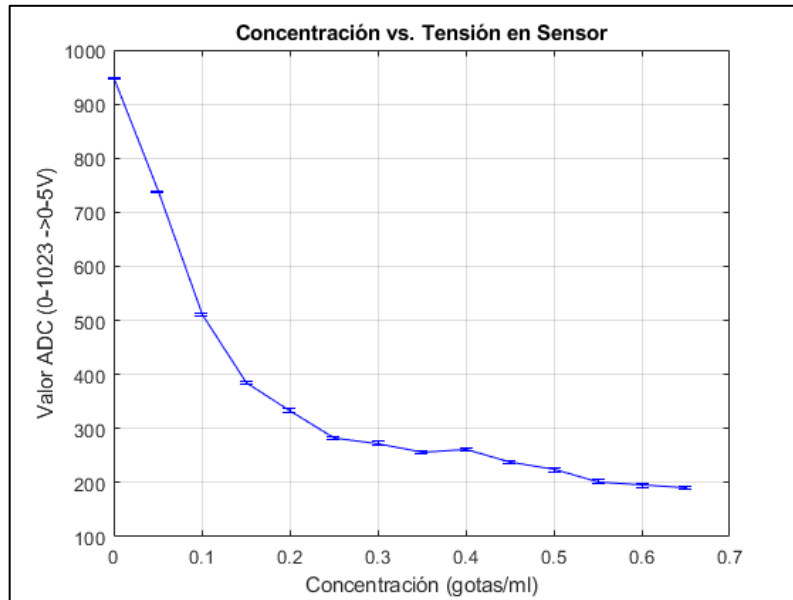


Figura 37. Curva de Concentración de tinta AZUL vs. Valor de tensión en el Sensor

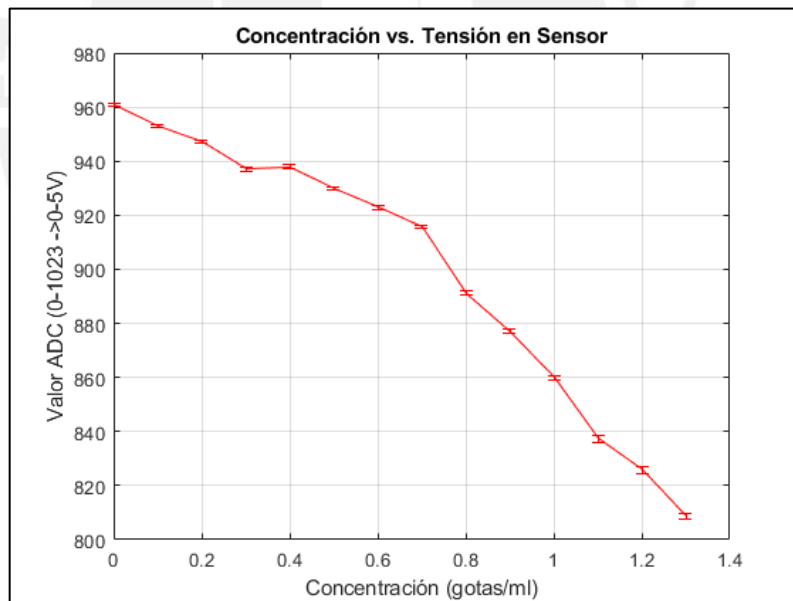


Figura 38. Curva de Concentración de tinta ROJA vs. Valor de tensión en el Sensor

En la *Figura 39* se aprecia las 3 gráficas medidas con el mismo color de luz (roja), donde se evidencia la diferencia en la escala de valores obtenidos. En el caso particular de tinta azul, esta presenta una longitud de onda (<450nm) inferior a la del ancho de banda del

sensor (550nm - 650nm), por lo que la luz que se transmite es mucho menor a medida que incrementa la concentración y prácticamente no se percibe.

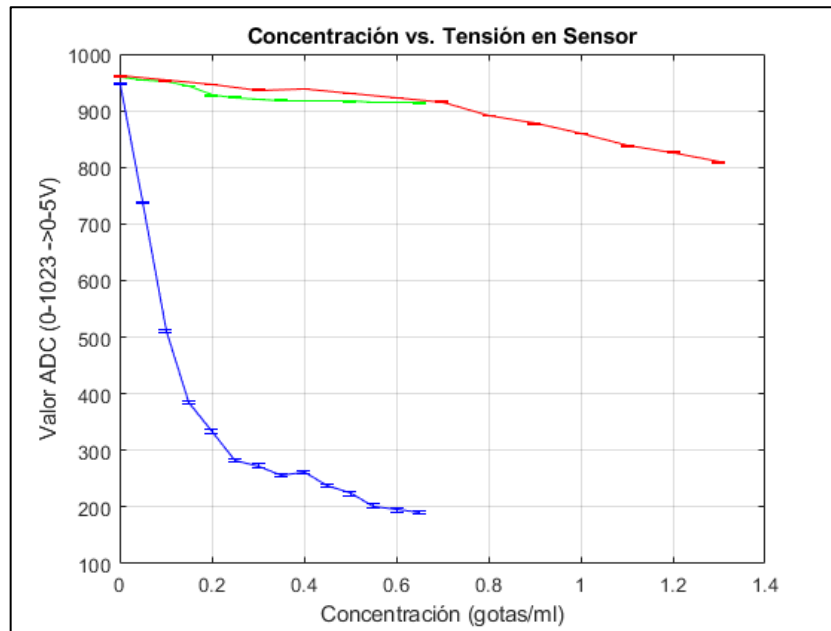


Figura 39. Curva de Concentración de tinta Amarilla vs. Valor de tensión en el Sensor

En los ensayos realizados previos, para una misma concentración conocida, se tomaron 250 muestras, a una tasa de muestreo de 100 milisegundos, del valor analógico de la caída de tensión presente en el sensor de luz al recibir un haz de fotones, obteniéndose distintas medidas que fueron incrementando el valor digital correspondiente hasta alcanzar un valor asintótico estable pasado cierto tiempo.

Por último, en la Figura 40 se ha establecido un vector de tiempo para graficar las concentraciones de tinta roja de la Figura 38 respecto al tiempo (valores asignados), procesando dichos valores por el programa en Matlab para obtener un valor medido conocido. Como resultado, se tiene una curva con una geometría bastante cercana a los valores conocidos de tinta, con una menor amplitud, muy posiblemente debido a que las longitudes de onda de la luz (roja) y la tinta (magenta) son solo cercanas mas no iguales.

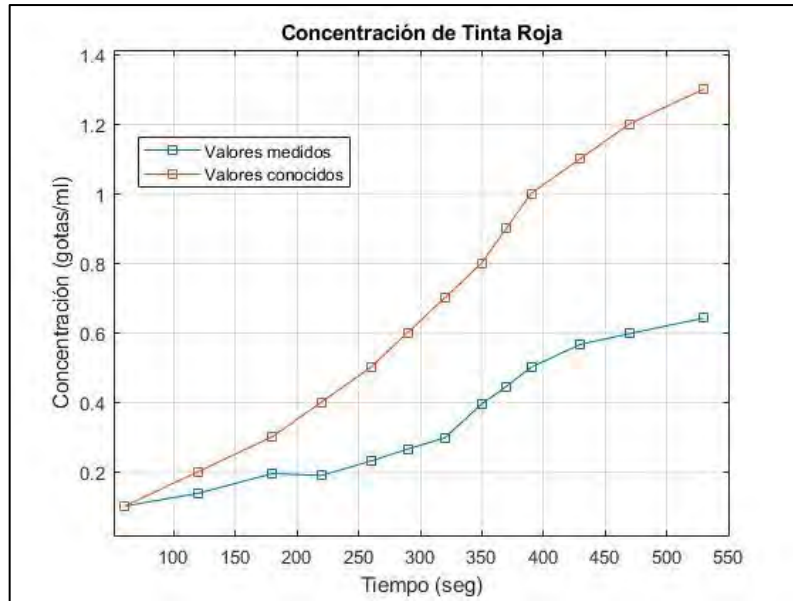


Figura 40. Concentración conocida vs. Concentración hallada (Tinta Roja)

De las mediciones expuestas, se tiene también una curva de respuesta en el tiempo para este sensor, obtenida tras iniciar la toma de medidas al mismo tiempo en el que se enciende la luz del LED, esta curva se aprecia en la *Figura 41*, donde se puede observar que aproximadamente luego de 7.5 segundos de encendido el LED es que se obtiene una medición estable.

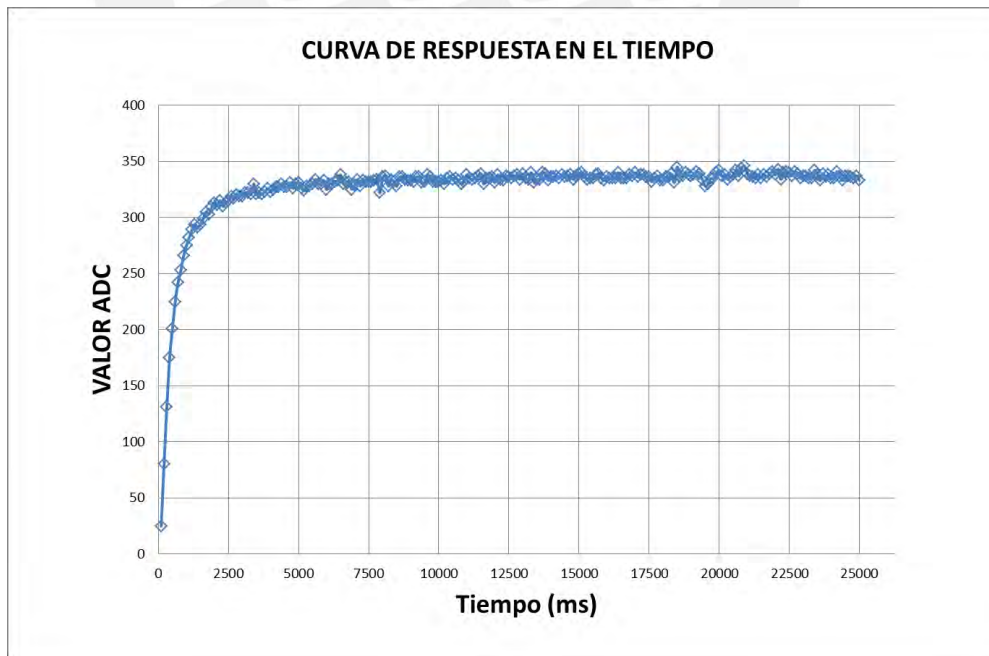


Figura 41. Curva de respuesta en el tiempo del sensor de luz

El valor de 7.5 segundos hallado de manera experimental lo tomamos como 10 segundos para una mayor estabilidad, siendo nombrado “Tstab” y empleado en el código del programa del microcontrolador, como el tiempo a esperar tras encender el LED, previo a la lectura del sensor de luz.

4.4 Balance Energético De Componentes

Como se menciona en el subcapítulo 2.1.4, una importante limitación de este proyecto es la energía, indicada por los parámetros del satélite ThinSat, el cual brindará 200mA de corriente continua dividida en dos puertos de 5V y 3.3V (100mA cada puerto). Para esto, se ha seleccionado los componentes electrónicos de manera que cumplan este requisito. Dichos componentes, en este caso, cumplen con los parámetros eléctricos a nivel de prototipo, pero deben ser reescalados en sus dimensiones físicas para cumplir las limitaciones de tamaño, lo cual se toma en cuenta para proyectos futuros, manteniendo las características de consumo eléctrico detalladas en la *Tabla 8*.

Tabla 8. Consumo energético de los componentes electrónicos seleccionados* [32]

Componente	Modelo	Consumo
Microcontrolador	Arduino Nano	15 mA*
Emisor de luz	LED	14 mA
Sensor de luz	EVERLIGHT	20 mA
Sensor de temperatura y humedad	SENSIRION	5 mA
Resistencias	Genéricas	14mA + 200uA

Los datos de la *Tabla 8* fueron extraídos de las hojas técnicas, analizadas en el capítulo 3. En el caso del microcontrolador, este valor se tomó de una referencia bibliográfica, donde se muestra dicha medición mediante un multímetro digital y un circuito que permita esto [31]. Este valor involucra el consumo generado al enviar los datos al bus del satélite de manera serial.

El consumo de corriente resulta menor a 70mA, no se ha considerado en el cálculo las corrientes parásitas o las pérdidas resultantes por línea de transmisión, puesto que hay

un margen bastante amplio respecto a los 200mA disponibles, que puede cubrir los consumos adicionales. Con este análisis, se satisface uno de los requerimientos principales sobre el suministro de energía.

4.5 Etapa de comunicaciones

Como se menciona en el capítulo 3, el envío de datos es dado al satélite principal por comunicación serial según los parámetros indicados, y este, envía los datos a Tierra para poder obtenerlos en un archivo CSV y analizarlos en el Software de Matlab, cuyo extracto se detalla al principio de este capítulo. Sin embargo, para la etapa de prototipo, se ha usado módulos de transmisión de radio RFM69 del fabricante HOPE MICROELECTRONICS, enviando los paquetes de información a una frecuencia de 430MHz, correspondiente a la banda ISM, el cual recibe mediante el mismo formato que el propuesto para el ThinSAT. Se han usado las librerías del desarrollador LowPowerLab para Arduino, las cuales facilitan el manejo y envío de información. Con esta etapa se tiene en tiempo real los datos del Espectrofotómetro diseñado, cumpliendo uno de los objetivos específicos, complementándose con el Software de interpretación de datos desarrollado en Matlab.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha diseñado y construido un espectrofotómetro básico de reducido tamaño, capaz de medir la concentración de una muestra asociada a las condiciones de la ley de Beer-Lambert para dar soporte a un experimento microbiano en una carga útil que puede ser llevada en un satélite si bien el tamaño aún no corresponde con las dimensiones del modelo ThinSat todos los demás elementos han sido diseñados considerando este tipo de satélite y el cumplir las condiciones extremas del espacio externo.

Como resultado de este proyecto, se identifican los siguientes aportes:

- El sistema de medición por espectrometría ha sido diseñado e implementado; así como probado en su funcionamiento con tintas de diferentes colores mostrando sensibilidad por la longitud de onda usada.
- Para el diseño se ha hecho una sencilla evaluación de la cantidad de energía máxima a ser usada, de modo que esta es de 70 mA, mucho menor que 200 mA que es la energía tope a ser usada en el satélite; permitiendo que sea viable el empleo de los componentes electrónicos propuestos o algunos de similares características eléctricas dentro del campo de la microelectrónica.
- El sistema diseñado para la captura de la señal del sistema fotométrico considera 250 tomas en 100 ms con una incertidumbre de alrededor 1 nivel digital (entre 0 y 1023) menor al 15 % deseado y un empaquetamiento de datos menor a 35 bytes.
- Se logra una forma de evaluación cuantitativa de medición del crecimiento microbiano donde el resultado es un valor escalar que facilita su transmisión.
- Se logra una estabilidad en la medición hasta cierto punto de saturación en la que no se presentarán cambios en el valor medido de luz transmitida, por más que se intente elevar la concentración, pues alcanzó un límite cuantificable.

RECOMENDACIONES

- Es necesario pasar por una etapa de implementación e integración con las demás áreas involucradas en el proyecto para obtener un experimento completo y llegar a considerar el envío de esta carga útil al espacio en el satélite ThinSat.
- Se debe dar mayor robustez y mejor fijación a los focos del emisor y sensor de luz del prototipo para evitar desprendimientos y movimientos laterales y lograr una menor incertidumbre entre mediciones, para ello se puede mejorar el diseño en CAD 3D de la estructura soporte y probar su funcionamiento mediante pruebas de robustez y vacío que soporten la etapa de lanzamiento.
- Se recomienda agregar un sensor de radiación cósmica, para que al estar el experimento en el espacio y se sufran las consecuencias de este factor, se pueda llevar una cuenta cuantitativa de ello.
- El modelo propuesto es a nivel prototipo, que cumple con los requerimientos electrónicos y se ha buscado un tamaño reducido; sin embargo, es recomendable dimensionar los componentes aún más para un diseño final, mediante la microelectrónica, con el fin de que cumpla con el limitado espacio de la carga útil del satélite modelo ThinSat, u otros de su tipo.

TRABAJOS FUTUROS

Como se mencionó en el capítulo 3, el diseño propuesto se complementa por otras tareas, que se vienen ejecutando en el INRAS – PUCP como la del suministro de los nutrientes al mini-biorreactor.

Este trabajo, si bien fue diseñado según los parámetros del ThinSat, puede ser adaptado para otros tipos de satélites como carga útil, así también para un experimento a realizarse en la Estación Espacial Internacional.

Es posible trabajar en un futuro con otros microorganismos diferentes a *Saccharomyces cerevisiae*. El presente trabajo abre las puertas a otros experimentos con distintas condiciones de prueba, que puede incluir diferentes organismos tanto anaeróbicos como aeróbicos, previo estudio de un ambiente presurizado para su crecimiento en el espacio.

BIBLIOGRAFÍA:

- [1] California Polytechnic State University, «CubeSat Design Specification Rev. 13,» The CubeSat Program, Cal Poly SLO, California, 2014.
- [2] E. A. Gonzales Jarama, «DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA UN EXPERIMENTO DE MICROBIOLOGÍA EN UN PICOSATÉLITE,» INRAS - PUCP, Lima, Perú, 2017.
- [3] R. Nugent, R. Munakata, A. Chin, R. Coelho y J. Puig-Suari, «The CubeSat: The Picosatellite Standard for Research and Education,» AIAA SPACE 2008 Conference & Exposition, San Diego, California, 2008.
- [4] A. Chin, «Research Gate,» Septiembre 2008. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/242172999_CubeSat_The_Pico-Satellite_Standard_for_Research_and_Education.
- [5] M. F. Diaz-Aguado, S. Ghassemieh, C. VanOutryve, C. Beasley y A. Schooley, «Small Class-D Spacecraft Thermal Design, Test and Analysis – PharmaSat Biological Experiment,» IEEE, Estados Unidos, 2009.
- [6] A. J. Ricco, M. Parra, D. Niesel, M. Piccini, D. Ly, M. McGinnis, A. Kudlicki, J. W. Hines, L. Timucin, C. Beasley, R. Ricks, M. McIntyre, C. Friedericks, M. Henschke, R. Leung, M. Diaz-Aguado, C. Kitts, I. Mas, M. Rasay, E. Agasid, E. Luzzi, K. Ronzano, D. Squires y B. Yost, «PharmaSat: Drug dose response in microgravity from a free-flying integrated biofluidic/optical culture-and-analysis satellite,» Proceedings SPIE Digital Library, 2011.
- [7] A. L. Bueno Grey, «DISEÑO DEL SISTEMA DE TOMA DE FOTOGRAFÍAS PARA EL MONITOREO DE UN MICROORGANISMO EN CONDICIONES DE MICROGRAVEDAD EN ÓRBITA TERRESTRE,» INRAS - PUCP, Lima, Perú, 2014.
- [8] C. A. Vilcherrez Zárate, «DISEÑO DE UN SISTEMA DE REGISTRO DE IMÁGENES USANDO MICROSCOPIA DE BARRIDO DE PERSPECTIVA DE SUB-PÍXEL (SPSM) PARA ENSAYOS CON MICROORGANISMOS EN ÓRBITA,» INRAS - PUCP, Lima, Perú, 2016.
- [9] TWIGGS SPACE LAB, LLC, «TSL Primary and Secondary Payload Boards (TSLPB & TSLSB), Interface Control Document (ICD),» Virginia, Estados Unidos, 2018.
- [10] NearSpace Launch Inc., «ET-Sat. Student Payload REV. A Board. Interface Control Document (ICD),» Indiana, Estados Unidos, 2018.

- [11] B. Piña, «Seres modélicos, Entre la naturaleza y el laboratorio,» 20 Agosto 2019. [En línea]. Available: <http://seresmodelicos.csic.es/llevat.html>.
- [12] M. E. Raffino, «Célula Eucariota,» 15 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://concepto.de/celula-eucariota/>.
- [13] A. V. Carrascosa, «Imágenes laboratorio - Galería Multimedia (CSIC), Delegación de Cataluña,» 04 Setiembre 2019. [En línea]. Available: <http://seresmodelicos.csic.es/img/source/llevat/laboratori-gran/estacipla13.jpg>.
- [14] F. S. Collins, «Genoma,» 24 Julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Genoma>.
- [15] P. Rubio, «Del genoma de la levadura al del hombre,» *CIENCIA Y SALUD – LA VANGUARDIA*, p. 3, 27 Abril 1996.
- [16] Plan Ceibal, «Reino de los Hongos,» 13 08 2019. [En línea]. Available: https://contenidos.ceibal.edu.uy/fichas_educativas/_pdf/ciencias-naturales/reino-de-los-hongos/006-levadura.pdf.
- [17] E. Echandi, «Preparación y dispensación de Medios de Cultivo,» de *Manual de Laboratorio para fitopatología general*, Turrialba, Costa Rica, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, 1967, p. 44.
- [18] J. Aguilar, M. Espinoza, J. Cabanillas, D. Tacanga, I. Zuta y G. Linares, «Evaluación de la cinética de crecimiento de *Saccharomyces Cerevisiae* utilizando un medio de cultivo a base de melaza de caña y suero lácteo,» *Agroindustrial Science, Revista Científica de la Universidad de Trujillo*, pp. 37-47, Vol. 5, Núm. 1, 2015.
- [19] C. Suárez-Machín, N. A. Garrido-Carralero y C. A. Guevara-Rodríguez, «Levadura *Saccharomyces Cerevisiae* y la producción de alcohol,» ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, La Habana, Cuba, 2016.
- [20] P. Benito Sáez, «Conducción de la Fermentación Alcohólica en el Vino,» Urbina Vinos Blog, 24 02 2019. [En línea]. Available: <http://urbinavinos.blogspot.com/2017/02/conduccion-de-la-fermentacion.html>. [Último acceso: 11 11 2019].
- [21] «El Espectrofotómetro,» 24 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://elespectrofotometro.com/transmitancia-y-absorbancia/>.

- [22] E. M. García Martínez, «Aplicación de la ley de Lambert-Beer en espectroscopía UV-visible,» 12 Octubre 2013. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=xJZIOOkvTOo>.
- [23] N. Abril Diaz, J. A. Bárcena Ruiz, E. Fernández Reyes, A. Galván Cejudo, J. Jorin Novo, J. Peinado Peinado, F. T. Meléndez-Valdés y I. Túnes Fiñana, «Espectrofometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas,» Departamento de Bioquímica y Biología Molecular, Campus Universitario de Rabanales, Córdoba, 2016.
- [24] L. Frunzo, R. Garra, A. Giusti y V. Luongo, «Modeling biological systems with an improved fractional Gompertz law,» *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, pp. 260-267, Vol. 74, 2019.
- [25] J. A. Sánchez Gonzales, «Determinación de la curva de crecimiento por modelo de Gompertz,» Laboratorio de biotecnología de los productos agroindustriales, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú, 2012.
- [26] C. J. Torres García y J. C. Torres Guzmán, «OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LEVADURAS CON INTERÉS BIOTECNOLÓGICO,» Departamento de Biología, División Ciencias Naturales y Exactas, Guanajuato, 2017.
- [27] F. Becerra, «PATRONES DE CONDUCTA FACIAL, PARA IDENTIFICAR ACCESOS INFORMÁTICOS NO AUTORIZADOS,» ResearchGate, Chiclayo, 2019.
- [28] Würth Elektronik, «WL-SMCW SMT Mono-color Chip LED Waterclear – DATASHEET,» Würth Elektronik, 2019.
- [29] AVAGO TECHNOLOGIES, «Miniature Ambient Light Photo Sensor with Digital (I2C) Output,» AVAGO TECHNOLOGIES, 2008.
- [30] E. AMERICAS, «EAALST05RDMA0 Ambient Light Sensor – DIP 5mm T-1 ¾ - DATASHEET,» EVERLIGHT AMERICAS, 2014.
- [31] Sensirion AG, «Datasheet SHT1x,» Sensirion AG, 2017.
- [32] J. C. Macho, «PROMETEC,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.prometec.net/consumos-arduino/>. [Último acceso: 18 11 2019].
- [33] Twiggs Space Lab, Virginia Space, Orbital ATK, «ThinSat Program,» Virginia, Estados Unidos, 2018.
- [34] P. Ehrenfreund, A. J. Ricco, D. Squires, C. Kitts, E. Agasid, N. Bramall, K. Bryson, J. Chittenden, C. Conley, A. Cook, R. Mancinelli, A. Mattioda, W. Nicholson, R. Quinn, O.

Santos, G. Tahu, M. Voytek, C. Beasley, L. Bica, M. Diaz-Aguado, C. Friedericks, M. Henschke, D. Landis, E. Luzzi, D. Ly, N. Mai, G. Minelli, M. McIntyre, M. Neumann, M. Parra, M. Piccini, R. Rasay, R. Ricks, A. Schooley, E. Stackpole, L. Timucin, B. Yost y A. Young, «The O/OREOS mission—Astrobiology in low Earth orbit,» ScienceDirect, Estados Unidos, 2012.

