

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MONITOREO PARA UN  
EXPERIMENTO DE MICROBIOLOGÍA EN UN  
PICOSATÉLITE**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico, que presenta el bachiller:

**Erick Andrés Gonzales Jarama**

ASESORES: Dr. Jorge Heraud P.  
Dra. Sayda Mujica B.

**Lima, Marzo de 2017**

## **RESUMEN**

Esta investigación tiene como objetivo diseñar la infraestructura y el sistema que permita monitorear el crecimiento de un microorganismo, relacionado a cultivos peruanos, en el espacio exterior en un picosatélite como carga útil, totalmente autónomo, para ser comparado con un experimento idéntico y simultáneo en Tierra.

El experimento considera: asegurar que el inicio se dé cuando el satélite se encuentre en órbita, por lo tanto el microorganismo estará en estado de latencia hasta el momento que se envíe la señal de inicio; monitorear el crecimiento del microorganismo mediante la toma de fotografías y el sensado de las condiciones del ambiente como temperatura y humedad relativa. Todo esto debe ser controlado por un sistema integral y soportarse sobre los sub-sistemas de comunicación y energía del picosatélite.

Esta investigación ha logrado identificar los componentes necesarios para llevar a cabo este experimento bajo las condiciones descritas, diseñando un sub-sistema para el control del inicio del experimento utilizando una microválvula, diseñando un sub-sistema que cuenta con una cámara fotográfica, iluminación artificial y un lente que asegurará la correcta visualización de manera uniforme y diseñando un sub-sistema de monitoreo de temperatura y humedad relativa. Todos estos sub-sistemas se controlan desde el microprocesador central del picosatélite. Se presenta como resultado de este diseño un prototipo de la infraestructura y sub-sistema de inicio, simulaciones de toma de fotografías y pruebas de utilización del sensor de temperatura y humedad relativa.

Con esta investigación se obtiene un primer estudio y diseño para el desarrollo de esta carga útil, que posteriormente debe ser implementada y ensamblada junto con todos los componentes del picosatélite.



### TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Diseño de un Sistema de Monitoreo para un Experimento de Microbiología en un Picosatélite  
Área : Electrónica # 359  
Asesores : Dr. Jorge Heraud,  
Dra. Sayda Mujica  
Alumno : Erick Andres Gonzales Jarama  
Código : 20050391  
Fecha : 21 de Octubre de 2009



#### Descripción y Objetivos

El Instituto de Radioastronomía de la Pontificia Universidad Católica del Perú está empeñado en realizar el lanzamiento del primer picosatélite en el Perú, denominado PUCP-SAT 1. Como parte de este proyecto, se desarrollan distintos experimentos que constituyen la carga útil para el satélite. Uno de estos experimentos consiste en observar el crecimiento de un microorganismo en las condiciones extremas del espacio.

El objetivo de esta tesis es diseñar un sistema que permita controlar el monitoreo de un experimento de microbiología, en órbita baja, de manera autónoma.

Para esto, los objetivos específicos que se plantean para realizarlo son:

- Diseñar la infraestructura que asegure el crecimiento del microorganismo.
- Diseñar el control del monitoreo del experimento
- Diseñar el sistema de monitoreo del crecimiento del microorganismo mediante fotografías.

*Jorge Heraud*

*Sayda Mujica*

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

*Daniel Torre Alva Davila*

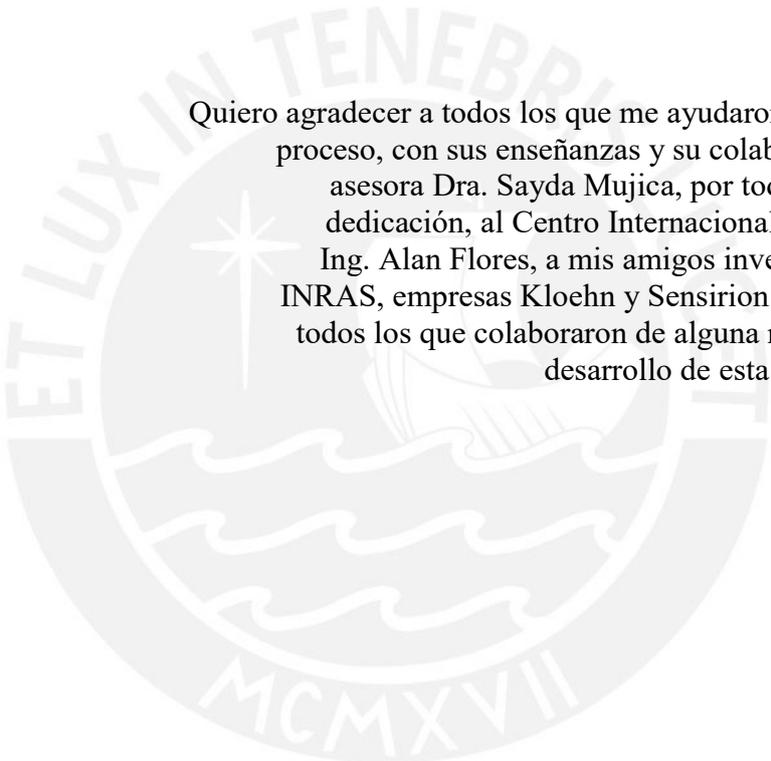
ING. DANIEL TORRE ALVA DAVILA  
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

MÁXIMO 50 PÁGINAS

*[Handwritten signature]*



*Este trabajo y todo el esfuerzo es dedicado a mi madre quien lo dio todo para que nuestros sueños se cumplan y la motivación para seguir adelante.*



Quiero agradecer a todos los que me ayudaron en este largo proceso, con sus enseñanzas y su colaboración. A mi asesora Dra. Sayda Mujica, por todo su tiempo y dedicación, al Centro Internacional de la Papa, al Ing. Alan Flores, a mis amigos investigadores del INRAS, empresas Kloehn y Sensirion y en general a todos los que colaboraron de alguna manera para el desarrollo de esta investigación.

# ÍNDICE

ÍNDICE.....	v
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1: PICOSATÉLITES Y ASTROBIOLOGÍA.....	2
1.1. Inicio del Proyecto CubeSat.....	2
1.1.1. Altos niveles de investigación y bajo costo.....	3
1.1.2. Fines netamente educacionales.....	3
1.2. Desarrollo de proyectos microbiológicos espaciales autónomos.....	4
1.3. Experimento de Microbiología en el PUCP-SAT 1.....	6
CAPÍTULO 2: CONSIDERACIONES PARA EL EXPERIMENTO DE MICROBIOLOGÍA EN UN PICOSATÉLITE.....	8
2.1. Consideraciones locales para el desarrollo de la carga útil microbiana dentro de un Pico-satélite.....	8
2.2. Microorganismo a estudiar: Tizón tardío.....	9
2.3. Factores del espacio que afectan el crecimiento biológico.....	10
2.3.1. Radiaciones.....	10
2.3.2. Rayos Cósmicos.....	11
2.3.3. Microgravedad.....	12
2.3.4. Temperatura.....	12
CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE DISEÑO Y ENSAYO DE LAS PARTES.....	14
3.1. Objetivos del Diseño.....	14
3.1.1. Objetivo general.....	14
3.1.2. Objetivos específicos.....	14
3.2. Propuesta de las etapas del proyecto.....	15
3.3. Alcances de la Investigación.....	17
3.4. Desarrollo de los sub-sistemas que componen la investigación.....	17
3.4.1. Diseño de la infraestructura del experimento.....	17
3.4.1.1. Diagrama de bloques para el control y monitoreo del experimento.....	19
3.4.1.2. Separación de medios durante el estado de latencia.....	19
3.4.2. Diseño de la infraestructura para el crecimiento del microorganismo.....	20
3.4.3. Diseño de los elementos para el monitoreo de temperatura y humedad relativa en la cámara de crecimiento.....	23
3.4.4. Diseño del sistema de monitoreo por fotografías.....	25
3.4.5. Propuesta de diseño del sistema de monitoreo electrónico.....	28
CAPÍTULO 4: ENSAYOS Y RESULTADOS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA.....	31

4.1. Puesta a punto y prueba de la infraestructura para asegurar el crecimiento del microorganismo .....	31
4.2. Control del Monitoreo del Experimento .....	36
4.3. Sub-sistema de Toma de Fotografías .....	40
4.3.1. Análisis de espectro de los LED's.....	40
4.3.2. Simulación del lente escogido .....	41
4.3.3. Fotografías esperadas .....	42
4.4. Análisis Volumétrico del Experimento .....	43
CONCLUSIONES.....	45
RECOMENDACIONES .....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	48



## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de picosatélites “CubeSat” es cada vez más difundido entre universidades y compañías privadas, ya se han lanzado más de 100 CubeSats al espacio desde el 2003. En el Perú el PUCP-SAT 1 fue la primera vez que se trabajó con este tipo de satélites, al ser pequeños y con un estándar probado se torna más factible por su bajo costo y un desafío por el alto nivel de investigación que involucra; lo que permite conocer sobre la complejidad de realizar proyectos en éste rubro, así como superar las limitaciones asociadas a éste tipo de satélites y formar profesionales en nuevas áreas.

El PUCP-SAT 1 fue un proyecto satelital desarrollado en el INRAS- PUCP. El avance logrado en este proyecto ha permitido a la universidad liderar el campo de la Ciencia Aeroespacial a nivel nacional y de Sudamérica, ampliando los horizontes de investigación a áreas como el espacio circunterrestre, el estudio de la magnetósfera, los sismos y la Astrobiología.

El proyecto PUCP-SAT 1 tuvo como propósito realizar diversos experimentos dentro del satélite, llamados cargas útiles, entre ellos un experimento de microbiología el cual es motivo del presente trabajo y busca diseñar la infraestructura y el sistema para el monitoreo de éste en un picosatélite de manera completamente autónoma; así como registrar el crecimiento del microorganismo expuesto a las condiciones del espacio exterior como son: gravedad cero, vacío y exposición a rayos cósmicos.

# **CAPÍTULO 1: PICOSATÉLITES Y ASTROBIOLOGÍA**

Desde hace miles de años la humanidad se pregunta sobre el origen y la evolución del universo, la aparición del hombre y su evolución. Actualmente miles de personas y organizaciones alrededor del mundo siguen trabajando para responder las mismas preguntas; según la NASA preguntas básicas como: ¿qué hay en el espacio exterior?, ¿cómo llegamos allí?, ¿qué encontraremos allí?, ¿lo que podamos aprender hará que la vida en la Tierra sea mejor? [1]. La necesidad que tiene el hombre por responder estas preguntas lo ha llevado desde tiempos inmemorables a observar el espacio y crear herramientas que le ayuden a comprenderlo mejor.

La Astrobiología es una ciencia interdisciplinaria que se enfoca originalmente en la búsqueda de vida en otros planetas, sin embargo abre las puertas para muchas otras preguntas relacionadas con el espacio y las Ciencias Biológicas. Una de ellas y uno de los aspectos fundamentales en el que se centra la Astrobiología es determinar cómo será la vida en el futuro en la Tierra y en el espacio. Para esto se reconocen dos ámbitos de investigación: primero, reconocer cómo responden los ecosistemas vivos a los cambios en el medio ambiente a lo largo del tiempo; y segundo, entender cómo responden los organismos en el espacio exterior o en otros planetas. Esta última meta de investigación cubre la discusión controversial sobre la transferencia de vida entre distintos planetas [2].

El presente estudio se centra en el modelo CubeSat (picosatélite) como plataforma para un experimento de microbiología autónomo en el espacio exterior, enmarcado en el ámbito de la Astrobiología y su búsqueda por entender los efectos del espacio exterior sobre los organismos vivos, específicamente en microorganismos.

## **1.1. Inicio del Proyecto CubeSat**

En 1994, el Profesor Robert Twiggs, Director del Laboratorio de Desarrollo de Sistemas Espaciales del Departamento de Aeronáutica y Astronáutica de la Universidad de Stanford, planeó diseñar, construir y lanzar un satélite en un tiempo

menor a un programa de maestría, un año y medio, con fines académicos. Sin embargo, con su proyecto OPAL (Orbiting Picosatellite Automated Launcher) y otros microsátélites esto se tornó imposible, debido a que eran demasiado complejos.

#### 1.1.1. Permite altos niveles de investigación y bajo costo

Ante esta situación Twiggs ideó un nuevo estándar, los CubeSats, que son cubos de 10 centímetros por lado y menos de un kilogramo de peso y por eso son clasificados como “picosatélites”; su costo es de aprox. \$ 35000 y se pueden construir en alrededor de un año. Según Twiggs: *“...los CubeSats son como “buses satélite”, ya que cada uno incluye una carga espacial del tamaño de una caja de jugo. Una gran cantidad de personas está entusiasmada ya que pueden ser usados de manera conjunta, de esta manera se pueden tomar medidas de una constelación de CubeSats sobre una gran área en lugar de un solo punto. Las potenciales aplicaciones para picosatélites son todavía desconocidas...”* [3].

#### 1.1.2. CubeSats en la educación

La primera misión que se llevó a cabo fue el Eurorocket 2003, que incluyó 14 CubeSats de 10 universidades diferentes y una compañía privada, todos coordinados a través de la Universidad Politécnica de California (CalPoly). Aunque su lanzamiento no tuvo éxito, sentó el inicio para nuevas misiones con este tipo de satélites [4].

De esta manera el proyecto CubeSat desarrollado por la Universidad Politécnica de California, San Luis Obispo y el Laboratorio de Desarrollo de Sistemas Espaciales de la Universidad de Stanford brindan la posibilidad de lanzamientos de satélites a universidades que antes no tenían acceso a éste tipo de estudios en el espacio.

Diversas universidades del mundo se han unido a la comunidad CubeSat; hoy son más de 60 universidades y colegios participantes de este programa, los beneficios educacionales son tremendos. Los estudiantes desarrollan las habilidades y experiencias necesarias para triunfar en la industria aeroespacial trabajando en estos

proyectos. El programa CubeSat también beneficia a empresas privadas y estatales proveyéndoles formas de bajo costo para enviar cargas al espacio, todo esto al mismo tiempo que se crean importantes oportunidades educacionales para los futuros líderes de la industria [5].

## 1.2. Desarrollo de proyectos microbiológicos espaciales autónomos

En el espacio existen condiciones distintas a las que tenemos en la Tierra, entre las que se pueden mencionar la gravedad cero, vacío, presencia de rayos cósmicos y altos niveles de radiación. Toda forma de vida que pudiera ubicarse en este ambiente es afectada por la acción de estas condiciones, es por esto que se realizan diferentes estudios y experimentos biológicos en el espacio para obtener información de los efectos que éstos podrían causar en los seres vivos y en el cuerpo humano.

Se han realizado diversos experimentos biológicos en el espacio, sin embargo estos se realizaban en misiones espaciales tripuladas, lo que los hace costosos y poco prácticos, ya que tiene que pasarse por largos períodos de espera y las universidades no tienen facilidad de acceso (o nula) a los transbordadores espaciales.

Se han iniciado también lanzamientos no tripulados, dentro de estos cabe mencionar, por su relación con los CubeSAT, el proyecto GeneSat-1, el cual tenía como propósito validar los satélites CubeSat de bajo costo como una nueva plataforma para la investigación en ciencias de la vida espacial. El GeneSat-1 fue lanzado el 16 de diciembre de 2006 y llevaba dentro la bacteria *Escherichia coli*. (*E.coli*). Este es un satélite con configuración  $10 \times 10 \times 30 \text{cm}^3$  que presenta numerosas innovaciones; para cumplir con las múltiples exigencias de las limitaciones y capacidades de su tamaño. Un satélite de este tamaño no puede ofrecer muestras de retorno, a la vez que debe ser completamente autónomo. Una vez ensamblado el satélite y sus cargas con la nave espacial éstas son inaccesibles, por lo que debe estar programado para iniciar automáticamente una vez que entre en órbita baja cuando sea liberado desde la nave; así por ejemplo la integración del GeneSat-1 con su plataforma de lanzamiento ocurrió

4 semanas antes de la fecha programada de lanzamiento de la nave espacial, por lo tanto los micro-organismos y los reactivos debían sobrevivir 6 semanas antes de iniciar el experimento (teniendo una precaución de 2 semanas por posibles retrasos). La transición y comunicación directa desde la base con el satélite es posible solo unos pocos minutos cada día, tornando así imposible el control humano de sus subsistemas [6].

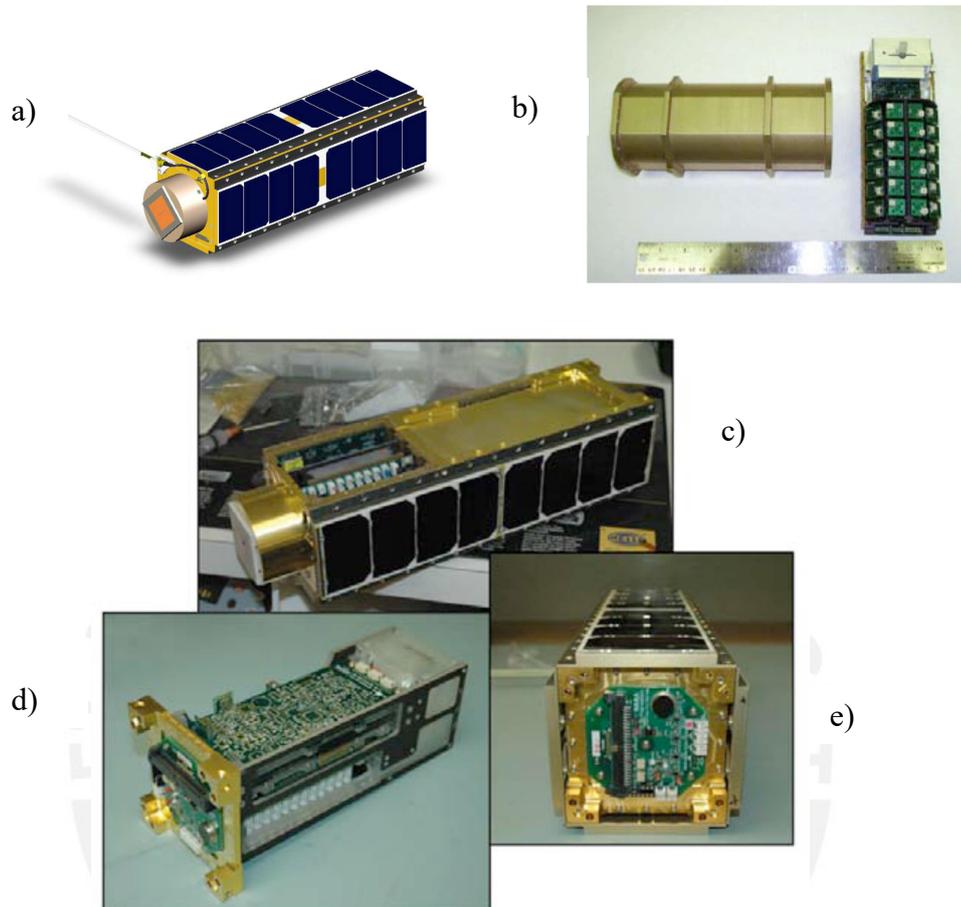
Debido a estas limitaciones el GeneSat-1 fue diseñado para ser completamente autónomo, incluyendo el inicio del experimento, el control de la temperatura, la alimentación de las celdas; así como grabar y enviar toda la información. Para monitorear el ambiente del experimento se utilizaron los sensores: Analog Devices AD 590 para temperatura, Motorola MPXH6101A para presión , Sensirion SHT15 para humedad relativa, Silicon Designs 1221-002 como acelerómetros y Hamamatsu PIN diode S3071 para la radiación.

El GeneSat- 1 fue el primer sistema analítico de comprensión genética completamente autónomo en el espacio y logró probar que estos pequeños satélites son capaces de soportar el crecimiento de microorganismos y monitorear su expresión genética durante su desarrollo.

También fue lanzado el PharmaSat, sucesor del GeneSat-1; llevó dentro una levadura y contó con una construcción más sofisticada, que le permitió obtener mejores resultados que su predecesor [6].

Pharmasat fue un experimento biológico exitoso que duró tan solo 96 horas aproximadamente. El principal objetivo de esta misión era estudiar los efectos de la microgravedad sobre la susceptibilidad de un anti-fungicida en *Scacharomyces cerevisiae*. El experimento evaluó la eficacia de un agente anti-fungicida con tres concentraciones diferentes; los resultados iban a ser comparados con una muestra de control en Tierra. El sistema del PharmaSat contenía todos los elementos necesarios para los procesos del proyecto, siendo totalmente autónomo y pudiendo transmitir los resultados a Tierra directamente. Los principales subsistemas incluyen un sistema de

absorción óptica de tres colores, las redes de micro fluido, un sistema de suministro de reactivos múltiple, un control ambiental en miniatura y sistemas de gestión de energía [6].



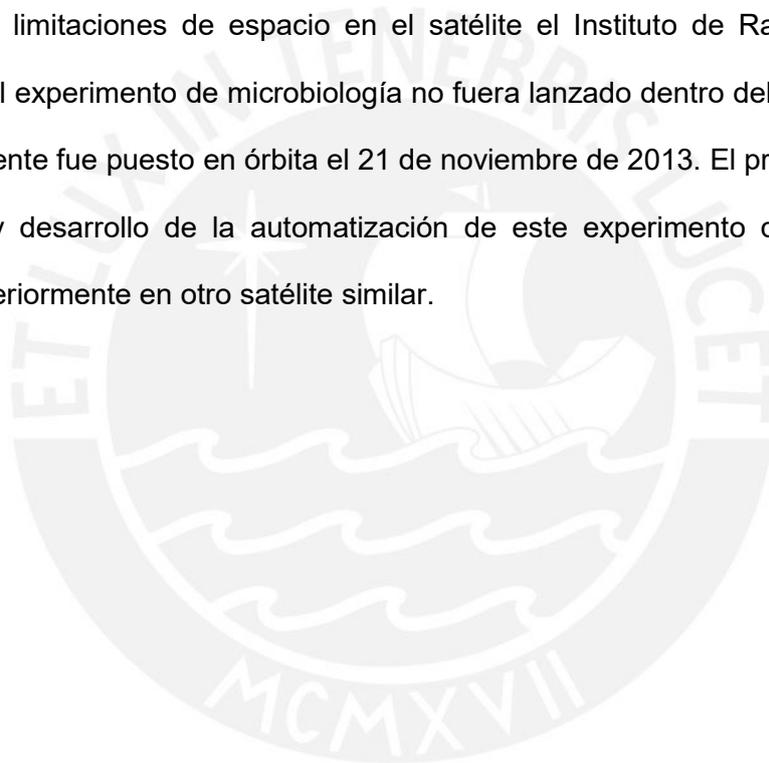
**Figura No. 1.** Infraestructura de los dos primeros nanosatélites autónomos con experimentos microbiológicos lanzados por la NASA [7] [8].  
a) **Satélite GeneSat-1** de 10X10X30 cm.  
b) Carga del **Satélite GeneSat-1**  
c) Vista lateral con paneles solares de **Satélite PharmaSat**  
d) Vista lateral de circuitería de **Satélite PharmaSat**  
e) Vista frontal de **Satélite PharmaSat**

### 1.3. Experimento de Microbiología en el PUCP-SAT 1

El Instituto de Radioastronomía de la Pontificia Universidad Católica del Perú logró realizar el lanzamiento del primer satélite desarrollado íntegramente en el Perú, denominado PUCP-SAT 1 [9], que por su peso de 1.240 Kg en realidad fue un nanosatélite. Como parte de este proyecto, se desarrollaron distintos experimentos que constituyen las carga útiles del satélite.

Una de las cargas útiles trabajadas para el satélite PUCP-SAT 1 fue un experimento de microbiología, que pretendía observar y estudiar el crecimiento de un microorganismo, relativo a cultivos peruanos, bajo las condiciones extremas del espacio exterior. A este experimento se le asignó un espacio dentro del satélite de un cubo de 5cm de arista, que se pensó incluso podría ser un satélite independiente aún más pequeño (Pocket-Cube) dentro del propio CubeSat, sin embargo este experimento como otros debe compartir el espacio general de 10cm x 10cm x 10cm además de los sistemas de comunicación y energía del propio satélite.

Debido a las limitaciones de espacio en el satélite el Instituto de Radioastronomía decidió que el experimento de microbiología no fuera lanzado dentro del PUCP-SAT 1, el que finalmente fue puesto en órbita el 21 de noviembre de 2013. El presente estudio es el inicio y desarrollo de la automatización de este experimento que puede ser lanzado posteriormente en otro satélite similar.



## **CAPÍTULO 2: CONSIDERACIONES PARA EL EXPERIMENTO DE MICROBIOLOGÍA EN UN PICOSATÉLITE**

### **2.1. Consideraciones locales para el desarrollo de la carga útil microbiana dentro de un Pico-satélite**

El desarrollo de esta propuesta ha sido el primer proyecto satelital que se realiza íntegramente en el Perú y también el primer satélite con carga microbiológica completamente autónomo. A esto se le añade las limitaciones que le son inherentes, debido a su reducido tamaño, como son la energía, el espacio, el peso, y los escasos recursos locales.

Esta propuesta significa un desafío para el INRAS, dando inicio al primer proyecto de Astrobiología desarrollado en el Perú. Para ello utiliza entre otros conocimientos y herramientas de las Ciencias de la Vida, de la automatización y de las Ciencias del Espacio.

El experimento está condicionado por diversos factores que influyen en el diseño de sus componentes, como son:

- El reducido espacio que debe ocupar (cubo de 5cm de arista) y la posición que tendrá dentro del satélite.
- Deberá soportar la exposición a temperaturas extremas, los datos experimentales muestran que la superficie de este tipo de satélites alcanza un rango de temperaturas entre - 40°C y +80°C derivados de la radiación solar.
- El microorganismo debe resistir un período de tiempo extenso en estado de latencia (inactivo); ya que desde que el satélite es ensamblado o armado en las instalaciones del INRAS hasta que sea puesto en órbita, el tiempo de espera sería de aproximadamente 3 meses.
- La infraestructura que soporta al experimento debe soportar las altas vibraciones que sufre el satélite al momento del despegue del cohete de lanzamiento.

- Al ser una carga microbiológica de estudio en el espacio exterior, se debe cumplir con las políticas de protección del planeta definida por las Naciones Unidas y que son dictadas por el Comité de Investigación del Espacio - COSPAR en el acuerdo “COSPAR Planetary Protection Policy” [10].
- El microorganismo a utilizar es aeróbico, por lo tanto necesita oxígeno para su crecimiento, lo cual implica un desafío más al exponer un ambiente presurizado en el vacío del espacio exterior; debido a la diferencia de presiones que se conseguirá entre el interior del experimento y el exterior, se corre el riesgo que todo el satélite explote.
- La radiación ultravioleta puede afectar al crecimiento del microorganismo y matarlo.

Después del lanzamiento y cuando el satélite sea puesto en órbita se debe monitorear la temperatura y la humedad relativa del microorganismo para su control. Una vez verificadas las condiciones óptimas para el desarrollo del microorganismo, se libera el medio de cultivo y marcará el momento desde el cual se monitorearán los sucesos en el lugar del inóculo; en espera de poder registrar un crecimiento con una cámara fotográfica.

El mecanismo para liberar al medio de cultivo y entre en contacto con el microorganismo, una vez en órbita, debe ser muy sencillo de manera que no ocupe demasiado espacio dentro del satélite y no consuma mucha energía, ya que ésta es limitada.

## **2.2. Microorganismo a estudiar: Tizón tardío**

El microorganismo elegido para este experimento de microbiología es “*Phytophthora infestans*” que pertenece a la Clase Oomycete; conocido también como “Tizón tardío” o “el hongo de la papa”, porque ataca los cultivos de papa ocasionando grandes pérdidas económicas: Por otro lado la papa es un cultivo oriundo del Perú y es uno de los alimentos de primera necesidad en el mundo [11].



**Figura No 2.**

Micelio blanquecino de *Phytophthora infestans* presente en el envés de las hojas de un cultivo de papa (Foto: W. Pérez) [11]



**Figura No 3.**

Lesiones irregulares de color marrón rojiza sobre la superficie de los tubérculos de la papa causados por *Phytophthora infestans* (Foto: CIP) [11].

Son numerosos los estudios sobre este *Phytophthora infestans* (*Phytophthora i.*) por su importancia económica al ser tan nociva en los cultivos de la papa. Sin embargo, este sería el primer estudio de *Phytophthora i.* en el espacio.

La elección de este microorganismo como objeto de estudio corresponde con la intención de iniciar estudios específicos para el conocimiento del comportamiento de éste microorganismo en las condiciones extremas del espacio, considerando su importancia como el patógeno que mayores daños ocasiona al cultivo de la papa.

### **2.3. Factores del espacio que afectan el crecimiento biológico**

Las principales consideraciones sobre el microorganismo que se pretenden estudiar con el desarrollo de este experimento en el espacio son:

#### **2.3.1. Radiaciones**

Los diferentes tipos de radiaciones producen distintos efectos mutagénicos en los seres vivos, siendo los principales en los estudios de mutagénesis la luz ultravioleta y las radiaciones ionizantes; estas mutaciones se dan a nivel de ADN.

La luz ultravioleta de onda corta es uno de los agentes mutagénicos de mayor energía causando mayores efectos letales y mutagénicos que la luz ultravioleta de onda más grande. Sin embargo, la radiación ionizante es una forma de radiación de mayor energía e incluye rayos de longitud de onda corta como los rayos X, rayos cósmicos y rayos gamma. La radiación ionizante penetra fácilmente las paredes de vidrio y otros materiales, al contrario de la radiación UV.

Las radiaciones que influyen en mayor manera en el espacio y que fueron estudiadas en la misión O/OREOS de la NASA son la radiación espacial y la radiación ionizante. Lo que se busca en este tipo de misiones es probar como los microorganismos se adaptan a estas radiaciones para poder sobrevivir [12].

En órbita baja de la Tierra, que alcanza una altura de hasta 450km, el campo de radiación está compuesto principalmente por tres tipos de radiación: (i) radiación cósmica galáctica, (ii) radiación cósmica solar y (iii) cinturones de radiación compuestas por radiaciones atrapadas por la magnetósfera terrestre [13].

### 2.3.2. Rayos Cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas que llegan desde el espacio y bombardean constantemente la Tierra desde todas direcciones. La mayoría de estas partículas son núcleos de átomos o protones. Algunas de ellas son más energéticas que cualquier otra partícula observada en la naturaleza. Los rayos ultra-energéticos viajan a velocidades cercanas a la de la luz y tienen cientos de millones de veces más energía que las partículas producidas por cualquier acelerador en el mundo.

Hasta el momento nadie conoce las fuentes de los rayos cósmicos ultra-energéticos. La mayoría de partículas provienen de algún lugar de nuestra Galaxia, la Vía Láctea, también muchas provienen de la explosión de estrellas llamadas supernovas. Sin embargo un gran número de partículas pueden provenir de fuentes externas a la Vía Láctea.

La radiación observada sobre la superficie de la Tierra se debe primordialmente al constante bombardeo con núcleos atómicos desnudos formados por las partículas incidentes del espacio en la atmósfera (rayos cósmicos primarios) [14].

### 2.3.3. Microgravedad

La gravedad medida en la superficie de la Tierra, es considerada la aceleración de un objeto que cae; se hace referencia a ella con una  $g$  y se dice que es la gravedad de la Tierra. Un ambiente de microgravedad (en el espacio) es tal que imparte a un objeto una aceleración neta pequeña (alrededor de 1 por ciento de la aceleración gravitacional de la Tierra) comparada con la que se produce en la superficie de la Tierra [15].

En Nasa Science la gravedad se explica indicando que... *no es sólo una fuerza, es también una señal - una señal que "le dice" al cuerpo cómo actuar; e "indica" a los músculos y los huesos qué tan fuertes deben ser. En microgravedad, los músculos se atrofian rápidamente, ya que el cuerpo percibe que no los necesita, podrían llegar a perder alrededor del 20% de su masa muscular aproximadamente a un 5% semanal. La sangre también siente las consecuencias, así la presión sanguínea en gravedad cero se iguala a 100mm Hg a través del cuerpo, y en Tierra es de 200 mmHg en los pies y de 60 a 80mm Hg en la cabeza* [16].

### 2.3.4. Temperatura

El espacio no tiene una temperatura fácilmente medible ya que es un vacío. Solo se puede asignar una temperatura a la materia por radiación, de tal modo que de lo que podemos hablar es de la temperatura de determinados objetos que están presentes en el espacio.

La transferencia de calor se puede realizar de 3 modos: Conducción, convección y radiación. En el vacío del espacio exterior la transferencia de calor se realiza solo por radiación, porque no requiere de presencia de materia como agente de transporte.

Para el caso de los satélites que se encuentran cercanos a la atmósfera terrestre, existen 3 fuentes grandes que irradian calor: El Sol a  $6000^{\circ}\text{K}$ , la Tierra a  $350^{\circ}\text{K}$  y el espacio profundo a  $3^{\circ}\text{K}$  aproximadamente.

Los seres vivos están supeditados a una determinada temperatura en la que viven y se desarrollan o pueden sobrevivir en condiciones de latencia; o mueren.



## **CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE DISEÑO Y ENSAYO DE LAS PARTES**

La intención de ahondar en el desarrollo de destrezas, que den soporte a estudios microbiológicos en el espacio ha llevado a escoger como modelo de estudio a un microorganismo de vital importancia agrícola como lo es *Phytophthora Infestans*; ya que es el mayor patógeno causante de pérdidas en el cultivo de la papa y plantear un experimento que permita registrar el crecimiento de este microorganismo u otro, en las condiciones extremas del espacio exterior.

### **3.1. Objetivos del Diseño**

#### 3.1.1. Objetivo general

El objetivo es diseñar, para un espacio muy reducido, la infraestructura y el sistema que de soporte al monitoreo de un experimento de microbiología, que será puesto en órbita como carga útil en un pico-satélite.

El experimento consiste en observar mediante toma de fotografías, el crecimiento de *Phytophthora Infestans* en condiciones extremas del espacio exterior, para ser comparado con un experimento llevado a cabo simultáneamente en Tierra (laboratorio del INRAS), al mismo tiempo que se monitorean la temperatura y la humedad relativa del experimento.

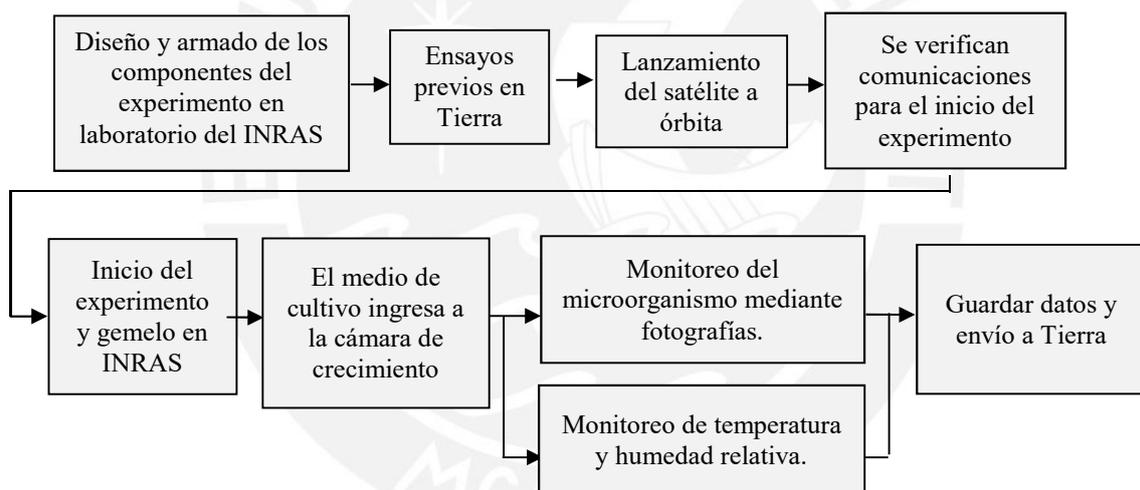
#### 3.1.2. Objetivos específicos

- Introducción y revisión de experimentos similares ya realizados en el mundo.
- Diseñar el sub-sistema autónomo de monitoreo de temperatura y humedad relativa en la cámara de crecimiento del microorganismo.
- Diseñar el sub-sistema que mantendrá al microorganismo en un medio de latencia aislado de su medio de cultivo.
- Diseñar el sub-sistema autónomo que inyecte el medio de cultivo rico en nutrientes hacia la cámara de crecimiento, para que se inicie el experimento.

- Diseñar el sub-sistema autónomo para la toma de fotografías que permitirá observar el crecimiento del microorganismo.

### 3.2. Propuesta de las etapas del proyecto

Para poder desarrollar el sistema automatizado que de soporte al experimento se debe tener en cuenta cómo se desarrollará el experimento en órbita, por lo tanto es importante definir las etapas y elementos que se han considerado para la ejecución del experimento, lo que sirve para el diseño de los sub-sistemas y componentes a utilizar. En la figura No. 4 se muestra el diagrama de bloques de las etapas del proyecto con un microorganismo, desde el diseño de los elementos de la carga útil hasta el final del mismo.



**Figura No. 4.** Diagrama de bloques de las etapas del proyecto desde el diseño y armado, el lanzamiento del satélite y el desarrollo del experimento

El diagrama de bloques corresponde a las siguientes etapas:

- Se construirán dos cámaras de microbiología (CdM) iguales, de modo que una de ellas reproduzca el experimento en el laboratorio del INRAS para poder compararla con la que se encuentre en órbita.
- Un aspecto crítico es la temperatura, se sabe que *Phytophthora i.* es capaz de soportar temperaturas bajas de hasta  $-120^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, *Phytophthora i.* es sensible a temperaturas altas como de  $50^{\circ}\text{C}$ ; por lo que su ubicación dentro del

satélite debe permitir mantener una temperatura no mayor a 40°C. Esto constituye un reto frente a las condiciones del espacio exterior y las del mismo satélite respecto a su diseño térmico y su flujo de temperatura, tal como se explica en el apartado 2.3.4. sobre las características de la temperatura en el espacio exterior. La *Phytoftora* i. necesita oxígeno para vivir, por lo que la cámara será cerrada con oxígeno en su interior, lo que ha de generar una determinada humedad. Las condiciones del experimento serán registradas por medio de los sensores de temperatura y humedad relativa.

- iii) El inóculo conteniendo al microorganismo vivo será colocado en la cámara de crecimiento (CC), en un medio de cultivo de latencia, conocido como medio a base de centeno; pero con una cantidad mínima de nutrientes, bajo condiciones de bioseguridad.
- iv) Mientras el medio de cultivo enriquecido con nutrientes, conocido como V8. Será colocado separadamente en una cámara de almacenamiento (CA).
- v) El experimento se iniciará cuando el satélite, una vez en órbita, establezca comunicación con la estación terrena en el INRAS, de manera que por medio de una señal controlada se dé inicio en simultáneo con el experimento gemelo en el laboratorio en Tierra. Se activará una microválvula para que el suministro de V8 ingrese a la cámara de crecimiento, el microorganismo pueda reactivarse y crecer. Cada 2 horas se tomarán fotografías y se sensará la temperatura y la humedad relativa por un plazo de una semana; tiempo suficiente para que el microorganismo pueda haberse adaptado, desarrollado y pueda ser visible con una cámara convencional, sin necesidad de un aumento de visión grande como el de un microscopio; tiempo después el microorganismo no tendrá nutrientes suficientes y terminará su existencia.
- vi) Cuando el satélite decaiga se quemará al atravesar la atmósfera terrestre, conjuntamente con los elementos de la CdM y no se podrán tener muestras de retorno.

### **3.3. Alcances de la Investigación**

Esta investigación se centra principalmente en el diseño de la infraestructura electrónica para la automatización de las actividades seleccionadas que den soporte al desarrollo del experimento de microbiología, así como al correspondiente monitoreo.

No cubre los siguientes aspectos: Sub-sistema de control de temperatura del experimento, implementación de la cámara para la toma de fotos, sub-sistema para almacenamiento de los datos obtenidos y sistema de comunicaciones para envío de la data a Tierra.

### **3.4. Desarrollo de los sub-sistemas que componen la investigación**

#### **3.4.1. Diseño de la infraestructura del experimento**

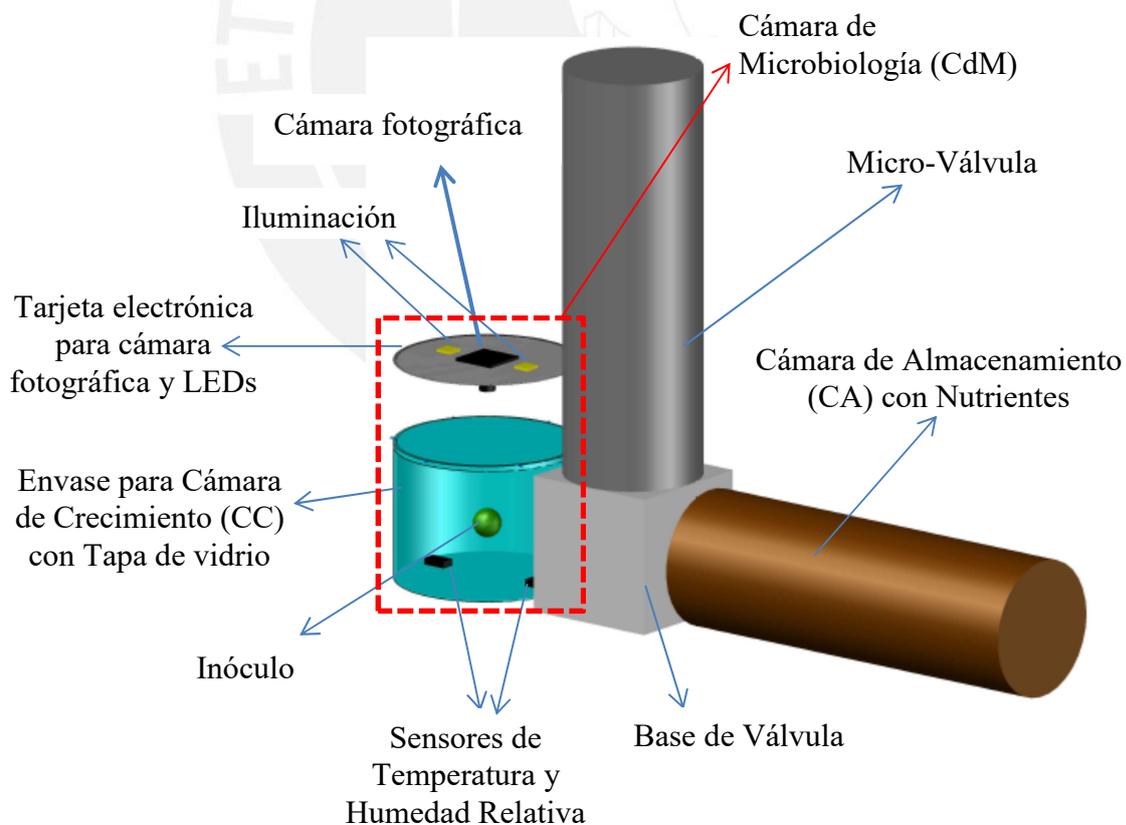
La Cámara de Microbiología (CdM) está conformada por la cámara de crecimiento (CC) con el medio de cultivo enriquecido, que contiene el inóculo con los microorganismos, y el sistema de monitoreo por fotografías. La cámara fotográfica se encuentra por fuera de la CC, por lo que se debe situar muy cerca y con visión hacia el interior de la misma, por lo tanto se plantea que la CC sea de vidrio y separada de la cámara fotográfica con una tapa también de vidrio.

En el diseño se consideran dos recipientes herméticos con el fin de aislar al microorganismo al momento del lanzamiento del satélite, la CC para el estado de latencia, y la CA con el medio de cultivo enriquecido con nutrientes V8; ambas cámaras se encuentran conectadas por medio de la base de una micro-mini válvula solenoidal tipo Parker ubicada entre estas.

Los sensores de temperatura y humedad relativa se ubican dentro de la CC y ya que éste ambiente debe estar herméticamente sellado, solo permite la salida de los filamentos de conexión al microprocesador (de una manera similar a los filamentos de una bombilla incandescente), de esta manera se asegura que no existan fugas de ningún tipo (líquidos, presión, etc.), lo contrario haría que el experimento se destruya debido a la diferencia de presiones que existe en el espacio. Si bien los fluidos de

medio de latencia y del medio de cultivo tenderán a ocupar un volumen esférico en el espacio, estos estarán moviéndose por toda la cámara debido al movimiento del satélite, por esto se debe considerar varios sensores dentro de la CC, así registrarán los datos de la sustancia con la que tengan contacto y se comparará con los de la muestra en Tierra.

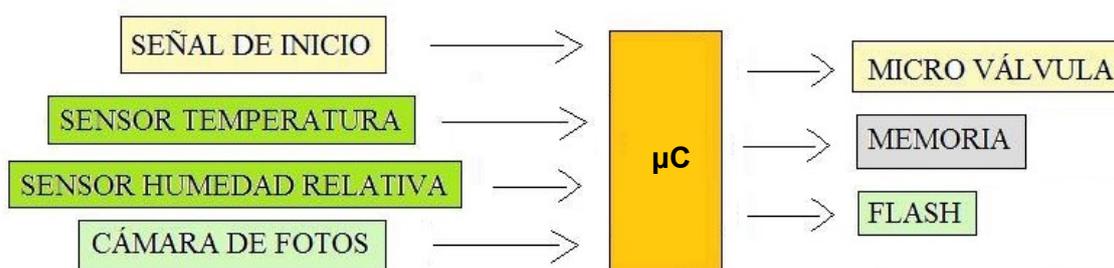
La figura No. 5 muestra un gráfico de arquitectura (estructura) con la disposición de los diferentes elementos del experimento, que incluye la CC y la CA conectadas a través de la base de la micro-válvula; en la parte superior, por fuera de la CC, a una distancia de 3cm aproximadamente se ubica una tarjeta electrónica que incluye la cámara fotográfica junto con los LEDs para iluminación. Los elementos se conectan por medio de conectores roscados, utilizando sellantes a presión en las juntas para que quede completamente aislado y sin pérdidas de presión.



**Figura No 5.** Diseño general de los elementos que conforman la Infraestructura del experimento (estructura).

En el Anexo 1 se adjunta los planos elaborados por el Ingeniero Alan Flores, y son referenciados en esta tesis, para el cubo que almacenaría el experimento con la Cámara de Microbiología y la Cámara de crecimiento en su interior [17]. Las medidas de los componentes son especificadas y calculadas en el capítulo 4.

#### 3.4.1.1. Diagrama de bloques para el control y monitoreo del experimento



**Figura No 6.** Diagrama de bloques de los componentes electrónicos conectados al microprocesador central.

En el diagrama de la figura No. 6 podemos observar todos los elementos que conforman el sistema de monitoreo del experimento (sensor de temperatura, sensor de humedad relativa, cámara de fotos, memoria), así como el control para el inicio del mismo (señal de inicio a la microválvula). El microcontrolador ( $\mu C$ ) es el encargado de controlar todos estos sub-sistemas y responsable de la funcionalidad del experimento.

#### 3.4.1.2. Separación de medios durante el estado de latencia

Como se mencionó anteriormente es necesario separar al microorganismo de su medio de cultivo y mantenerlo aislado en estado de latencia hasta el inicio del experimento, se calcula que este tiempo ha de ser de aproximadamente 2 meses.

Alternativamente al uso de la micro válvula y dos cámaras (CC y CA), se evaluó contar con una sola cámara (CC) para el experimento. En este diseño la cámara contendría el medio de cultivo y el inóculo en latencia aislado en su interior en un recipiente de vidrio más pequeño, sin embargo para liberar al inóculo se utilizaba un émbolo electromagnético que rompa el recipiente más pequeño, lo cual era muy complejo ya

que ocupaba mucho espacio, la posición era disruptiva puesto que tenía que encontrarse dentro de la CC, y los restos contaminaban las fotografías. Para obtener fotografías adecuadas los elementos no microbiológicos no deben mostrarse.

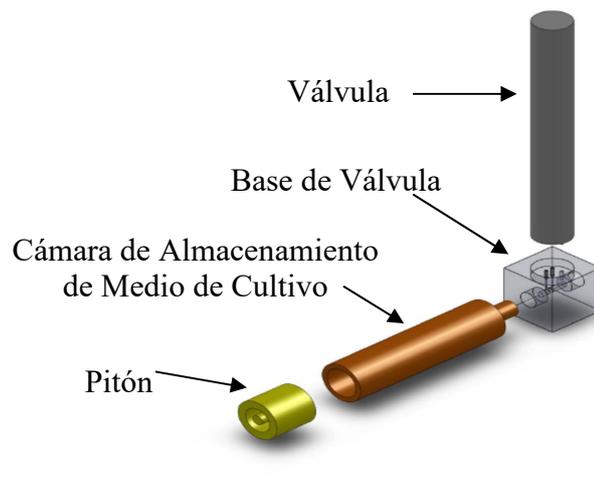
Por este motivo se optó por dos cámaras o espacios independientes conectados entre sí, de manera que el medio de cultivo ingresa de la cámara de almacenamiento (CA) cuando es necesario y las fotografías captan lo esencial del experimento microbiológico en la cámara de microbiología (CdM).

La CC es el espacio donde se desarrollará el experimento y en el que se mantendrá al microorganismo aislado en estado de latencia, en 1ml del medio de cultivo de latencia (medio basado en centeno; ver los medios de cultivo para *Phytophthora i.* en anexo 2), hasta que ingrese el material de cultivo enriquecido V8; además debe ser completamente transparente en dirección a la cámara fotográfica, de manera que permita la correcta visualización de su interior para poder tomar las fotografías.

La CA, cámara que contiene el medio de cultivo enriquecido, conocido como V8 (ver anexo 2) debe ser también hermética y sus medidas están definidas por el volumen de V8 que el microorganismo necesitará para poder reanimarse y reproducirse acorde a las condiciones del experimento (aprox. 2ml).

#### 3.4.2. Diseño de la infraestructura para el crecimiento del microorganismo (subsistema de inicio)

El diagrama de ensamble de la válvula con la Cámara de Almacenamiento de medio de cultivo enriquecido se puede observar en la Figura No 7. La Cámara de Crecimiento se debe colocar del lado opuesto a la cámara de almacenamiento.



**Figura No 7.** Esquema de ensamblaje de la válvula con la CA

Para garantizar que el fluido del medio de cultivo pase a la cámara de crecimiento cuando ésta se abra, al iniciar el experimento, las cámaras deben estar a diferentes presiones. En el espacio exterior el satélite, y por ende el experimento, se encontrará en gravedad cero y posiblemente rotando o girando de una forma desconocida, es por esto que es necesario que el sistema garantice el paso del fluido de una cámara a otra teniendo en cuenta estas condiciones. Para esto y para garantizar que la cámara de crecimiento tenga condiciones similares a la de la Tierra para que el microorganismo pueda reaccionar, la cámara de crecimiento deberá estar completamente sellada a poco menos de 1atm esto es 10PSI  $\pm$ 1 de presión; la cámara de almacenamiento de cultivo deberá estar completamente sellada a una presión mayor, para este caso se estima que debe ser el doble de la presión de la cámara de crecimiento esto es 20PSI  $\pm$ 1. Debemos recordar que el microorganismo escogido es aeróbico por lo que la cámara de crecimiento deberá contener oxígeno en su interior para poder mantenerlo en estado de latencia, esto hace tener especial consideración al hecho que no debe haber ningún tipo de fuga en esta cámara pues podría ocasionar una explosión al ser expuesto al vacío del espacio exterior.

Otros requerimientos para la elección de la válvula son:

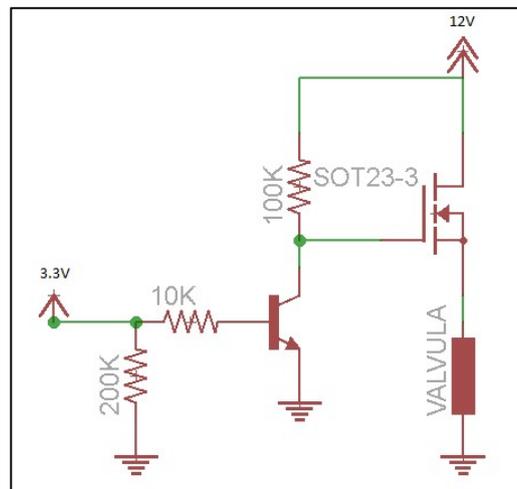
- De tipo normalmente cerrada, de dos vías.
- Tamaño: No debe ocupar más de un tercio del volumen asignado para el experimento, esto es: 40cm<sup>3</sup>.
- Potencia consumida menor a 5W.
- La forma de conexión con las cámaras, mediante conectores roscados.

Para las pruebas del diseño se ha escogido una micro-válvula de dos vías marca ASCO Cientific modelo 190212S30 [18] la cual incorpora una base de teflón en la que se pueden conectar directamente la cámara de crecimiento y de almacenamiento de cultivo de manera roscada, asimismo esta válvula soporta un diferencial de presión de hasta 30PSI cumpliéndose el requerimiento de diseño supuesto anteriormente.



**Figura No 8.** Detalles Técnicos de la micro válvula ASCO [18]

Se observa que la válvula necesita un voltaje de 12V para su activación, entonces se requiere un circuito elevador de 3.3V a 12V ya que el voltaje de salida del microprocesador MSP430 es de 3.3V [19], de lo contrario también se podría utilizar una batería externa a 12V para suministrar esta energía de manera que sea independiente al sistema de energía del satélite; pero se opta por la primera opción. Por lo que para conectar la válvula con el microcontrolador es necesario diseñar un circuito guiador (*“driver”*) que incluya estas características. El esquemático que se propone para la conexión de la válvula con el microprocesador es el siguiente:



**Figura No 9.** Guiador para conexión de la microválvula con el microcontrolador MSP430 (diseño propio).

En este circuito guiador se utiliza un Transistor mosfet conectado a la válvula que pueda soportar la potencia que requiere para ser energizada y éste se conecta a 12V, a su vez en su “puerta” se encuentra un transistor npn conectado a tierra, de manera que cuando el microcontrolador envíe la señal (3.3V) la “puerta” del mosfet se pondrá a tierra, con lo cual se deja pasar la corriente para energizar a la válvula.

### 3.4.3. Diseño de los elementos para el monitoreo de temperatura y humedad relativa en la cámara de crecimiento

El microorganismo, “*Phytophthora Infestans*” o “Tizón Tardío”, crece normalmente en un rango de temperaturas entre 20°C y 30°C, por esto se necesita monitorear la temperatura del experimento y conocer las condiciones en las que se desarrollará y analizar su desenvolvimiento.

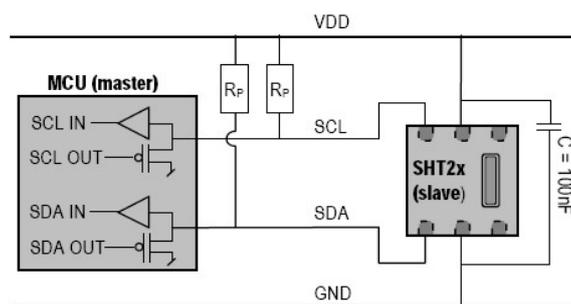
Además este microorganismo necesita un ambiente húmedo para crecer, aproximadamente un 75% de humedad relativa. Por esto también será importante monitorear la humedad relativa en el experimento. Al momento de montar el experimento en el satélite, las condiciones de humedad relativa deberán ser de 75%. Ya que el sistema ha de ser hermético, se espera que esta condición se mantenga.

Los requerimientos del sensor o los sensores utilizados deben ser:

- Soporte de un amplio rango de temperaturas:  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $80^{\circ}\text{C}$
- Soporte de amplio rango de humedad relativa: 10% a 90%.
- Bajo consumo de energía, menor a 0.5W.
- Debe mostrar valores de humedad relativa y temperatura con un decimal.
- Tolerancias de medida máximo de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  y  $\pm 5\%$  de HR.
- Interfaz de salida digital.
- Su tamaño no debe ser mayor a  $1\text{cm}^3$ .

En este diseño se propone utilizar el sensor SHT21 de la marca Sensirion [20], el cual es un sensor de temperatura y humedad relativa, con salida digital e interface I<sup>2</sup>C. Se elige este sensor, ya que, posee un consumo de energía muy bajo de 1mW, viene completamente calibrado, posee un gran período de estabilidad, sus rangos de operación son: 0% - 100% Humedad Relativa (0-80% operación normal), lo cual nos permite un monitoreo completo de éste parámetro, y para el registro de la temperatura puede registrar de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$ . Trabaja con interface I<sup>2</sup>C, la cual es menos propensa al ruido que un sistema analógico y es más recomendada en este tipo de aplicaciones. Además, el sensor SHT21 cuenta con una resolución de hasta 0.04% (12 bits) para medir Humedad Relativa y hasta  $0.01^{\circ}\text{C}$  (14 bits) para Temperatura. El sensor SHT21 Presenta un diseño de CMOSens chip, el sensor de humedad relativa es de tipo capacitivo y el de temperatura es de una mejorada banda de vacío [20].

Este sensor necesita una pequeña circuitería para funcionar correctamente. Su voltaje de entrada debe estar entre un rango de 2.1V a 3.6V, siendo 3V el recomendado por el fabricante; además la conexiones de VDD y GND deben ser desacopladas por un condensador de 100nF para evitar el ruido e interferencias. Es necesario que se conecten resistencias de polarización (“pull-up”) en los pines de SDA y SCL para forzar la salida a alta, estas resistencias deben ser de 10k $\Omega$ . Para ello se presenta en la figura siguiente el circuito de conexión propuesto:



**Figura No 10.** Diagrama esquemático de circuito electrónico para conexión del microcontrolador (MCU) con el sensor SHT21 [20]

Finalmente, para asegurar el monitoreo constante y de todo el experimento se propone colocar varios sensores alrededor de la cámara de crecimiento para obtener mejores resultados. Ya que el medio donde se desarrollará el microorganismo no ocupará todo el volumen de la cámara y una vez en órbita éste flotará y se moverá en cualquier dirección, se plantea sensar estos parámetros en 4 puntos equidistantes como mínimo.

#### 3.4.4. Diseño del sistema de monitoreo por fotografías

El microorganismo, en condiciones terrestres, en 48 horas crece lo suficiente para mostrar la formación de micelios visibles para el ojo humano en las placas Petri (sin necesidad de un lente de aumento) y es por esto que se puede utilizar una cámara fotográfica convencional que permita monitorear su crecimiento.

La cámara fotográfica debe cumplir, entre otros, con los siguientes requisitos:

- Mínimo resolución VGA
- Píxeles activos mínimo 1024 x 1024
- Tamaño de pixel mínimo de 5 $\mu$ m
- Interfaz y procesador de imagen digital
- Soporte de temperaturas en el rango de -40°C a 80°C aprox
- Consumo de energía menor a 0.5W
- Tamaño máximo de 1cm<sup>3</sup>.

Para este caso, se pretende obtener fotografías como las siguientes al pasar de los días:

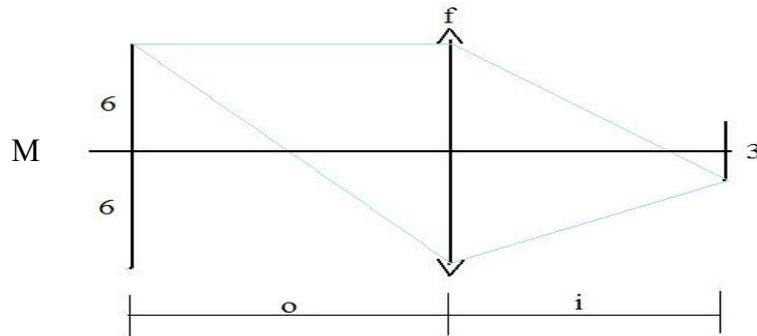


**Figura No 11.** La fotografía muestra el crecimiento de *Phytophthora i.* en una placa petri en días consecutivos dentro de una semana (Cultivo con apoyo del laboratorio del CIP - Elaboración propia)

Se ha elegido la cámara fotográfica VS6624 de la marca ST Microelectronics [21], ya que tiene un bajo consumo de energía, permite tomar fotografías con resolución VGA, cuenta con comunicación I<sup>2</sup>C, presenta un rango de funcionamiento entre -30°C y 70°C y su empaque es pequeño tal que pueda alcanzar en el espacio que permite el experimento.

La cámara puede captar fotografías a partir de 60cm, sin embargo el experimento se encuentra a 3cm, por lo que es necesario utilizar un lente que pueda enfocar correctamente la cámara de crecimiento y poder obtener imágenes adecuadas.

Para hacer los cálculos que permitan determinar qué lente sería el adecuado se tiene en consideración que la cámara cuenta con 1280H x 1024V píxeles activos con un tamaño de 3µm de resolución; éste genera un área de casi 4mm, pero se toma un área de 3mm para los cálculos. Además se propone ver un campo de 12mm del experimento.



**Figura No 12.** Muestra los parámetros a considerar para determinar las características del lente  $f$  para la cámara fotográfica cuyo límite de resolución es de  $3 \mu\text{m}$  y se quiere obtener un campo de visión  $12 \text{ mm}$

De estas observaciones se realizan los siguientes cálculos:

$$M = i / o \dots\dots\dots(1)$$

$$M = 3 / 12 = 1 / 4$$

$$o + i = 30\text{mm} \dots\dots\dots(2)$$

$$i = 6\text{mm} \quad o = 24\text{mm}$$

$$1 / o + 1 / i = 1 / f \dots\dots\dots(3)$$

$$f = 4.8\text{mm}$$

Donde:

M: Relación de la resolución de la cámara con el campo visual.

i: Distancia entre la cámara y el lente.

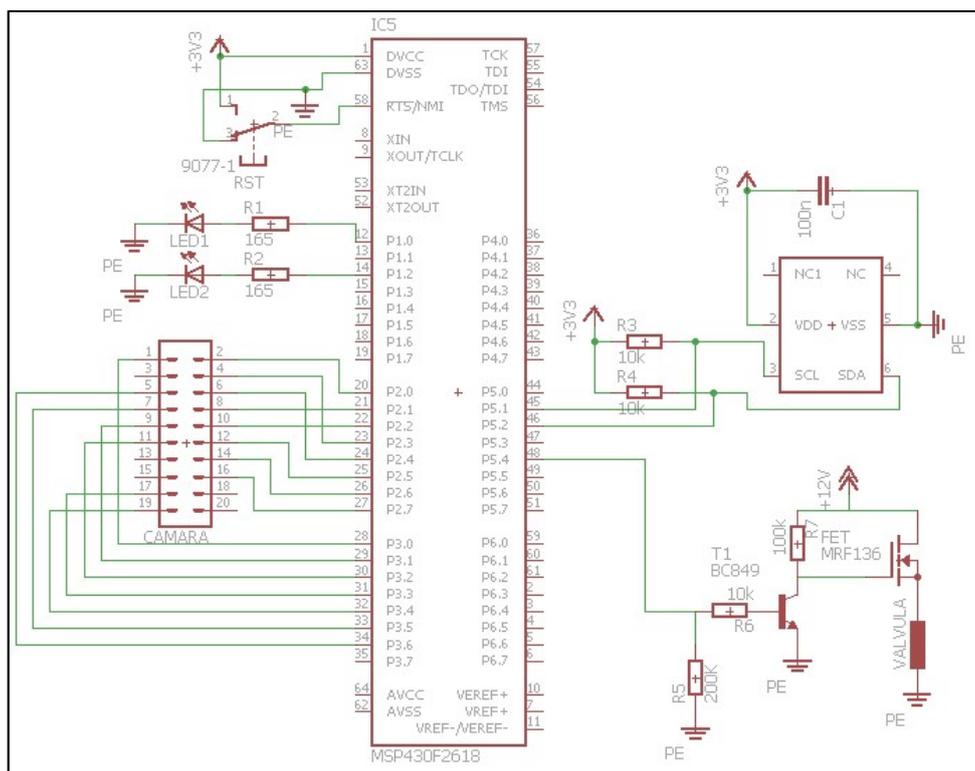
o: Distancia del lente al experimento.

Entonces se concluye que se necesita un lente con distancia focal efectiva de  $5\text{mm}$ . La empresa Edmund Optics ofrece lentes acromáticos con distintos recubrimientos, entre ellos de  $\text{MgF}_2$  con una reflectancia más alta, que presentan una distancia focal efectiva de  $6\text{mm}$  y son de  $2\text{mm}$  de diámetro, por lo que son bastante pequeños ideales para nuestra solución [22].

Es necesario incluir un sistema de iluminación, ya que como se explicó anteriormente las paredes de la CdM estarán recubiertas para no dejar pasar la luz UV, por ello se debe añadir dos LED's blancos que funcionen en conjunto con la toma de fotografías.

### 3.4.5. Propuesta de diseño del sistema de monitoreo electrónico

El control del sistema de monitoreo se realiza con un microcontrolador. En este caso, el microcontrolador elegido es el MSP430F2618 de la familia Texas Instruments [19], debido básicamente a su bajo nivel de consumo de energía y sus múltiples funciones. Este microcontrolador es ampliamente usado para este tipo de aplicaciones y fue el utilizado como microcontrolador principal en el PUCP-SAT 1.



**Figura No 13.** Diagrama esquemático del sistema completo de monitoreo (Diseñado en este trabajo de tesis).

En la figura N° 13 se observa en la parte superior izquierda un pulsador conectado entre Vcc y Tierra que funcionará como botón de inicialización.

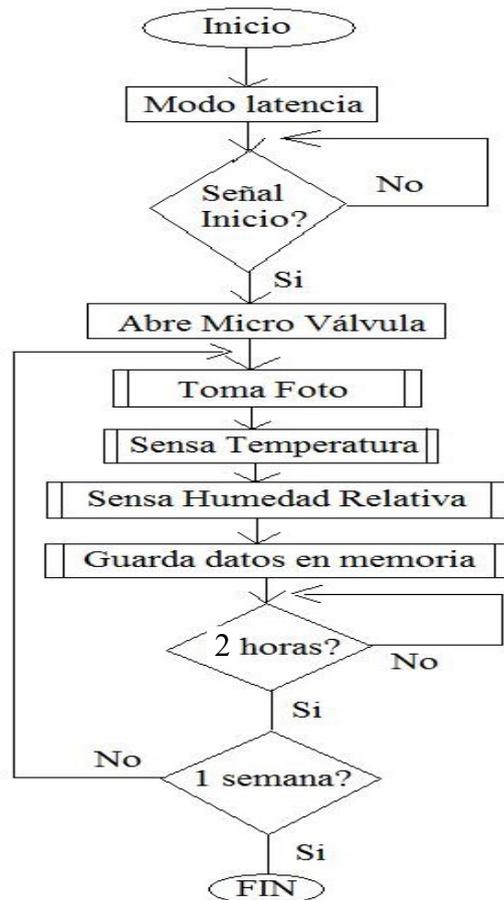
En los pines P1.0 y P1.2 se encuentran conectados los LEDs que servirán como flash para la cámara, éstos están conectados en serie a una resistencia de 165 Ohm de manera que consuman 20mA e iluminen con una intensidad de 22 mcd (mili candela).

Los puertos P2 y P3 se utilizan para conectar la cámara de fotos, el puerto P2 recibe los datos de la fotografía y el puerto P3 es el que realiza el control de la cámara.

En el puerto P5.4 se conecta el circuito guiador que controla la micro válvula.

Para el sensor de temperatura y humedad relativa es necesario conectar dos pines para las señales en  $^{\circ}\text{C}$ , por lo que se utilizan los puertos P5.1 y P5.2, que presentan esta funcionalidad.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del programa principal para llevar a cabo el experimento y controlar el sistema de monitoreo:



**Figura No 14.** Diagrama de flujo del programa principal, en el que se especifica la secuencia del experimento

El programa principal es el que controla de manera autónoma todo el experimento, por lo tanto tiene el control de sus etapas. Como se ve en la figura 14, el experimento se encuentra en estado de latencia (no inicia) desde que es ensamblado hasta que es puesto en órbita y el satélite recibe una señal de inicio que es enviada desde Tierra, en este momento se abre la microválvula para dar paso a los nutrientes hacia la CC y se inicie el experimento. Seguido se toman todos los datos para el monitoreo entrando a las rutinas de toma de fotografías, sensado de temperatura, humedad relativa y se

guardan los datos obtenidos en una memoria. Este proceso de monitoreo se realizará cada dos horas a lo largo de una semana que es el tiempo estimado que dure el experimento en órbita. Posteriormente el sistema de comunicaciones del picosatélite será el que envíe los datos obtenidos a Tierra.



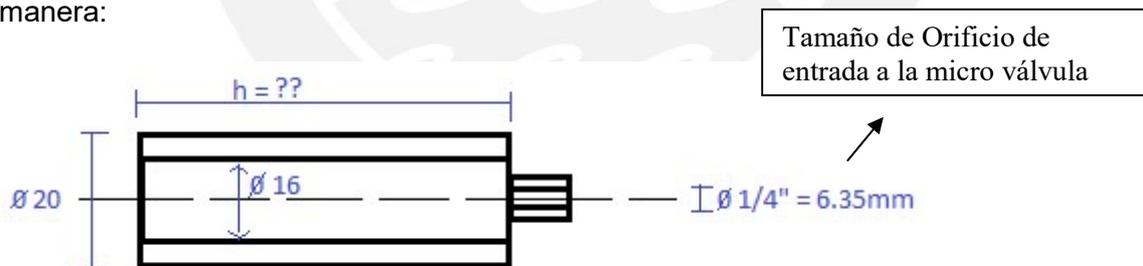
## CAPÍTULO 4: ENSAYOS Y RESULTADOS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

### 4.1. Puesta a punto y prueba de la infraestructura para asegurar el crecimiento del microorganismo en el prototipo

Se construyeron los prototipos de las cámaras de almacenamiento (CA) y cámara de crecimiento (CC), como se ha expuesto en el capítulo 3, las que permiten el paso del medio de cultivo enriquecido de la CA a la CC al abrir la micro válvula que une a los dos recipientes con diferentes presiones; la CC a menor presión hará que el medio con V8 en la CA ingrese a la CC, hasta que las presiones en los dos recipientes se igualen y la válvula se cierre instantes después.

Para realizar este ensayo se manufacturó la CA en bronce y de forma cilíndrica ya que es un material fácil de obtener, económico y que puede ser trabajado en el laboratorio de mecánica de la universidad, este diseño permite que la cámara quede totalmente sellada mediante el roscado. Se adicionó un pitón en el extremo opuesto de la válvula para que por ahí se pueda ingresar aire a presión al interior de la misma.

El dimensionamiento de la cámara de almacenamiento (CA) se realizó de la siguiente manera:



**Figura No 15.** Plano Seccional del diseño la cámara de almacenamiento (CA) para el medio de cultivo con dimensiones en mm.

Se tiene el tamaño del orificio de entrada a la base de la micro-válvula, por lo que el diámetro interior debe ser un poco mayor, se asume  $\varnothing_i = 16\text{mm}$  y por el grosor del tubo de bronce el diámetro exterior se asume en  $\varnothing_e = 20\text{mm}$ , por lo tanto se debe hallar la longitud  $h$ .

Para esto se usa la fórmula para hallar el volumen interno del cilindro:

$$V = \pi R^2 h \dots \dots \dots (4)$$

Donde:

V = Volumen del cilindro

R = Radio interno del cilindro

h = longitud de la altura del cilindro

$\pi = 3.141592$

Aplicando la fórmula 4, para los ensayos se utiliza un volumen de 10ml por lo que la longitud h es:

$$V = \pi \times \left(\frac{8}{1000}\right)^2 \times h = 10ml \times \frac{1l}{1000ml} \times \frac{1m^3}{1000l} \dots \dots \dots (5)$$

$$h = \frac{10}{201.06} = 0.0497 = 49.7mm \cong 5cm$$

Adicionalmente se debe comprobar que el bronce soporte la fuerza generada por la presión dentro del cilindro, para esto calculamos el estrés de la circunferencia usando la fórmula (6), en estado de equilibrio:

$$G_t = \frac{Pd}{2t} \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

$G_t$ : Stress de la circunferencia

P: Presión

d: Diámetro

t: Grosor del recipiente

Aplicando la fórmula 6 para los datos del experimento se tiene:

$$G_t = \frac{Pd}{2t} = \frac{(200kPa)\left(\frac{16}{1000}\right)}{2\left(\frac{4}{1000}\right)} = 400kPa = 0.4\mu Pa \dots \dots \dots (7)$$

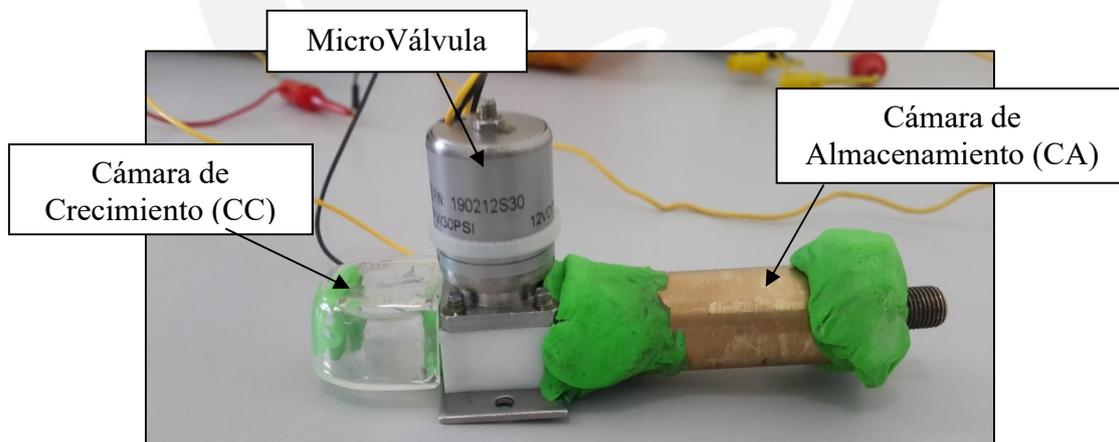
Lo que garantiza que la presión al interior es totalmente soportable por el bronce ya que el estrés que se genera es mínimo.

Para la CC se utilizó un envase de vidrio que permite la visibilidad a su interior, éste envase se construyó de acuerdo al diseño entregado al servicio que ofrece la Sección de Química de la PUCP, para su dimensionamiento se consideró una base circular de 2.5cm de diámetro, una altura igual a la de la base de la válvula esto es aproximadamente 2cm, y se adicionó una boquilla para que encaje en la salida de la válvula. Mediante la fórmula (4) se verifica el volumen que soporta esta cámara:

$$v = \pi \times \left(\frac{1.27}{100}\right)^2 \times \frac{2}{100} = 10.13ml \quad \dots\dots\dots (8)$$

Para la realización de esta prueba, se debe seguir el procedimiento indicado en el “Anexo 3 - Protocolo de Ensamble del Sistema para el Paso de Medio de Cultivo”. Este procedimiento indica los pasos para acoplar la CA con la válvula y la CC.

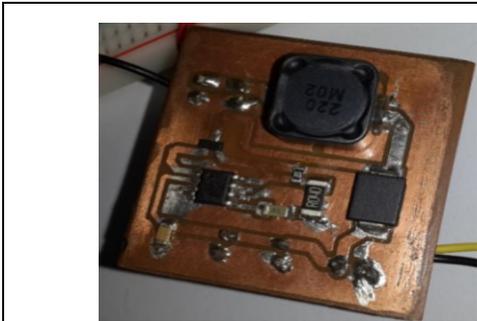
Para asegurar que no exista pérdida de presión en las juntas, se utilizó pasta sellante adhesiva. Este punto es muy importante en la realización del experimento real ya que cualquier fuga de presión puede ser muy peligrosa para el satélite. Luego de seguir los pasos indicados, el ensamble se puede observar en la siguiente figura:



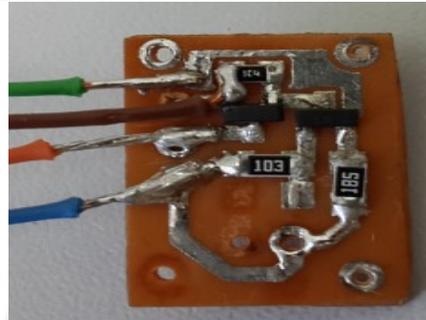
**Figura No 16.** Prototipo de montaje de la CA y CC con la micro válvula (estructura del diseño).

Para activar la válvula se usa el módulo de desarrollo del MSP430 (CubeSat Kit) [23] con el que cuenta el INRAS, éste módulo contiene kits de desarrollo que permiten utilizar todas las funcionalidades del microcontrolador desde una plataforma programable; de esta manera se simula una activación desde el microcontrolador. El

satélite PUCP SAT 1 cuenta con fuentes de poder de 12VDC, 5VDC y 3.3VDC [24]. Para el ensayo se utilizó la fuente de 12VDC desarrollada para el PUCP SAT 1 conformada por un circuito elevador integrado MAX 1771 [25] de la figura N°16 acorde a lo propuesto en 3.2.2.



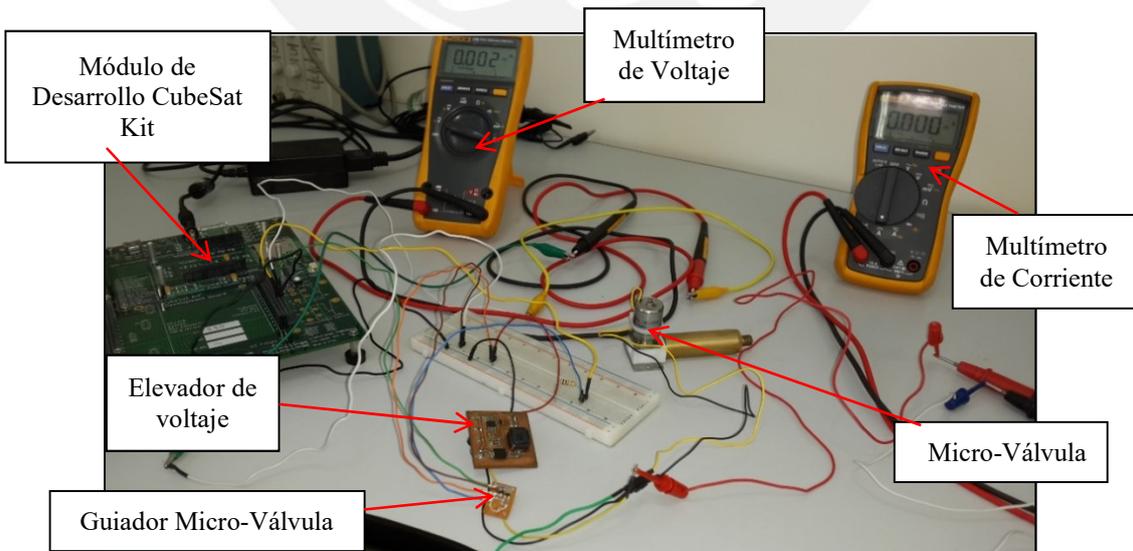
**Figura No 17.** Circuito elevador de voltaje para energización de la Micro válvula [24, 25].



**Figura No 18.** Circuito para la conexión de la válvula al microcontrolador

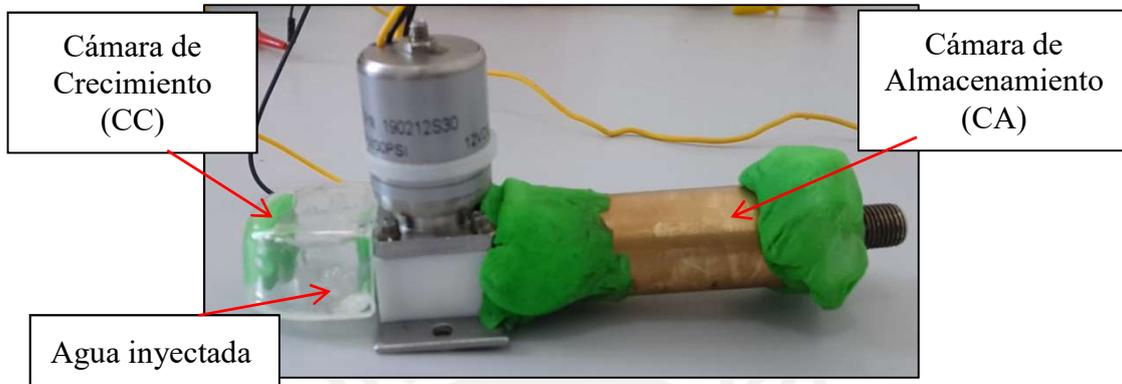
La figura N°17 muestra la tarjeta elaborada para el guiador de la válvula de acuerdo al esquemático mostrado en la Figura N°9, con la cual se conecta la válvula al microcontrolador.

Finalmente, para verificar el funcionamiento del accionamiento se conectaron todos los componentes y se añadieron dos multímetros para la medición de voltaje y corriente de alimentación de la microválvula.



**Figura No 19.** Conexión de todos los componentes para ensayo de activación de la micro-válvula, según esquemático Figura N°13.

El resultado de esta prueba fue exitoso, logrando pasar agua destilada de la CA a la CC luego de activada la válvula el tiempo de un segundo. El agua se inyecta con fuerza al interior de la CC, resultado que se debe estudiar y validar con los medios de cultivos que se usarán con el inóculo.



**Figura No 20.** Medio de cultivo inyectado en la CC.

En las figuras 21 y 22 respectivamente se muestra el voltaje de 12.24V y la corriente de 947mA que se consumió para la activación de la micro-válvula.



**Figura No 21.** Voltaje en la micro-válvula.



**Figura No 22.** Corriente en la micro-válvula.

Estos resultados nos indican que la válvula sí puede ser energizada por la batería del picosatélite. Como segunda opción también se podría utilizar una batería independiente a la batería principal del satélite y ésta se podría utilizar luego para otros fines.

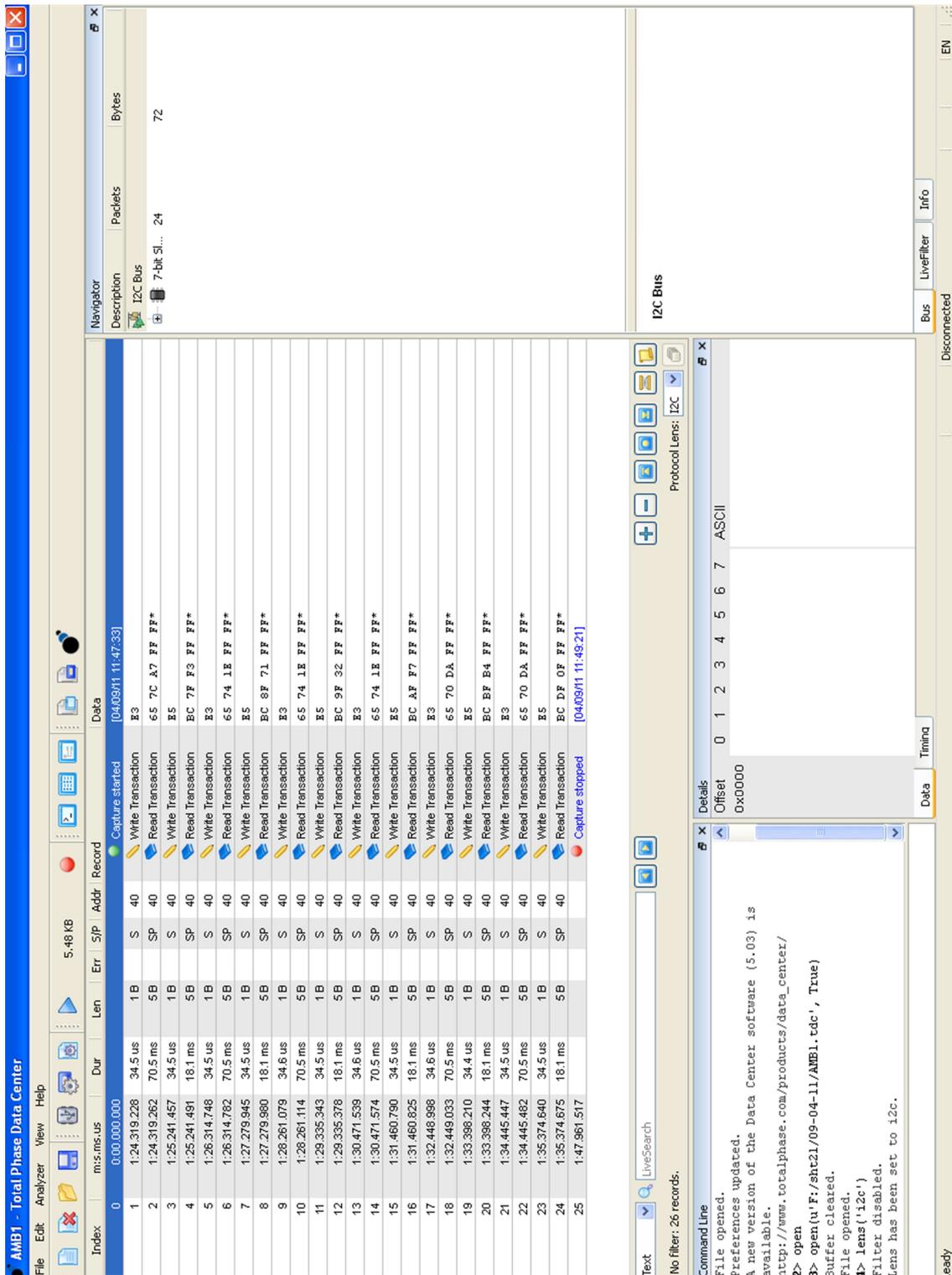
#### 4.2. Control del Monitoreo del Experimento

Las pruebas de funcionamiento y registro del sensor SHT21 de temperatura y humedad relativa se han realizado utilizando el microcontrolador MSP430 junto con su módulo de desarrollo. Se utiliza el lenguaje de programación C, con ayuda del software *Total Phase CrossWorks* y del guiador *FET* para MSP430.



**Figura No 23.** Tarjeta electrónica fabricada con el sensor SHT21 (en rojo), que se conecta al módulo de desarrollo para el Microcontrolador MSP430.

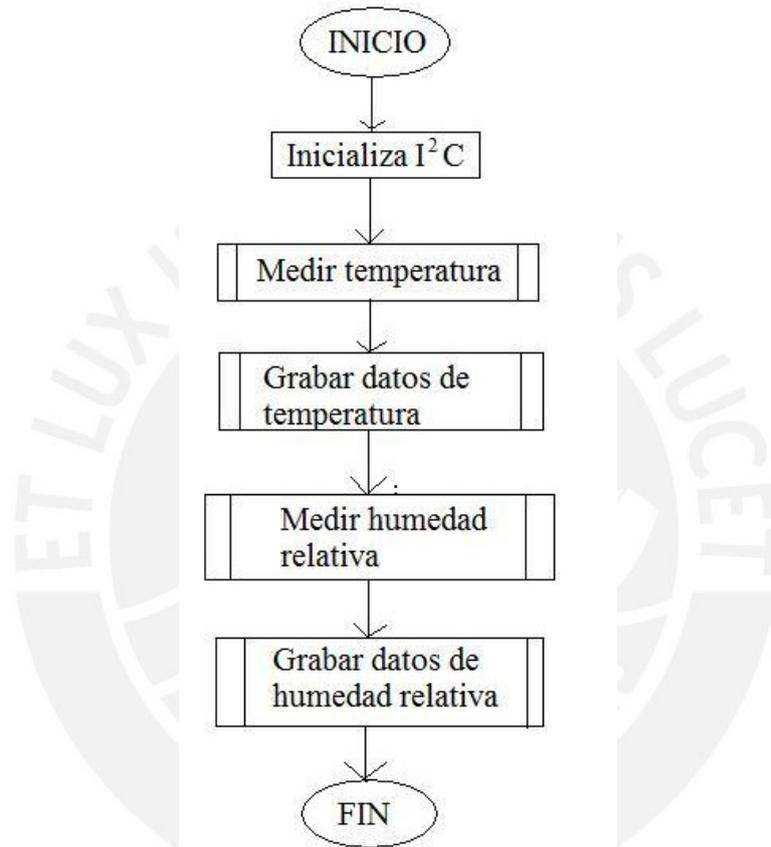
Como se ha explicado en el capítulo 3.4.3. el sensor trabaja con protocolo I<sup>2</sup>C, por lo que se debe utilizar el analizador Beagle I<sup>2</sup>C/SPI Protocol, incluido en el módulo de desarrollo, para capturar de manera correcta las mediciones del sensor en el software *Total Phase Crossworks*.



**Figura No 24.** Muestra del registro digital de la toma de datos usando el Software “Total Phase Crossworks” y el analizador “Beagle I<sup>2</sup>C/SPI Protocol”

En la figura 25 se observa el diagrama de flujo del programa desarrollado para sensar la temperatura y la humedad relativa con el sensor SHT21 y el microcontrolador MSP430. Este es ejecutado cada vez que el programa principal entra a la subrutina de

sensado de temperatura y humedad relativa. Primero se debe inicializar el sensor y el protocolo I<sup>2</sup>C para comunicación entre el sensor y el microcontrolador, seguido se entra a una subrutina para medir la temperatura y los datos obtenidos son guardados en memoria y finalmente se ejecuta la subrutina para medir la humedad relativa y los datos obtenidos se guardan en memoria. El programa o código se adjunta en el “Anexo 4”.



**Figura No 25.** Diagrama de flujo para sensar temperatura y humedad relativa con SHT21 y el MSP430.

La señal de salida del sensor son números en hexadecimal, éstos se tienen que convertir a números en decimal e introducirlos en las siguientes fórmulas (9 y 10) para obtener los valores de Humedad Relativa y Temperatura respectivamente, teniendo presente la hoja de datos del fabricante del sensor SHT21 [20].

$$RH = -6 + 125 \cdot \frac{S_{RH}}{2^{16}} \quad \dots\dots (9)$$

Donde:

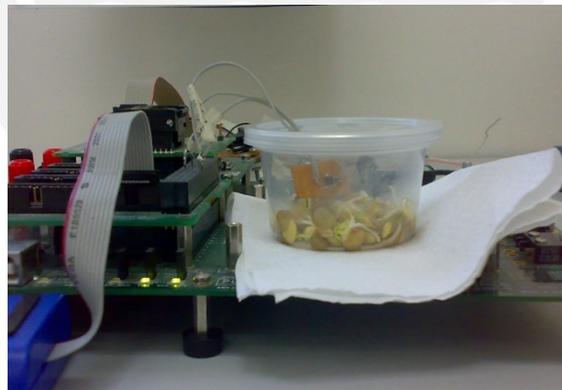
RH: Humedad Relativa en %  
S<sub>RH</sub>: Señal de salida de humedad relativa

$$T = -46.85 + 175.72 \cdot \frac{S_T}{2^{16}} \quad \dots\dots (10)$$

Donde:

T: Temperatura en °C  
S<sub>T</sub>: Señal de salida de temperatura

Se realizaron experimentos con semillas de lentejas según el procedimiento descrito en el “Anexo 5 - Protocolo de Realización de Pruebas del sensor SHT21”, para verificar el funcionamiento del sensor (tanto de la tarjeta electrónica, como la programación) y su respuesta a los cambios de temperatura, que el experimento pudiera experimentar en el espacio exterior así como estudiar el comportamiento de un ser vivo en condiciones similares a las del experimento a realizar. En la figura No 26 se observa la muestra en un recipiente completamente sellado, se opta por este envase ya que permite tener el ambiente de muestra tapado e introducir los cables requeridos para la conexión del sensor con el módulo de desarrollo.



**Figura No 26.** Sensor SHT21 introducido en envase de muestra.

Todas las pruebas con el sensor y el módulo de desarrollo se han llevado a cabo alrededor de las 10 a.m. dentro del “Cuarto limpio” del INRAS. Según el ISO/DIS 14644-12 un cuarto limpio es *“una habitación en la que la concentración del número de partículas aéreas es controlada y clasificada, y que es diseñada, construida y operada para controlar la introducción, generación y retención de partículas dentro de la*

habitación” [26]. La norma ISO/DIS 14644-12 indica que la limpieza del aire se debe monitorear a nivel de nanopartículas por pie cúbico. El cuarto limpio del INRAS monitorea su nivel de concentración de nanopartículas en tamaños de 500 Angstroms (50nm), obteniendo una clasificación de 1000; es decir, se tienen aproximadamente 1000 partículas de 50nm de tamaño por cada pie cúbico del cuarto limpio.

En la “Tabla 1” se puede ver el resumen de las mediciones obtenidas por el sensor de temperatura y humedad relativa durante las diferentes pruebas. Se considera en el caso de las mediciones a temperatura ambiente la desviación respecto a las mediciones realizadas, en el caso de las muestras en frío y caliente se considera la tolerancia típica del sensor [20]. Los resultados detallados de los experimentos se muestran en el “Anexo 6”.

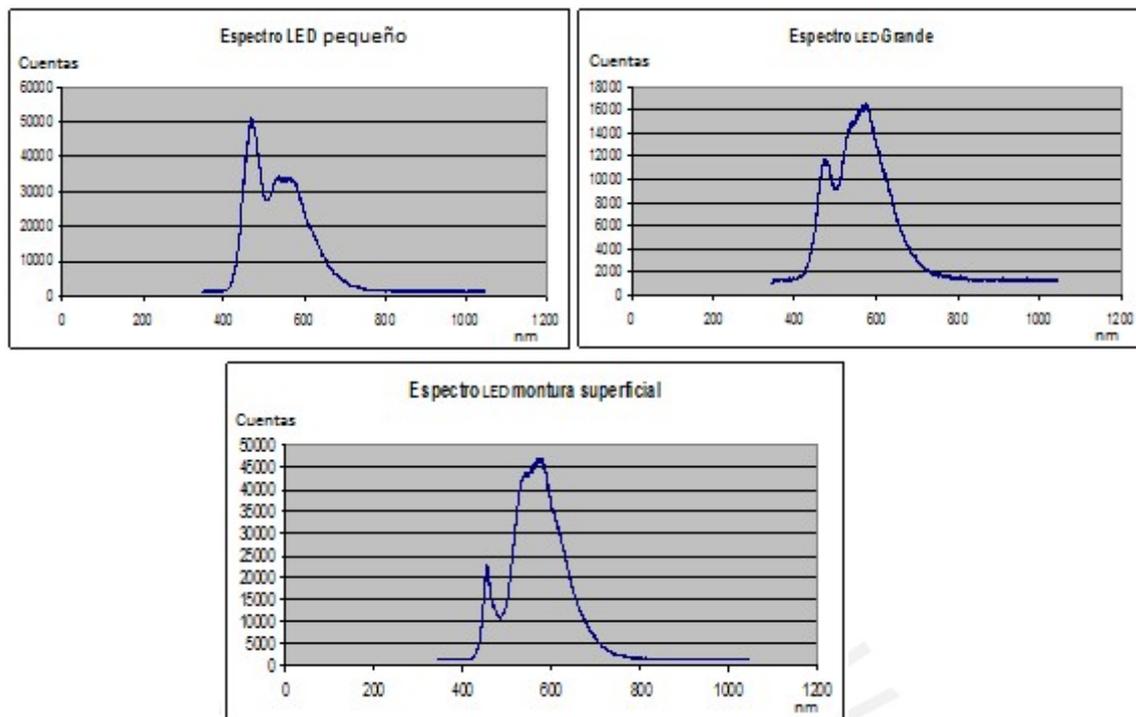
Detalle	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)
<b>Temperatura del Cuarto Limpio</b>	20,87 ± 0,17	39,9 ± 0,27
<b>Muestras 1, 2 y 3 a temperatura ambiente</b>	22,95 ± 0,17	86,84 ± 2,46
<b>Muestra 3 en caliente</b>	49,49 ± 0,6	83,92 ± 2,3
<b>Muestra 2 en frío</b>	4,75 ± 1	100,31 ± 5

**Tabla 1.** Resumen de mediciones del sensor SHT 21 en las pruebas definidas.

### 4.3. Sub-sistema de Toma de Fotografías

#### 4.3.1. Análisis de espectro de los LED's

Se analizaron 3 tipos de LEDs blancos en el espectrómetro del laboratorio de Física de la PUCP marca Pasco, uno pequeño, uno grande y uno de montura superficial; para determinar cuál de ellos emite la luz más blanca y se encuentra en la región más visible. En las siguientes figuras se puede apreciar el resultado, en el eje vertical la intensidad de luz (cuentas) y en el eje horizontal la longitud de onda (nm).

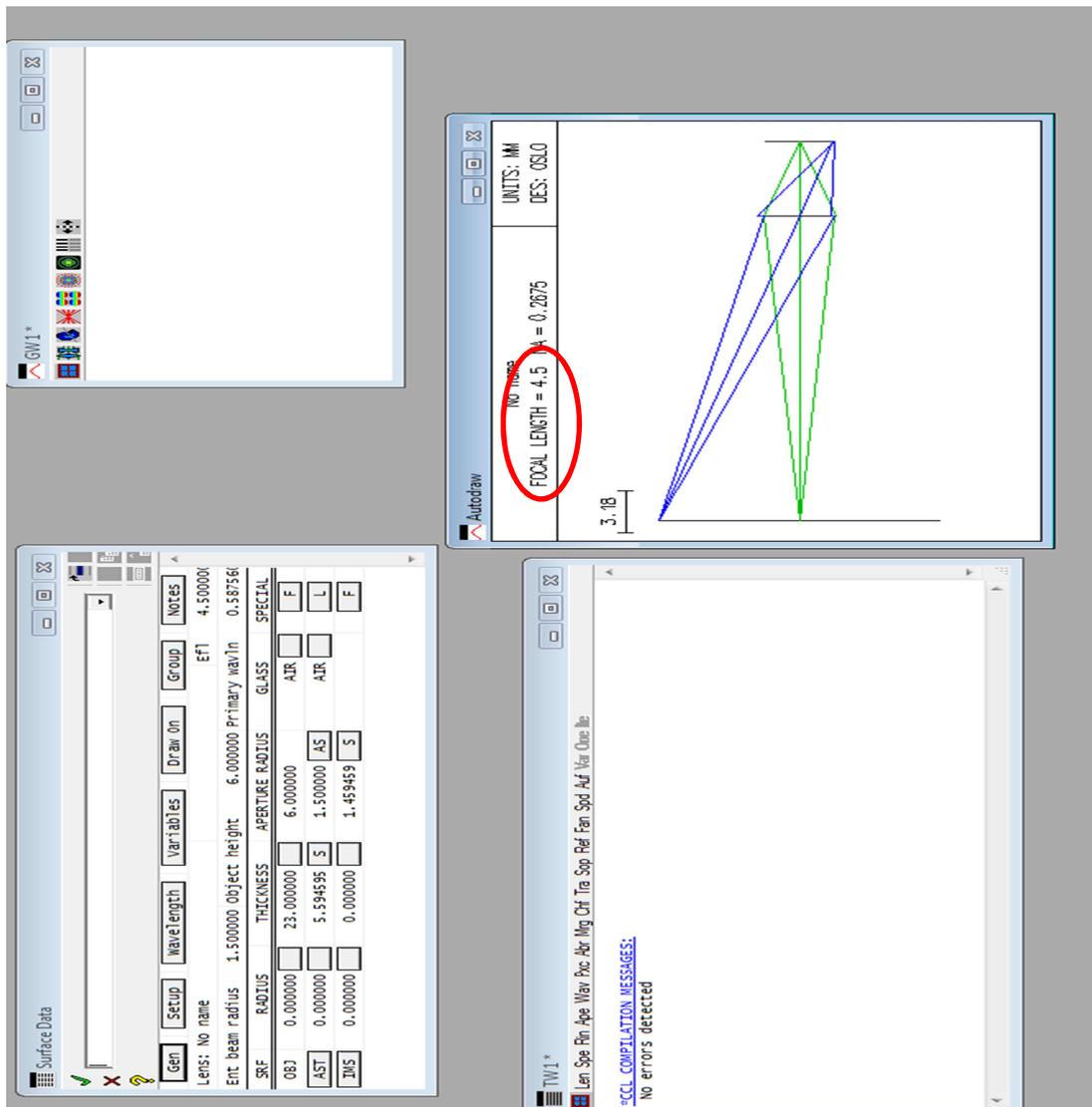


**Figura No. 27.** Espectros de LED medidos (pequeño, grande y montura superficial)

La Figura 27 nos muestra que el LED pequeño emite una luz distinta al LED grande y al de montura superficial, ya que el pico de intensidad de la luz más alto lo alcanza en la región del espectro cercana a 400nm. El LED de montura superficial en cambio presenta un pico elevado en la región de la luz blanca (espectro cercano a 600nm), que abarca una región amplia del espectro y son los más pequeños, por esto son los más adecuados para la iluminación.

#### 4.3.2. Simulación del lente escogido

Se utilizó el software Oslo [27] para simular el efecto de la distancia focal efectiva de 5 mm y comprobar el cálculo realizado en el capítulo 3.4.4.

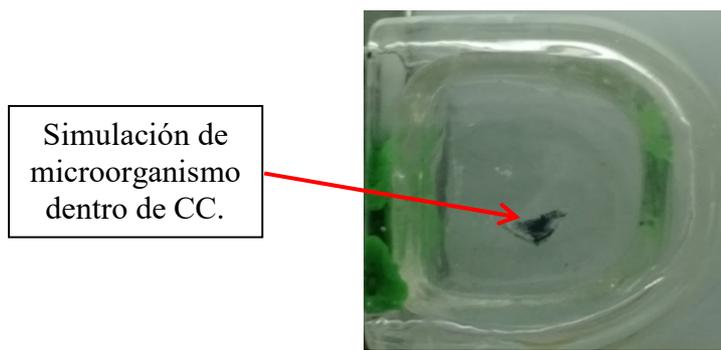


**Figura No. 28.** Presenta detalles de la simulación para obtener el diámetro del lente adecuado con el software OSLO [27]

En la figura No.28 se observa que el tamaño del objeto, 12 mm, se refleja en el tamaño de la cámara, 3mm, utilizando una distancia focal efectiva de 4.5. De esta manera se comprueba la necesidad de utilizar un lente con 5 mm de diámetro para obtener una imagen adecuada.

#### 4.3.3. Fotografías esperadas

Con la Cámara de Crecimiento fabricada, se han tomado unas fotografías con una cámara con resolución VGA. La cámara se posiciona a unos 3cm por encima de la base y se utiliza LEDs para iluminación.



**Figura No. 29.** Simulación de fotografía del experimento. Fotografía esperada.

No se utilizó ningún lente para tomar la fotografía de la Figura No 29. Como se ha explicado en el capítulo 3.4.4. y 4.3.2., el lente serviría para mejorar el enfoque de la cámara y observar sólo la porción de microorganismo a estudiar.

#### 4.4. Análisis Volumétrico del Experimento.

De acuerdo al punto 2.1, uno de los requerimientos del experimento es realizarlo en un espacio igual a un cubo de 5cm de arista, es decir un volumen de  $125\text{cm}^3$ , que es el espacio asignado para esta carga dentro del picosatélite PUCP-SAT.



**Figura No. 30.** Largo del prototipo medido en pulgadas. Cámara de crecimiento CC: 1" (2.5cm), base de microválvula: 0.8" (2cm), cámara de almacenamiento CA: 2" (5cm)

Para verificar el espacio (volumen) ocupado por el prototipo diseñado, calculamos el volumen de cada componente:

- Volumen de CC:

$$v = \pi \times (1.25)^2 \times 2 = 9.8cm^3 \dots\dots (11)$$

- Volumen de válvula:

$$v = 2.057 \times 3.17 \times 4.65 = 37.88cm^3 \dots\dots (12)$$

- Volumen de CA:

$$v = \pi \times (1)^2 \times 5 = 15.7cm^3 \dots\dots (13)$$

Se estima que el volumen ocupado por la cámara fotográfica no debe ser mayor a  $6cm^3$ , incluyendo su tarjeta electrónica para montaje. El volumen ocupado por el sensor de temperatura y humedad relativa no influye en este análisis ya que estos se instalan dentro de la CC.

El volumen total de los componentes diseñados es de aproximadamente  $70cm^3$ , por lo que el diseño cumple con el requerimiento de espacio asignado. Sin embargo, para su independización es requerido que los sistemas de energía, comunicaciones, control central, etc. ocupen un espacio máximo de  $55cm^3$ .

Por temas de manufactura y distribución del espacio en el satélite, se sugiere que la CA se instale de manera perpendicular a la válvula, ya que de lo contrario restaría espacio para otros componentes, tal como se muestra en la figura No 30. Se debe tener en cuenta que en este prototipo el pitón que se ha colocado al extremo opuesto de la CC agrega 2cm de largo, éste debe ser reemplazado por un pitón más corto para que alcance en los 10cm de largo con los que cuenta el picosatélite.

Mediante las pruebas realizadas se ha comprobado el funcionamiento del diseño de todos los componentes discretos de la infraestructura y los sub-sistemas para el monitoreo del experimento. Utilizando componentes electrónicos de bajo costo y manufactura de la infraestructura en los laboratorios de Química y Mecánica de la universidad, probando así que es posible implementar este proyecto en un próximo satélite.

## CONCLUSIONES

Este trabajo ha logrado diseñar un primer sistema de monitoreo e infraestructura que da soporte a una cámara de microbiología como carga útil en un picosatélite. Es posible ocupar un volumen menor a un cubo de 5cm de arista, sin embargo es mejor optar por una configuración más rectangular; asimismo no podrá ser independiente ya que requiere utilizar los sistemas de energía y comunicación del picosatélite.

Como resultado de esta investigación se ha identificado y diseñado los componentes necesarios para este proyecto:

- Identificación y diseño de la infraestructura para llevar a cabo un experimento de microbiología en un picosatélite, con la creación de un prototipo.
- Para la inoculación y separación de ambientes a diferentes presiones, así como para dar inicio automáticamente al experimento se creó un prototipo con una micro válvula controlada por un microprocesador.
- Se ha logrado diseñar el sub-sistema de monitoreo de temperatura y humedad relativa que ha sido probado usando el sensor SHT21 en muestras de lentejas.
- Se ha propuesto y simulado un sub-sistema de monitoreo por fotografías para observar el crecimiento del microorganismo en tamaño real, perceptible por el ojo humano usando una cámara digital VGA, con ayuda de un lente adecuado y un sistema de iluminación compuesto por LEDs.

Para que esta carga útil pueda ser lanzada en el siguiente picosatélite del INRAS, hace falta la implementación e integración en conjunto con los demás componentes y sistemas de comunicación, energía, control central, almacenamiento de información, etc, del picosatélite. Además de realizar las pruebas de pre-lanzamiento y ejecución del experimento completo.

Por medio de éste trabajo el INRAS incursiona por primera vez en el Área de la Astrobiología y se provee experiencia base para el desarrollo del proyecto con un

microorganismo y otros similares que no sean exclusivamente con “*Phytophthora Infestans*”, sino que también se puede utilizar con otros microorganismos.

La inversión estimada durante esta investigación es mucho menor que la del proyecto pionero GeneSat de la NASA cuyo costo integral a lo largo de su ciclo de vida de 2.5 años fue de \$8 millones, esto incluye el GeneBox de prueba y la infraestructura necesaria para lanzarlo y operarlo en órbita [28].



## **RECOMENDACIONES**

El continuo desarrollo tecnológico conlleva que para el momento que este proyecto sea finalmente diseñado e implementado probablemente existan nuevos componentes y tecnologías que puedan ser utilizados con mejores características a los mencionados.

Existen otros métodos para la captura de imágenes, se debería considerar aquellos que eviten la toma desde fuera de la CC, estos podrían generar mejores imágenes para analizar. Se puede complementar con estudios de óptica que finalmente entreguen mejores resultados.

Como parte de la implementación de este experimento hay un componente de estudio microbiológico que debe ser llevado a cabo con mayor detalle ya que podría dar lugar a modificaciones en el diseño del monitoreo fotográfico. Asimismo, este estudio permitirá evaluar el comportamiento del medio de cultivo, se debe tomar en cuenta la viscosidad y la composición del mismo, ya que, por la diferencia de presiones y las temperaturas a las que pueda estar sometido en el espacio exterior podría cambiar su estado y sus propiedades y afectar al experimento.

Ya que el microorganismo escogido se adapta mejor a temperaturas más bajas y no soporta temperaturas altas, se recomienda que el experimento se aloje en la parte más fría del satélite, donde la transferencia de calor sea mínima y se encuentre alejado de los componentes electrónicos que disipan energía.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA)  
s/f *About NASA*. Consulta: 13 de julio del 2015.  
  
[http://www.nasa.gov/about/highlights/what\\_does\\_nasa\\_do.html](http://www.nasa.gov/about/highlights/what_does_nasa_do.html)
- [2] COCKELL, Charles  
2002 "Astrobiology-a new opportunity for interdisciplinary thinking". *Space Policy 18*. Cambridge: Elsevier, pp. 263-266.
- [3] MILLER, Katheryn S.  
2001 "A rocky road to outer space". *Stanford Report*. California: Stanford University.
- [4] CUBE SAT ORGANIZATION  
s/f *Eurorocket 2003. Missions*. Consulta: 14 de julio del 2015  
  
<http://www.cubesat.org>  
<http://www.cubesat.org/index.php/missions/past-launches/12-eurorocket-2003>
- [5] CUBE SAT ORGANIZATION  
s/f *Mission Statement. About Us*. Consulta: 14 de julio del 2015.  
  
<http://www.cubesat.org/index.php/about-us/mission-statement>
- [6] PARRA, Macarena P. y otros  
2008 "Studying Space Effects On Microorganisms Autonomously: Genesat, Pharmasat, And The Future Of Bio-Nanosatellites". *Gravitational and Space Biology*. California: NASA, pp. 9-18.
- [7] YOST, Bruce y otros  
s/f "GeneSat-1 Space Technology Demonstration". *Post Flight Report - GeneSat Satellite Project*. California: NASA Ames Reserch Center.
- [8] HINES, John W. y Karolyn RONZANO  
s/f "PharmaSat Flight Project Overview". *Supporting NASA Mision*. California: NASA.
- [9] HERAUD P., Jorge, Hugo PRATT, Antonio LIRA, Jorge MORENO, Manuel YARLEQUE, Gino GALVEZ, Rafael VILCHEZ, Daniel MENENDEZ, Neils VILCHEZ, Jhonnell FERNANDEZ, Victor CENTA, R. RIVERA, Felipe CARRERO, F. TRUJILLANO, J. PERALTA, O. FERNANDEZ, O. VELARDE, Diana POSTIGO, Augusto YIPMANTIN, A. TEJADA y O. PIMUNCHUMO.  
2013 "PUCP-SAT-1 and Pocket-PUCP: A Double Peruvian Satellite launch project". Ponencia presentada en 2<sup>nd</sup> IAA Conference on University Satellite Missions or Cubesat Workshop 2013. UnB. Roma, 08 de Agosto.
- [10] COSPAR/IAU Workshop on Planetary Protection

- 2002, Amended 2011 “COSPAR Planetary Protection Policy”. World Space Council. Houston, Texas. 20 October 2002; As Amended to 24 March 2011.
- [11] PÉREZ, W. y G. FORBES  
2008 “El Tizón Tardío de la Papa [Manual Técnico]”. Lima. Centro Internacional de la Papa.
- [12] EHRENFREUND P. y otros  
2014 “The O/OREOS mission – Astrobiology in low Earth orbit”. *Acta Astronautica*. s/l: ELSEVIER, pp. 501-508.
- [13] HORNECK, Gerda y otros  
2010 “Space Microbiology”. *American Society for Microbiology*. California: Microbiology and Molecular Biology Reviews. pp121-156.
- [14] NINCO, Luis  
2003 “Deteccion y estudio de rayos cósmicos y su efecto ionizante en sales del tipo A(2)BX(4)”. Tesis de Doctorado. Puerto Rico: Universidad de Puerto Rico.
- [15] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA)  
2009 *What is Microgravity*. Consulta: 14 de julio del 2015.  
<http://www.nasa.gov/centers/glenn/shuttlestation/station/microgex.html>
- [16] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA)  
2001 *Gravity Hurts (so Good)*. Consulta: 8 de mayo del 2009.  
[http://science.nasa.gov/headlines/y2001/ast02aug\\_1.htm?list545931](http://science.nasa.gov/headlines/y2001/ast02aug_1.htm?list545931)
- [17] FLORES, Alan  
2010 “*Planos de Diseño de Cámara de Microbiología y recipiente de vidrio para la Cámara de Crecimiento*”. Lima. PUCP.- Comunicación personal
- [18] ASCO SCIENTIFIC  
s/f *Inert Isolation Type, 2-Way “TFE” Isolation valves, ¼ -28 UNF Porting, In-line mount. 2/2 Series 190&330* [Hoja de Datos]. s/l. Consulta: 28 de febrero 2016.  
[https://www.ascovalve.com/Common/PDFFiles/Product/series\\_190&330r4.pdf](https://www.ascovalve.com/Common/PDFFiles/Product/series_190&330r4.pdf)
- [19] TEXAS INSTRUMENTS  
2007 *MSP430F241x, MSP430F261x Mixed Signal Microcontroller* [Hoja de Datos]. Texas.
- [20] SENSIRION  
2010 *Datasheet SHT21, Humidity and Temperature Sensor*. s/l.
- [21] ST MICROELECTRONICS  
2007 *VL6624 VS6624. 1.3 Megapixel single-chip camera module*. [Hoja de Datos]. s/l.
- [22] EDMUND OPTICS WORLDWIDE

s/f *Tech Spec 2mm Dia. X 6.0mm FL, MgF<sub>2</sub> Coated, Achromatic Doublet Lens*. Consulta: 26 de febrero de 2016.

<http://www.edmundoptics.com/optics/optical-lenses/achromatic-lenses/mgf2-coated-achromatic-lenses/65569/>

[23] PUMPKIN, INC

2009 *CubeSat Kit Development Board (DB). Hardware revision: D* [Hoja de Datos]. California.

[24] HERAUD P., Jorge, Hugo PRATT, Sayda MUJICA, Manuel YARLEQUË, Rafael VÍLCHEZ, Daniel MENENDEZ, Neils VÍLCHEZ, Jhonnell FERNANDEZ, Víctor CENTA, Felipe CARRERO, Joaquín PERALTA, David TORRES, Manuel VALENZUELA, Gonzalo TINEO, Víctor APARICIO, Alvaro BUENO, Erick GONZALES y Paulo MAMANI

2014 "From the first two peruvian satellites to research in space". Ponencia presentada en *1<sup>st</sup> Latin American IAA Cubesat Workshop 2014*. UnB. Brasilia, 2 de abril.

[25] MAXIM INTEGRATED

1995 *12V or Adjustable, High Efficiency, Low IQ , Set-Up DC-DC Controller* [Hoja de Datos]. s/l.

[26] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION

2016 *ISO/DIS 14644-12 Cleanrooms and associated controlled environments – Part 12: Specifications for monitoring air cleanliness by nanoscale particle concentration*. [Standard]

[27] LAMBDA RESEARCH CORPORATION

s/f *OSLO Optics Software for Layout and Optimization. Optics Reference Version 6.1* [Manual]. Massachusetts.

[28] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA)

2007 *FAQ GeneSat – 1*. NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA. Consulta: 21 de febrero del 2017.

<https://www.nasa.gov/centers/ames/research/2007/faq-genesat1.html>