

NANO-SATÉLITE RECUPERABLE PARA ESTUDIOS DE LOS EFECTOS DE LA RADIACIÓN
CÓSMICA EN UNA CARGA BIOLÓGICA EXPUESTA EN LA ESTRATOSFERA: FASE II.

JHON ALEXANDER LÓPEZ BOHÓRQUEZ

REALIZADO CON LA ASESORÍA DE:

ÓSCAR MAURICIO ARIAS BALLÉN

UNIVERSIDAD EL BOSQUE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

MAYO, 2019

UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

ÁREA DE ÉNFASIS: CONTROL Y AUTOMATISMOS INDUSTRIALES

**NANO-SATÉLITE RECUPERABLE PARA ESTUDIOS DE LOS EFECTOS DE
LA RADIACIÓN CÓSMICA EN UNA CARGA BIOLÓGICA EXPUESTA EN LA
ESTRATOSFERA: FASE II.**

JHON ALEXANDER LÓPEZ BOHÓRQUEZ

REALIZADO CON LA ASESORÍA DE:
ÓSCAR MAURICIO ARIAS BALLÉN

NOTA DE SALVEDAD

Según el artículo 37 del 14 de diciembre de 1989 del acuerdo 017, "La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia".

AGRADECIMIENTOS

Como primera instancia quiero agradecer a Gloria Nelly Bohórquez Franco quien fue un apoyo emocional y económico durante toda la carrera y especialmente, durante la elaboración del presente proyecto; así mismo, al ingeniero Óscar Mauricio Arias Ballén por su asesoría, dedicación y dirección para con el proyecto. Por otra parte, doy gracias a Aureliano López y Marco Emilio Bohórquez por su colaboración fundamental, también, a Catalina Zambrano Borja por aconsejar y apoyar la realización y culminación del proyecto, a Juan Carlos Suarez por ser parte de la financiación y apoyo emocional, y finalmente, a la empresa Vidrios y Aluminios Bohórquez Limitada que fue proveedor y ayudó en la construcción del proyecto.

RESUMEN

Un reto para el desarrollo de ciencia y tecnología para llegar al espacio a bajo costo son los nano-satélites. El semillero de Astrobiología-BIDA de la Universidad El Bosque realizó el diseño de un nano-satélite que permita exponer una bacteria a radiación solar en la estratosfera. La intención del presente trabajo fue evaluar el proyecto propuesto por el semillero y determinar acciones de mejora de este en cuanto al diseño estructural y la electrónica inmersa. Así mismo, se realizó un prototipo que corrija las fallas encontradas en el diseño propuesto por el semillero, tanto en la estructura física como en la electrónica a bordo, teniendo en cuenta las principales variables de afectación, temperatura y radiación cósmica.

Por otra parte, se diseñaron e implementaron subsistemas de monitoreo y control que constantemente estén verificado el estado de la bacteria y comunicándolo a un operario del nano-satélite. Adicionalmente, se realizó se implementó una estructura hermética que hiciera las veces de incubadora para la bacteria, la cual se diseñó mediante simulaciones térmicas y de caudal de calor. Una vez diseñada, se implementó y se probó obteniendo resultados adecuados para que la bacteria no se vea afectada por la temperatura y que la electrónica no sufra averías debido a la radiación UV. Finalmente, se probó el sistema completo donde se ratificó que nano-satélite tendría una autonomía suficiente para supervisar la carga biológica durante todo el vuelo y mantenerla en un estado estable exceptuando que muera o sufra cambios biológicos debido a la radiación cósmica, objetivo central del presente documento.

Palabras Clave: Nano-satélite, carga biológica, estratosfera

ABSTRACT

A challenge for the development of science and technology to reach space at low cost are the nano-satellites. The seedbed of Astrobiology-BIDA of the El Bosque University made the design of a nano-satellite that allows exposing bacterium to solar radiation in the stratosphere. The intention of the present work was to propose the proposed by the seedbed and determine improvement actions in terms of structural design and immersive electronics. Likewise, a prototype was made to correct the faults found in the design proposed by the seedbed, both in the physical structure and in the electronics on board, taking into account the main variables of affectation, temperature, and cosmic radiation.

On the other hand, monitoring and control subsystems were designed and implemented that are constantly checking the status of the bacterium and communicating it to a nano-satellite operator. Additionally, a hermetic structure was implemented that would act as an incubator for the bacterium, which was designed using thermal simulations and heat flow. Once designed, it was implemented and tested getting suitable results so that the bacterium is not affected by the temperature and that the electronics do not suffer breakdowns due to UV radiation. Finally, the complete system was tested where it was confirmed that the nano-satellite would have sufficient autonomy to monitor the biological load during the entire flight and keep it in a stable state except that it was under biological changes due to cosmic radiation, the central objective of this document.

Keywords: Nano-satellite, biological load, stratosphere.

Tabla de Contenidos

| | | |
|-----|----------------------------------|----|
| 1 | Introducción | 19 |
| 2 | Definición del problema | 20 |
| 2.1 | Contexto..... | 20 |
| 2.2 | Manifestación..... | 21 |
| 2.3 | Causas | 22 |
| 2.4 | Efectos | 22 |
| 2.5 | Aspectos a solucionar | 23 |
| 2.6 | Justificación del proyecto | 23 |
| 2.7 | Propuesta de solución..... | 24 |
| 3 | Estado del arte | 24 |
| 3.1 | Bases teóricas | 24 |
| 3.2 | Tecnología..... | 28 |
| 4 | Glosario de términos | 30 |
| 5 | Objetivos: | 31 |
| 5.1 | General | 31 |
| 5.2 | Específicos..... | 31 |
| 6 | Requerimientos..... | 32 |
| 6.1 | Funcionales..... | 33 |
| 6.2 | De calidad..... | 34 |
| 6.3 | Restrictivos | 35 |
| 7 | Diseño Funcional..... | 36 |
| 7.1 | Modelo A | 36 |
| 7.2 | Modelo B | 40 |
| 7.3 | Discusión de modelos | 42 |
| 8 | Diseño detallado | 43 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 8.1 | Requerimientos de subsistemas | 43 |
| 8.2 | Requerimientos de componentes | 49 |
| 9 | Plan de Pruebas del Sistema | 71 |
| 9.1 | Plan de pruebas de componentes | 71 |
| 9.2 | Plan de pruebas de subsistemas | 76 |
| 9.3 | Plan de pruebas de integración | 79 |
| 10 | Diseño industrial | 79 |
| 10.1 | Análisis del contexto | 79 |
| 10.2 | Casos de uso..... | 81 |
| 10.3 | Requerimientos industriales..... | 83 |
| 10.4 | Materiales, procesos y normativas..... | 86 |
| 10.5 | Alternativas de configuración..... | 88 |
| 10.6 | Diseño detallado..... | 94 |
| 10.7 | Aplicación de normativas..... | 102 |
| 10.8 | Análisis ergonómico y antropométrico | 102 |
| 10.9 | Implementación – Producción..... | 102 |
| 10.10 | Documentación | 103 |
| 10.11 | Implementación de subsistemas | 112 |
| 11 | Implementación..... | 115 |
| 11.1 | Integración del sistema..... | 127 |
| 12 | Pruebas..... | 130 |
| 12.1 | Pruebas de componentes | 130 |
| 12.2 | Pruebas de subsistemas | 131 |
| 12.3 | Pruebas de integración | 134 |
| 13 | Ajustes..... | 135 |
| 14 | Pruebas del Sistema | 137 |

| | | |
|------|--------------------------------|-----|
| 15 | Manuales..... | 142 |
| 16 | Resultados | 142 |
| 16.1 | Objetivo 5.2.1 | 143 |
| 16.2 | Objetivo 5.2.2 | 144 |
| 16.3 | Objetivo 5.2.3 | 144 |
| 16.4 | Objetivo 5.2.4 | 145 |
| 17 | Discusión..... | 147 |
| 18 | Conclusiones | 152 |
| 19 | Referencias Documentales | 155 |
| 20 | Anexos..... | 159 |
| 20.1 | Manuales de uso | 159 |
| 20.2 | Aprobación | 165 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Sistema de ala emplumado y volante Bádminton. | 24 |
| Figura 2. Sistema electrónico de Control & Carga Biológica..... | 25 |
| Figura 3. Flujo del aire debido al efecto Coanda. | 25 |
| Figura 4. Anillo concéntrico - Vista lateral. | 26 |
| Figura 5. Anillo concéntrico - Vista superior..... | 26 |
| Figura 6. Nivel de acides pH contra tiempo [1]..... | 27 |
| Figura 7. Entrada y salida del sistema..... | 32 |
| Figura 8. Sistema de entradas y salidas. | 36 |
| Figura 9. Modelo A de diseño funcional..... | 37 |
| Figura 10. Modelo B de diseño funcional..... | 40 |
| Figura 11. Estructura funcional para el subsistema de control de temperatura. | 43 |
| Figura 12. Estructura funcional para el subsistema de monitoreo de altitud..... | 44 |
| Figura 13. Estructura funcional para el subsistema de ubicación y navegación. | 45 |
| Figura 14. Estructura funcional para el subsistema de monitoreo interno..... | 45 |
| Figura 15. Estructura funcional para el subsistema interno de Tx y Rx..... | 46 |
| Figura 16. Estructura funcional para la CPU..... | 47 |
| Figura 17. Estructura funcional del subsistema de comunicación..... | 48 |
| Figura 18. Estructura funcional del subsistema de alimentación de componentes | 49 |
| Figura 19. Estructura funcional del sensor de temperatura. | 49 |
| Figura 20. Estructura funcional del controlador..... | 50 |
| Figura 21. Estructura funcional del actuador. | 52 |
| Figura 22. Comportamiento de temperatura contra potencia [11]. | 52 |
| Figura 23. Estructura funcional del sensor de presión..... | 53 |
| Figura 24. Sensado de presión [12]..... | 53 |
| Figura 25. Diagrama de bloques de funcionamiento del componente [12]..... | 54 |
| Figura 26. Estructura funcional de la CPU (Monitoreo de Altitud)..... | 54 |
| Figura 27. Estructura funcional del receptor de GPS..... | 55 |
| Figura 28. Diagrama de bloques del componente UBLOX GPS [13]..... | 56 |
| Figura 29. Diagrama de bloques del funcionamiento del GPS SIM808 [14]. | 56 |
| Figura 30. Estructura funcional del receptor de GPS (Ubicación y navegación). | 56 |
| Figura 31. Estructura funcional del sensor de presión (monitoreo interno). | 58 |

| | |
|---|-----|
| Figura 32. Estructura funcional del sensor de temperatura (monitoreo interno)..... | 58 |
| Figura 33. Estructura funcional del sensor de humedad (monitoreo interno). | 59 |
| Figura 34. Estructura funcional de la CPU (Monitoreo interno). | 60 |
| Figura 35. Estructura funcional de la CPU A (Tx y Rx interno)..... | 61 |
| Figura 36. Estructura funcional del Tx y Rx inalámbrico A..... | 61 |
| Figura 37. Estructura funcional del Tx y Rx inalámbrico B..... | 62 |
| Figura 38. Estructura funcional de la CPU B (Tx y Rx interno)..... | 63 |
| Figura 39. Estructura funcional de la unidad central de procesamiento. | 64 |
| Figura 40. Periféricos de la tarjeta LattePanda [15]. | 65 |
| Figura 41. Estructura funcional de la CPU (Comunicación)..... | 66 |
| Figura 42. Estructura funcional del radiofaro. | 67 |
| Figura 43. Estructura funcional del componente que conecta a la red comercial. | 68 |
| Figura 44. Estructura funcional de la fuente DC..... | 68 |
| Figura 45. PCB del regulador [16]. | 69 |
| Figura 46. Regulador DC-DC [16]..... | 69 |
| Figura 47. Esquemático general de conexión del circuito. | 70 |
| Figura 48. Diagrama de bloques de la estructura física en términos térmicos. | 88 |
| Figura 49. Render del diseño 1. | 89 |
| Figura 50. Estructura física interna del diseño 1..... | 89 |
| Figura 51. Materiales del diseño 1. | 90 |
| Figura 52. Render del diseño 2. | 91 |
| Figura 53. Estructura física interna del diseño 2..... | 91 |
| Figura 54. Materiales del diseño 2. | 92 |
| Figura 55 Sistema de apertura y cierre. | 97 |
| Figura 56. Simulación térmica. | 98 |
| Figura 57. Flujo de calor del sistema. | 99 |
| Figura 58. Gradiente térmico. | 99 |
| Figura 59. Aislantes térmicos. | 100 |
| Figura 60. Estructura de soporte. | 101 |
| Figura 61. Iconografía de funcionamiento. | 103 |
| Figura 62. Simulación de medio ambiente..... | 104 |
| Figura 63. Simulación de medio ambiente..... | 104 |

| | |
|---|-----|
| Figura 64. Simulación de medio ambiente..... | 104 |
| Figura 65. Plancha No. 1. | 105 |
| Figura 66. Plancha No. 2. | 105 |
| Figura 67. Plancha No. 3. | 106 |
| Figura 68. Plancha No. 4. | 106 |
| Figura 69. Plancha No. 6. | 107 |
| Figura 70. Plancha No. 6. | 107 |
| Figura 71. Plancha No. 7. | 108 |
| Figura 72. Plancha No. 8. | 108 |
| Figura 73. Plancha No. 9. | 109 |
| Figura 74. Plancha No. 10. | 109 |
| Figura 75. Plancha No. 11. | 110 |
| Figura 76. Plancha No. 12. | 110 |
| Figura 77. Maqueta, vista frontal..... | 111 |
| Figura 78. Maqueta, vista superior. | 111 |
| Figura 79. Corte de tubo de 4" en cortadora sinfín..... | 112 |
| Figura 80. Corte de tubo de 10" en cortadora sinfín..... | 112 |
| Figura 81. Ajuste de tubos para rellenarlos de espuma. | 113 |
| Figura 82. Tubo con relleno de espuma poliuretano..... | 113 |
| Figura 83. Disposición final de los tubos. | 113 |
| Figura 84. Estructura física final - Vista superior. | 114 |
| Figura 85. Estructura física final - Vista frontal. | 114 |
| Figura 86. Estructura final - Vista isométrica. | 114 |
| Figura 87. Esquemático y montaje del módulo SIM808 con Arduino UNO [21]. | 115 |
| Figura 88. Diagrama de flujo para programación del subsistema de ubicación y comunicación. | 116 |
| Figura 89. Esquemático de conexión de Arduino Leonardo y sensor MS5611..... | 117 |
| Figura 90. Esquemático de conexión del Arduino Leonardo y el sensor DHT22. | 117 |
| Figura 91. Diagrama de flujo para la programación del sensor DHT22..... | 118 |
| Figura 92. Diagrama de flujo para programación del sensor DHT22. | 119 |
| Figura 93. Conexión entre el sensor MS5611 y el Arduino Leonardo. | 120 |
| Figura 94. Diagrama de flujo para la programación de la CPU..... | 121 |

| | |
|---|-----|
| Figura 95. Ajuste de LattePanda en estructura contenedora de electrónica. | 122 |
| Figura 96. Implementación de baterías en la estructura física contenedora de la electrónica denotando las respectivas salidas de voltaje..... | 123 |
| Figura 97. Esquemático de montaje general del Puente H a un Arduino Leonardo. | 124 |
| Figura 98. Gráfica de caracterización de la planta. | 124 |
| Figura 99. Diagrama de flujo para la programación de PID de temperatura. | 125 |
| Figura 100. Diagrama de sistema de control PID [22]. | 126 |
| Figura 101. Ubicación de resistencia generadora de calor y dispersor de aire. | 126 |
| Figura 102. Cámara interna del nano-satélite. | 126 |
| Figura 103. Fotografía capturada usando cámara del nano-satélite. | 127 |
| Figura 104. Planos para corte que forman la estructura contenedora y de soporte de la electrónica. | 128 |
| Figura 105. Vista frontal de los componentes electrónicos incorporados en la estructura del nano-satélite..... | 129 |
| Figura 106. Vista lateral de los componentes electrónicos incorporados en la estructura física..... | 129 |
| Figura 107. Vista superior de los componentes electrónicos incorporados en la estructura del nano-satélite..... | 129 |
| Figura 108. Vista inferior de los componentes electrónicos incorporados en la estructura del nano-satélite..... | 129 |
| Figura 109. Gráfica de temperatura contra tiempo..... | 132 |
| Figura 110. Temperatura medida contra tiempo. | 133 |
| Figura 111. Presión medida contra tiempo. | 133 |
| Figura 112. Humedad sensada contra tiempo..... | 133 |
| Figura 113. Comunicación correcta del protocolo I2C. | 134 |
| Figura 114. Comunicación incorrecta del protocolo I2C. | 134 |
| Figura 115. Mensaje enviado por el Arduino..... | 134 |
| Figura 116. Mensaje recibido por la LattePanda..... | 134 |
| Figura 117. Esquemático del circuito de alimentación a subsistemas. | 135 |
| Figura 118. PCB del circuito de repartición de alimentación a subsistemas. | 135 |
| Figura 119. PCB capa inferior de circuito de alimentación de subsistemas..... | 135 |
| Figura 120. PCB capa superior de circuito de alimentación a subsistemas. | 135 |

| | |
|--|-----|
| Figura 121. Temperatura del congelador..... | 138 |
| Figura 122. Cápsula puesta en funcionamiento..... | 138 |
| Figura 123. Cápsula insertada en el congelador..... | 139 |
| Figura 124. Detalle de congelamiento de la cápsula externa extraída del congelador. . | 139 |
| Figura 125. Tiempo de autonomía del sistema..... | 140 |
| Figura 126. Nano-satélite radiado con rayos UV..... | 141 |
| Figura 127. Nano-satélite radiado con rayos UV..... | 141 |
| Figura 128. Nano-satélite radiado con rayos UV..... | 141 |
| Figura 129. Filmación durante la prueba (00:03:05)..... | 141 |
| Figura 130. Filmación durante la prueba (04:09:10)..... | 142 |
| Figura 131. Gráfica de sensado de temperatura durante la prueba del sistema. | 143 |
| Figura 132. Gráfica de sensado de presión durante la prueba del sistema..... | 143 |
| Figura 133. Gráfica de sensado de humedad durante la prueba del sistema..... | 143 |
| Figura 134. Mensaje de texto enviado mediante el Módulo GSM. | 144 |
| Figura 135. Visualización de la ubicación del GPS en la Universidad El Bosque. | 144 |
| Figura 136. Visualización de la ubicación del GPS en el centro de Bogotá..... | 144 |
| Figura 137. Perspectiva inferior del módulo electrónico. | 145 |
| Figura 138. Perspectiva superior del módulo electrónico..... | 145 |
| Figura 139. Perspectiva lateral del módulo electrónico. | 145 |
| Figura 140. Perspectiva frontal del módulo electrónico..... | 145 |
| Figura 141. Módulo interno..... | 146 |
| Figura 142. Perspectiva isométrica de cápsula final..... | 146 |
| Figura 143. Perspectiva superior de la cápsula final sin tapas. | 146 |
| Figura 144. Módulo externo. | 146 |
| Figura 145. Perspectiva frontal de cápsula final..... | 146 |
| Figura 146. Perspectiva superior de la cápsula con tapas. | 146 |
| Figura 147. Gráfica de altitud contra tiempo..... | 148 |
| Figura 148. Gráfica de altitud contra tiempo en condiciones constantes..... | 149 |
| Figura 149. Variación de la temperatura y presión atmosféricas en función de la altitud en la atmósfera terrestre [23]. | 151 |
| Figura 150. Diagrama físico de LattePanda [21]. | 159 |
| Figura 151. Arduino IDE..... | 160 |

| | |
|---|-----|
| Figura 152. Arduino IDE - Configuración..... | 160 |
| Figura 153. Arduino IDE - Selección de puerto. | 161 |
| Figura 154. Arduino IDE - Carga de programa..... | 161 |
| Figura 155. Abrir programa..... | 161 |
| Figura 156. Inicio del programa. | 162 |
| Figura 157. Vista isométrica de la estructura externa. | 162 |
| Figura 158. Vista isométrica de la estructura interna..... | 163 |
| Figura 159. Estructura interna..... | 163 |
| Figura 160. Estructura interna sellada..... | 164 |
| Figura 161. Estructura externa..... | 164 |
| Figura 162. Estructura externa sellada..... | 165 |

Lista de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Descripción de entradas y salidas de los subsistemas para el modelo A. | 37 |
| Tabla 2. Descripción de entradas y salidas de los subsistemas para el modelo B. | 41 |
| Tabla 3. Requerimientos para el subsistema de control de temperatura..... | 43 |
| Tabla 4. Requerimientos para el subsistema de monitoreo de altitud..... | 44 |
| Tabla 5. Requerimientos para el subsistema de monitoreo interno. | 45 |
| Tabla 6. Requerimientos para el subsistema de monitoreo interno. | 46 |
| Tabla 7. Requerimientos para el subsistema interno de Tx y Rx. | 46 |
| Tabla 8. Requerimientos para el subsistema de comunicación..... | 48 |
| Tabla 9. Selección de sensor de temperatura. | 49 |
| Tabla 10. Especificaciones técnicas. [9] | 50 |
| Tabla 11. Selección de componente controlador. | 51 |
| Tabla 12. Especificaciones técnicas. [10] | 51 |
| Tabla 13. Selección de componente actuador..... | 52 |
| Tabla 14. Selección de sensor de presión..... | 53 |
| Tabla 15. Selección de componente de CPU (Monitoreo de Altitud). | 54 |
| Tabla 16. Selección de componente receptor de GPS. | 55 |
| Tabla 17. Selección de componente de la CPU (Ubicación y navegación). | 57 |
| Tabla 18. Especificaciones técnicas [10]. | 57 |
| Tabla 19. Selección de sensor de presión (monitoreo interno). | 58 |
| Tabla 20. Selección de sensor de temperatura (monitoreo interno). | 59 |
| Tabla 21. Selección del sensor de humedad (monitoreo interno)..... | 59 |
| Tabla 22. Selección de la CPU (Monitoreo interno)..... | 60 |
| Tabla 23. Selección de e la CPU A (Tx y Rx interno)..... | 61 |
| Tabla 24. Selección de Tx y Rx inalámbrico A. | 62 |
| Tabla 25. Selección de Tx y Rx inalámbrico B. | 62 |
| Tabla 26. Selección de la CPU B (Tx y Rx interno). | 63 |
| Tabla 27. Selección de la unidad central de procesamiento..... | 64 |
| Tabla 28. Selección de la CPU (Comunicación). | 66 |
| Tabla 29. Selección de radiofaro. | 67 |
| Tabla 30. Selección de componente que conecta a la red comercial. | 68 |
| Tabla 31. Selección de batería. | 69 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 32. Conducción térmica del diseño 2. | 93 |
| Tabla 33. Conducción térmica del diseño 2. | 93 |
| Tabla 34. Criterios de evaluación del diseño. | 94 |
| Tabla 35. Ficha técnica [17] | 95 |
| Tabla 36. Ficha técnica Poliuretano [17]. | 95 |
| Tabla 37. Ficha técnica Polietileno [17]. | 95 |
| Tabla 38. Ficha técnica Acrílico [17]. | 96 |
| Tabla 39. Ficha técnica acero inoxidable [18]. | 96 |
| Tabla 40. Ficha técnica aluminio [19]. | 96 |
| Tabla 41. Ficha técnica sílica [20]. | 97 |
| Tabla 42. Prueba del sensor de temperatura MS5611. | 130 |
| Tabla 43. Tabla de resultados de resistencia generadora de calor. | 130 |
| Tabla 44. Prueba del sensor de humedad relativa. | 131 |
| Tabla 45. Prueba del LattePanda. | 131 |
| Tabla 46. Prueba de control de temperatura. | 131 |
| Tabla 47. Datos obtenidos al sensar temperatura contra tiempo. | 132 |
| Tabla 48. Prueba se monitoreo interno. | 132 |
| Tabla 49. prueba de enlace a red comercial. | 133 |
| Tabla 50. Índice UV y Dosis Eritémica Estándar [25] | 140 |
| Tabla 51. Cálculos y análisis del globo para elevar el nano-satélite. | 147 |
| Tabla 52. Delta de temperatura entre ambiente de simulación y vuelo. | 150 |

1 INTRODUCCIÓN

A lo largo del presente documento se encontrará una evaluación del nano-satélite propuesto por semillero de Astrobiología-BIDA de la Universidad El Bosque, allí se evidencian los problemas manifestados por el mismo semillero, y otros evidenciados por el investigador principal y el auxiliar de desarrollo. Por otra parte, se encontrará una propuesta de solución, con objetivos enfocados a cumplir con lo requerido por el semillero junto con una metodología a realizar en un año para finiquitar cada tarea del proyecto.

Es de aclarar que, el principal objetivo del semillero de Astrobiología-BIDA es el de estudiar los efectos que puede traer la exposición a radiación cósmica en una bacteria. Dichos efectos van desde cambios en su estructura bacteriana, cambios en estructura de ADN, e incluso, la muerte de la bacteria.

Es por lo anterior que la propuesta de solución se desglosa de los problemas manifestados y del estado arte (teniendo en cuenta los requerimientos estipulados por el semillero), donde se estudia físicamente los parámetros necesarios para que la carga biológica viva, la aerodinámica del nano-satélite y la tecnología necesaria para exponer la carga biológica en la estratosfera y retornarla a un punto previamente establecido, asegurando así, la recuperación de nano-satélite y de la carga biológica para posterior estudio por parte de biólogos.

Así mismo, se realiza la implementación y pruebas de funcionamiento del sistema propuesto donde se garantiza que se solucionan los problemas encontrados y se cumple a cabalidad los requerimientos dados por el cliente. No obstante, a lo largo del documento se detalla en cada simulación realizada, se muestran los datasheet del fabricante de componente, se especifican los circuitos usados en cada subsistema, los algoritmos de implementación y finalmente, las pruebas del sistema.

Finalmente, se da una conclusión correspondiente al trabajo realizado donde se evalúa si es factible continuar a la siguiente fase del proyecto que corresponde al descenso controlado del nano-satélite y a la recuperación del nano-satélite. Adicionalmente, se dejan sugerencias

de pruebas de funcionamiento del sistema que dan una mayor certeza de que el nano-satélite no fallará, se recuperará y no tendrá imprevistos de funcionamiento o de estructura durante el vuelo.

2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

2.1 Contexto

El estudio de la astronomía en Latinoamérica no tiene mayor relevancia, salvo por algunos países que destacan como Brasil y Argentina. Sin embargo, a pesar del escaso estudio astronómico en Colombia, el semillero de Astrobiología-BIDA de la Universidad El Bosque se ha interesado en el estudio del comportamiento de cargas biológicas en condiciones atmosféricas, así como también, variables de presión, temperatura, humedad relativa, radiación solar y altitud en ambientes atmosféricos.

El semillero de Astrobiología-BIDA realizó el diseño de un nano-satélite el cual tiene el objetivo de exponer una carga biológica en la estratosfera y realizar el sensado de algunas variables atmosféricas (presión, temperatura, humedad relativa y altitud) en su paso por la estratosfera para luego retornarla en tierra en un sitio de destino determinado, en buen estado para realizarle sus correspondientes estudios biológicos. Dicho estudio y diseño propuesto por el semillero de Astrobiología-BIDA se basa totalmente en la documentación encontrada en la literatura, y, no se ha podido culminar la primera fase propuesta por problemas de diseño en el nano-satélite, especialmente la inseguridad de registrar correctamente las variables atmosféricas a las que se expondría la carga biológica y tampoco se percibe segura su posterior recuperación.

Actualmente, el nano-satélite se encuentra en la fase I de desarrollo, la cual consiste en un prototipo de prueba que permite evaluar posibles fallos del sistema. Dicho prototipo debe realizar el proceso de sensado de temperatura interna y externa, posición en coordenadas geográficas, humedad relativa y altitud durante un vuelo simulado, pero no se ha realizado dicha simulación. Adicionalmente, el sistema operativo actual del nano-satélite es

Lightweight X11 Desktop Environment (entorno de escritorio libre para Unix y Linux); dicho software es una variación de distribución propia personalizada, sin embargo, no ha sido culminado dado que aún se encuentran logos propios de marca (*Lightweight X11 Desktop Environment*). En cuanto al entorno físico, el nano-satélite no cuenta con un diseño industrial sino con un diseño de laboratorio, el hardware no ha sido puesto en operación, y, por ende, el software no controla el hardware.

Por otra parte, aún no se han cultivado las cepas de la bacteria a exponer a en la estratosfera, pero ya se encuentra definido el protocolo de pruebas de la carga biológica (*Bacillus acidophilus*), y se precisó cultivar dos cepas de dicha bacteria. La primera cepa (cepa A) estará en tierra en constante observación como referente de comparación; la segunda cepa (cepa B) será expuesta en la estratosfera a la radiación cósmica mientras se garantizan condiciones de humedad relativa, temperatura y presión adecuadas para que la bacteria viva. Una vez haya descendido, se analizará si hubo cambios en su estructura biológica de la cepa B con respecto a la cepa A.

2.2 Manifestación

El semillero de Astrobiología-BIDA manifestó que aunque el nano-satélite fue diseñado para exponer una carga biológica en la estratosfera mientras realiza el proceso de sensado de algunas variables atmosféricas (presión, temperatura, humedad relativa, y altitud), podría fallar (basándose en la premisa de ingeniería que dice que si algo puede fallar, fallará) al superar la troposfera debido a que el sistema de calefacción no garantiza una temperatura adecuada (-25°C a 80°C) para el correcto funcionamiento de la electrónica a bordo; adicionalmente, la temperatura de la carga biológica no alcanza los 15°C haciendo factible que la bacteria muera. En adición, el nano-satélite no se podría recuperar debido a que el sistema de planeación aerodinámico es insuficiente para asegurar un descenso controlado, y una vez ha aterrizado, las coordenadas de ubicación proporcionadas por el nano-satélite no serían ni cercanas a las esperadas, y además no tiene un sistema de radio-faro que anuncie su posición final.

2.3 Causas

1. El sistema de control de temperatura es lento y no supera las -25°C debido a que la cápsula térmica no aísla la temperatura externa de la interna dificultando que la temperatura interna aumente. Adicionalmente, el sistema de radiación térmico está mal diseñado y no transmite el caudal a toda la cápsula electrónica del nano-satélite.
2. Es difícil registrar las variables atmosféricas a las que se vería expuesta la carga biológica debido a que sensores de las variables de interés son de alta inercia en los límites del rango de temperatura (-55°C - 150°C).
3. El sistema de planeación aerodinámico es mecánico y no electromecánico, por tanto, no es operado mediante un sistema de control electrónico que responda a la aerodinámica externa particular y/o a situaciones que puedan requerir cambiar su preajuste mecánico para guiar al nano-satélite a un punto determinado. En el estado del arte se detalla que el ángulo de reacción al viento en sus alerones es de 15° con respecto al plano ecuatorial de la estructura física del nano-satélite.

2.4 Efectos

La factibilidad de que el nano-satélite se dañe y/o se pierda es prácticamente del 100%, y en dado caso el semillero deberá realizar la construcción de un nuevo nano-satélite, lo cual implica, perdida monetaria en tecnología e infraestructura adquirida equivalente a 4'000.000 de pesos, junto con la solicitud de un nuevo presupuesto a la Universidad El Bosque. Por otra parte, retrasa el cumplimiento de los objetivos propuesto por el semillero para el proyecto, denotando que el proyecto vuelve a la fase I del proyecto, el diseño. En caso de poder recuperarlo el esfuerzo ha usado recursos fuera del presupuesto y los registros esperados pueden no haberse guardado correctamente, la carga biológica podría no estar en buen estado, o la electrónica estuviese parcial o totalmente destruida.

2.5 Aspectos a solucionar

El sistema de control de temperatura es lento y no supera los -25°C debido a que la cápsula térmica no aísla la temperatura externa de la interna dificultando que la temperatura interna aumente. Adicionalmente, el sistema de radiación térmico está mal diseñado y no transmite el caudal a toda la cápsula electrónica del nano-satélite.

El sistema de planeación aerodinámico es mecánico y no electromecánico, por tanto, no es operado mediante un sistema de control electrónico que responda a la aerodinámica externa particular y/o a situaciones que puedan requerir cambiar su pre-ajuste mecánico para guiar al nano-satélite a un punto determinado.

2.6 Justificación del proyecto

La robótica es un área de interés para la ingeniería electrónica y puede ser empleada en diferentes áreas como la astronomía. En este caso, la elaboración de un nano-satélite permite el estudio del comportamiento de una carga biológica en la estratosfera al ser expuesta a radiación cósmica.

Dicho proyecto aporta de manera beneficiosa a la Fuerza Aérea, quienes se encuentran interesados en trabajos de desarrollo en esta índole. Por otra parte, cataloga a la Universidad El Bosque como un referente en temas de investigación que vinculen la ingeniería con las ciencias naturales (química y biología) para el estudio y desarrollo de astronomía en Colombia.

Por otra parte, si el sistema de control de temperatura se corrige, se lograría mantener la carga biológica viva, la cual es el punto fundamental del experimento; la electrónica funcionaría sin fallos, permitiendo tener un constante monitoreo del nano-satélite. Adicionalmente, el rediseño de un sistema de planeación aerodinámico electromecánico, podría asegurar un descenso controlado que acerque el nano satélite a una coordenada previamente especificado, aumentando la probabilidad de ser recuperado.

2.7 Propuesta de solución

Rediseño, implementación y puesta en operación de un nano-satélite que subirá una carga biológica viva (bacteria bacillus acidofillus) a la estratosfera para ser expuesta a la radiación cósmica y la bajará en buen estado (sin evidencia de maltrato por movimientos bruscos o por cambios fuertes de temperatura) para ser recuperada mediante un sistema de comunicación, y posterior estudio por parte de biólogos.

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 Bases teóricas

3.1.1 Descripción Física del nano-satélite

El concepto de sistema de alas emplumadas (wing feathering system), creado por Burt Ratan, es la base para el diseño del nano-satélite. El diseño de Burt Ratan, por sus características aerodinámicas, permite que el sistema tenga una mayor estabilidad cuando es realizada la re-entrada atmosférica, haciendo que la estructura del nano-satélite se oriente hacia el centro de la Tierra (Figura 1) dicha estructura generalmente es construida en acrílico o ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), debido a la resistencia mecánica que presenta el material y su peso bajo.

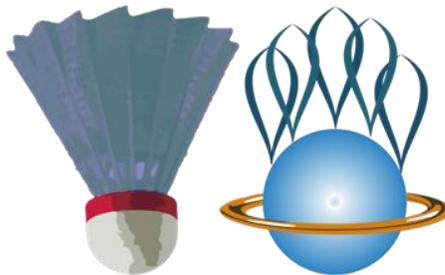


Figura 1. Sistema de ala emplumado y volante Bádminton.

Al interior de la estructura de algunos nano-satélite disponen de sistemas de control, los cuales están ubicados en el reverso (hemisferio inferior), y, por otra parte,

cuentan con un espacio de carga que se encuentra ubicada en el (hemisferio superior), como se evidencia en la Figura 2.

Los sistemas de control permiten que el nano-satélite asegure las condiciones adecuadas de temperatura, humedad relativa y presión interna. Además de ello, controlan un sistema de direccionamiento electro-mecánico que oriente el nano-satélite hacia una coordenada previamente especificada.

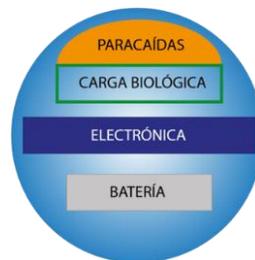


Figura 2. Sistema electrónico de Control & Carga Biológica.

3.1.2 Aerodinámica del nano-satélite

El efecto Coanda, hace que debido a la forma del nano-satélite y el tipo de caída (caída libre), el aire impacte en el reverso de este rodeando su forma externa (Figura 3). El flujo de aire resultante del impacto es aprovechado por un anillo concéntrico ubicado en el plano ecuatorial, el cual contiene alerones proyectados hacia afuera de la esfera con un ángulo de 15 grados con respecto al plano ecuatorial (Figura 4).

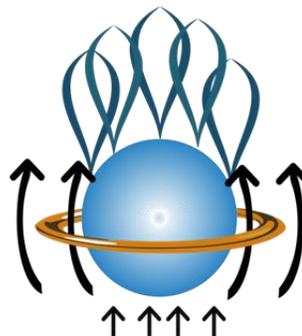


Figura 3. Flujo del aire debido al efecto Coanda.

3.1.3 Control direccional de la nave

Algunos nano-satélites ya usados tienen la propiedad de que el anillo concéntrico gire con respecto al eje horizontal de la esfera, como se evidencia en la Figura 5, asemejándose al control de dirección del vuelo de un helicóptero. Los ángulos de dirección de estos nano-satélites son controlados a través de motores, siguiendo las coordenadas brindadas por un sistema de comunicación, ajustando la dirección del nano-satélite a las coordenadas del sitio de lanzamiento.

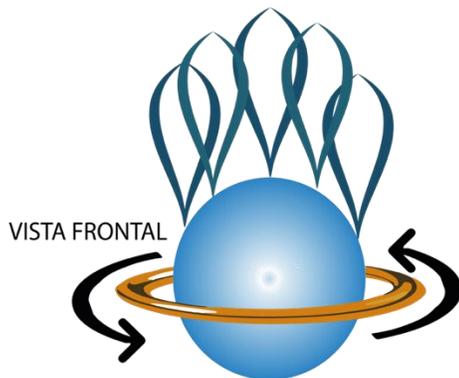


Figura 4. Anillo concéntrico - Vista lateral.

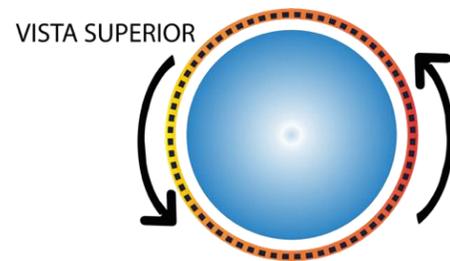


Figura 5. Anillo concéntrico - Vista superior.

3.1.4 Lanzamiento del Nano-satélite

Normalmente los nano-satélite son lanzados mediante globos meteorológicos de 30 pies de diámetro y con una capacidad de levantar 1,2 kilogramos de carga, aumentando su tamaño a medida que asciende, explotando entre 80 a 100 kilómetros de altura, iniciando de esta manera el descenso en caída libre. El diseño aerodinámico estabiliza la caída y previene fuerzas que puedan dañar la carga.

3.1.5 Carga biológica

Lactobacillus acidophilus es una bacteria proveniente de la familia Lactobacillus, y, al igual que el Streptococcus thermophilus, se encuentra presente en la producción

del yogur. La bacteria *Acidophilus* tiene la propiedad de la absorción de la lactosa metabolizándola en formando ácido láctico. Esta familia bacteriana produce también, etanol, dióxido de carbono y ácido acético, pero es de resaltar que el *Lactobacillus acidophilus* únicamente produce ácido láctico. La presencia de temperatura alta, humedad, o la luz solar directa, puede provocar alteraciones en la bacteria, hasta el punto de que desaparezca.

Dichas bacterias son preparadas a través de cultivos liofilizados de la fabricación del yogurt, y son inoculadas al momento de realizar el lanzamiento del nano-satélite. La temperatura recomendada para su incubación es de 35°- 45°C (95- 113°F).

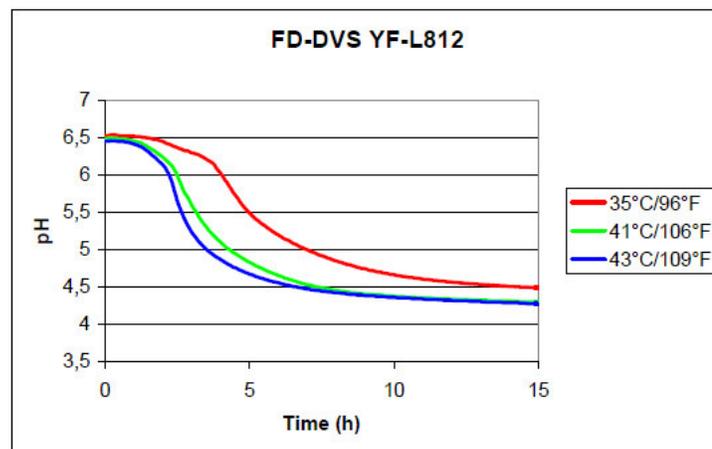


Figura 6. Nivel de acides pH contra tiempo [1].

3.1.6 Condiciones de fermentación

Medio de propagación: Leche entera + 2% de leche desnatada en polvo.

Temperatura de pasteurización: 85°C (185°F)

Tiempo de pasteurización: 30 minutos

3.1.7 Inoculación

Posterior al rescate y recepción del nano-satélite se realizan pruebas de actividad del inóculo, este método consiste en medir el índice de acidez en la zona de

crecimiento exponencial el cual ocurre a las 2.5 horas después de haber sido inoculado el medio, la medición se realizará mediante la determinación de ácido láctico titulable expresado en grados Thorner °Th según tablas de referencia estándar (Ver Figura 6).

3.2 *Tecnología*

Existen dos tipos de satélites, un satélite natural es todo cuerpo celeste opaco que gira alrededor de un planeta primario; por otra parte, los satélites artificiales por definición son vehículos, tripulados o no, que giran alrededor de la tierra u otro astro y que buscan para recopilar información y retransmitirla.

En la actualidad los satélites artificiales juegan un papel sumamente importante, dándonos la capacidad de comunicarnos desde cualquier parte del globo terrestre (telecomunicaciones satelitales), posiciones exactas en cualquier parte del planeta (Sistema de Posicionamiento Global GPS) e inclusive nos permiten predecir las condiciones climáticas.

Dependiendo de su aplicación los satélites varían en tamaño y masa; los hay de gran medida, como el Telescopio Espacial Hubble, y pequeños como los empleados en proyectos de tipo CubeSat

Dentro de la tecnología encontrada en nano-satélites, los orígenes se remontan a finales de la década de los 90 en la Universidad de Stanford. De allí se obtuvo el estándar para una unidad de CubeSat tiene unas dimensiones de 10x10x10 cm y su masa electrónica no deberá superar 1kg de masa. Así mismo, se pueden presentar variaciones de nano-satélites al unir varios CubeSat generando varias cápsulas. La composición de las nano-satélites cubre el armazón encargada de proteger la electrónica y cargas del nano-satélite, por lo general, estas estructuras contienen los paneles solares o celdas fotovoltaicas [2], los radiadores y condensadores de gases para el sistema de control de temperatura (por lo general, tungsteno) [3]; cuenta con la electrónica que incorporan sistemas de ubicación, comunicación (se referencia comúnmente con las siglas COM) y control de temperatura y un sistema de energía compuesto por baterías y celdas para mantener un constante funcionamiento del mismo.

Dentro de los satélites de alta tecnología que se adaptan al estándar CubeSat se encuentra el ÑuSat-3 el cual es un satélite con la misión de capturar vídeo y fotografías usando un telescopio. Este satélite comercial tiene la misión de capturar la tierra y objetos celestes de manera comercial [4].

A pesar que el concepto de nano-satélite no es nuevo, la repercusión que estos han tenido no ha sido lo suficientemente potente, pues la participación de los primeros de estos apenas eran funcionales pero demostraron ser factibles; sin embargo, a pesar ello, los satélites de mayor tamaño seguían teniendo mayor furor en la industria, de esta manera los diseñadores elaboraban naves cada vez más grandes, pues estas servían para realizar lanzamientos militares y humanos y misiones de manera regular.

Sin embargo, a pesar de la popularidad de los satélites de gran tamaño, los nano-satélites tienen como valor agregado su bajo costo, siendo perfecto un acople entre la complejidad actual de los grandes satélites, y el tamaño, peso (1-10kg) y precio de los nano-satélites, como lo afirma Oberright: "Los nano-satélites también se pueden aplicar a grandes misiones de un solo propósito. Esto aumentará la flexibilidad del diseño de la misión y permitirá un equilibrio de rendimiento, confiabilidad, selección del vehículo de lanzamiento y costo total" [5], razón por la cual han venido siendo implementados en mayor razón hoy en día.

Por ello, empresas como SpaceWorks, monitorean las actividades globales de nano-satélites/micro-satélites, realizando proyecciones con aumentos en ventas considerables para los últimos años, producto del crecimiento de jugadores comerciales e investigadores, en cuanto las observaciones de la tierra y los sensores siendo las más utilizadas para ello, [6] dando origen a la creación de conferencias como la AIAA/USU Conference on Small Satellites.

En Colombia la FAC (Fuerza Aérea Colombiana) y la EMAVI (Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez), entre julio y agosto del presente año (2018), realizará el lanzamiento del nano-satélite "FACSAT-1" cuyas dimensiones son de 30cm de alto y 10 cm de ancho, según lo indica la referencia [7]. Dicho nano-satélite, ayudará al control de cultivos ilegales, minería

ilegal, y aportará información a otras instituciones, como el Ministerio de Ambiente, Instituto de Hidrología, entre otros.

Por otra parte, como se informa en el boletín tecnológico de Nanosatélites, la puesta en órbita se realiza dentro de un cohete que cuenta con la carga útil en su interior para viajes orbitales, en caso de ser sub-orbitales, un globo de helio es una buena medida de implementación [8].

4 GLOSARIO DE TÉRMINOS

Las siguientes definiciones son tomadas del diccionario de la real academia de la lengua española:

- Vida: Fuerza o actividad esencial mediante la que obra el ser que la posee.
- Variables atmosféricas: Magnitud que puede tener un valor cualquiera de los comprendidos en un conjunto de temperatura, humedad, radiación solar, o presión atmosférica.
- Satélite: Vehículo espacial, tripulado o no, que se coloca en órbita alrededor de la Tierra o de otro astro, y que lleva aparatos apropiados para recoger información y transmitirla.
- Nano-satélite: Se refiere a cualquier satélite con un peso inferior a 10 kilogramos.
- Semillero Astrobiología-BIDA: Semillero creado el 3 de Julio de 2015 en la Universidad El Bosque con el propósito promover la investigación formativa mediante el uso del conocimiento científico y tecnológico desde la Bioingeniería, Ingeniería de Alimentos y la Astrobiología
- Carga biológica: Medio bacteriano que se transporta en un recipiente hermético para ser expuesta y/o afectada por alguna variable física.
- Estratósfera: Capa de la atmósfera terrestre que se encuentra entre los 10 y 50 kilómetros de altitud aproximadamente.
- Presión: Presión que ejerce la atmósfera sobre la superficie de la Tierra.

- Temperatura: Magnitud que revela la cantidad de calor que emite un entorno o un cuerpo, en un lugar o momento determinado.
- Humedad: Cantidad de vapor de agua existente que se encuentra en el aire, esta variable depende de la temperatura.
- Radiación solar: Conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol.
- Cepas de bacterias: Conjunto de bacterias de la misma especie.
- Aerodinámico: elemento que tiene la forma adecuada para reducir la resistencia al aire.
- Radiación cósmica: partículas subatómicas procedentes del espacio exterior cuya energía es muy elevada
- Efecto Coanda: fenómeno físico mediante el cual una corriente de flujo gaseosa tiende a ser atraída por una superficie vecina a su trayectoria.
- Inóculo: Suspensión de microorganismos que se transfieren a un ser vivo o a un cultivo por medio de la inoculación.
- Caja de Petri: Recipiente redondo de cristal o plástico donde se deposita el cultivo bacteriano.

5 OBJETIVOS:

5.1 General

Desarrollar un nano-satélite recuperable para estudios de los efectos de la radiación cósmica en una carga biológica expuesta en la estratosfera.

5.2 Específicos

- 5.2.1.* Diseñar, implementar y probar sistema de sensado de variables atmosféricas y video (presión interna, temperatura interna y humedad interna).
- 5.2.2.* Diseñar, implementar y probar sistema de control de temperatura (que asegure el buen estado funcional de la electrónica a bordo durante su viaje a la estratosfera).

- 5.2.3. Diseñar, implementar y probar sistema de comunicación (que permita la recuperación del nano-satélite una vez retorne de la estratosfera).
- 5.2.4. Diseñar e implementar estructura física del nano-satélite.

6 REQUERIMIENTOS

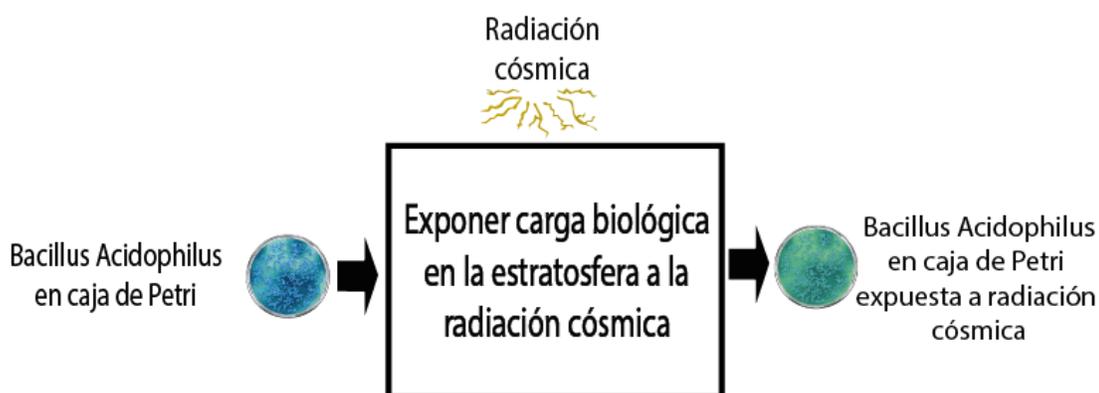


Figura 7. Entrada y salida del sistema.

El nano-satélite subirá una carga biológica viva (bacteria bacillus acidophilus) a la estratosfera para ser expuesta a la radiación cósmica y la bajará en buen estado (sin evidencia de maltrato por movimientos bruscos o por cambios fuertes de temperatura) para ser recuperada mediante un sistema de comunicación, y posterior estudio por parte de biólogos.

1. El nano-satélite deberá aislar la radiación cósmica únicamente en la cápsula contenedora de la electrónica.
2. Los elementos metálicos del nano-satélite que queden expuestos a la intemperie deben ser inoxidable.
3. El anverso del nano-satélite debe ser de color negro para absorber mayor cantidad de calor.
4. La temperatura interna del nano-satélite deberá estar entre los 15°C a los 45°C para que la bacteria se mantenga viva.
5. La presión interna dentro del nano-satélite deberá estar entre los 500 y los 760 mmHg para que la bacteria se mantenga viva.

6.1 Funcionales

6.1.1 Requerimientos según el objetivo 5.2.1.

1. El nano-satélite deberá realizar el proceso de sensado de variables atmosféricas, específicamente, temperatura, humedad relativas y presión en su interior.
2. El nano-satélite deberá realizar el proceso de sensado aproximadamente cada minuto y almacenar los datos obtenidos en un archivo de Excel.
3. El nano-satélite deberá realizar un vídeo de la cápsula contenedora de la carga biológica y de su entorno durante todo el recorrido o los tiempos de autonomía se lo permitan.
4. La carga biológica deberá ser recuperada en buen estado, específicamente, no debe haber evidencia de maltrato por movimientos bruscos o por cambios fuertes de temperatura.
5. La bacteria que expondrá el nano-satélite al momento de iniciar su vuelo, deberá estar viva y/o existir por sí sola en un ambiente con pH ácido y temperatura adecuada (15°C-45°C).
6. El medio de cultivo, manipulación y transporte de la bacteria se realizará a través de una caja de Petri.
7. La caja de Petri donde se transportará la bacteria deberá tener un radio máximo de 10 cm y espesor máximo de 3 cm.

6.1.2 Requerimientos según el objetivo 5.2.2.

1. El nano-satélite deberá garantizar una temperatura interna en la cápsula contenedora de la electrónica de por lo menos -25°C hasta 80°C para el correcto funcionamiento de la electrónica durante todo su recorrido.
2. El nano-satélite deberá garantizar una temperatura interna en la cápsula de la carga biológica de por lo menos 15°C hasta 45°C para que la bacteria viva.

6.1.3 Requerimientos según el objetivo 5.2.3.

1. El nano-satélite deberá comunicar su temperatura interna, humedad relativa interna, posición y presión interna.
2. El nano-satélite deberá ser localizado una vez haya aterrizado para su recuperación.
3. El nano-satélite deberá comunicar su posición en forma de coordenada, específicamente, su longitud y su latitud.
4. El nano-satélite deberá comunicar su posición cada que haya un cambio de por lo menos 50 metros en longitud o latitud.
5. El nano-satélite deberá realizar el proceso de sensado de altitud de manera indirecta (calculando la altitud de acuerdo a la presión atmosférica).
6. El nano-satélite deberá comunicar su altura cada que haya ascendido o descendido de por lo menos 50 metros.

6.1.4 Requerimientos según el objetivo 5.2.4.

1. El nano-satélite deberá contener una cápsula térmica con tiempo de transferencia térmica de para equiparar la temperatura externa con la interna de 1 horas.
2. El nano-satélite deberá contar con un diseño industrial.
3. El nano-satélite deberá contar con una cápsula deberá ser hermética y permitir abrir y cerrar el sistema.
4. El nano-satélite deberá aislar la radiación cósmica en la cápsula contenedora de la electrónica.

6.2 De calidad

6.2.1 Requerimientos según el objetivo 5.2.1.

1. El nano-satélite deberá realizar el proceso de sensado de temperatura interna en un rango de -25°C a 50°C y con una resolución de $\pm 1/4$ °C.

2. El nano-satélite deberá realizar el proceso de sensado de humedad interna en un rango de 0-100% RH y con una resolución de $\pm 0.1\%$ RH.
3. El nano-satélite deberá realizar el proceso de sensado de presión interna en un rango de 300 a 1100hPa (Hectopascales) y una resolución de $\pm 0,03$ hPa.
4. El nano-satélite deberá realizar el proceso de sensado de altitud con rango de -500m a 9000m sobre el nivel del mar y una resolución de ± 1 m.

6.2.2 Requerimientos según el objetivo 5.2.2.

1. El nano-satélite deberá garantizar un tiempo de respuesta máximo de 15 minutos para el control de la temperatura.
2. El nano-satélite deberá tener un margen de error en el control de su temperatura interna de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.
3. El subsistema deberá arrojar el valor de la temperatura con, al menos, tres dígitos de precisión.

6.2.3 Requerimientos según el objetivo 5.2.3.

1. El nano-satélite deberá comunicar su coordenada con por lo menos 3 dígitos de precisión.
2. El nano-satélite podrá ser ubicado en un rango de 1 kilómetro a la redonda por medio del sistema de radio-faro.

6.3 Restrictivos

1. El nano-satélite volará únicamente lugares permitidos por la Aeronáutica Civil.
2. El nano-satélite no podrá superar 10 kilogramos de peso.
3. El nano-satélite volará únicamente durante el día y en condiciones meteorológicas que aseguran la recuperación del mismo.
4. El nano-satélite no podrá volar en zonas urbanas ni aglomeraciones de personas.

7 DISEÑO FUNCIONAL

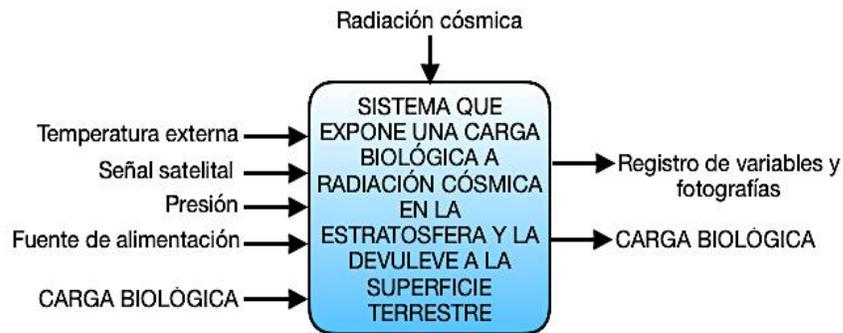


Figura 8. Sistema de entradas y salidas.

La Figura anterior muestra las variables de entrada principales para exponer una carga biológica en la estratosfera a radiación solar. Es importante aclarar que, aunque la entrada principal del sistema es una bacteria en una caja de Petri, variables físicas como temperatura y presión afectan el estado de la carga biológica, trayendo consigo, repercusiones negativas en la salida de sistema (carga biológica expuesta a radiación cósmica en la estratosfera).

Para dar cumplimiento a los requerimientos se establecieron dos modelos de solución basados en el sistema de entradas y salidas, y validando que cada solución cumpla los requerimientos funcionales, así como también, que las propuestas de solución se encuentren enmarcadas en el contexto en cual se desarrollará el proyecto (Estratosfera).

7.1 Modelo A

El subsistema de alimentación de componentes que se muestran a continuación no se encuentra conectado a otros subsistemas por simplicidad y orden visual en la Figura, pero se aclara que son la fuente de alimentación para todos los subsistemas que contengan electrónica. Por otra parte, es de aclarar que el subsistema de alimentación de componentes se debe implementar dos veces (uno para la cápsula interna y otro para la externa). A continuación, se muestra el modelo del planteamiento del sistema con sus respectivas entrada y salidas de cada subsistema:

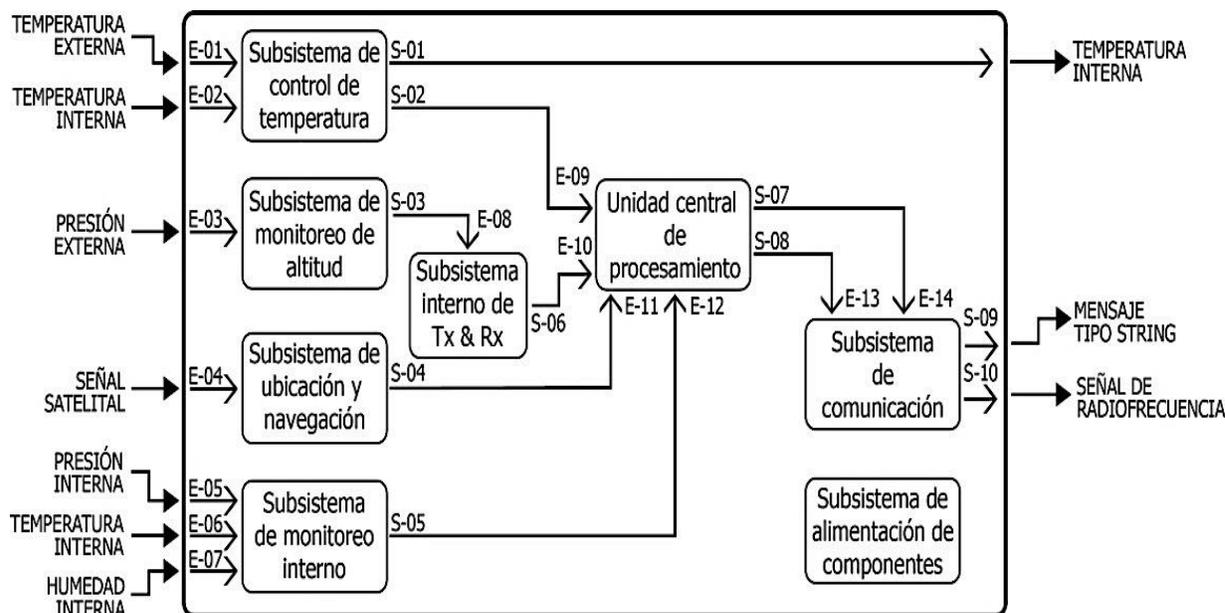


Figura 9. Modelo A de diseño funcional.

La tabla que se muestra a continuación es la descripción de entradas y salidas del subsistema para el modelo A del diseño funcional.

Tabla 1. Descripción de entradas y salidas de los subsistemas para el modelo A.

| SUBSISTEMA | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|--------------------------------------|---|--|---|
| Subsistema de control de temperatura | Controlar la temperatura interna del nano-satélite y mantenerla en un rango de 15°C y 25°C | E-01: Temperatura externa en un límite mínimo de -60°C y máximo de 35°C | S-01: Temperatura interna en un rango de 15°C a 25°C S-02: Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de temperatura |
| Subsistema de monitoreo de altitud | Medir la presión externa y mediante dicha presión, calcular la altura de elevación en la cual se encuentra el nano-satélite | E-03: Presión externa en un rango de 10 hPa hasta 1023 hPa | S-03: Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de medida indirecta de la altura del nano-satélite en un rango de 100 a 25.000 metros |

| SUBSISTEMA | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|--------------------------------------|--|---|---|
| Subsistema de ubicación y navegación | Localizar el nano-satélite mediante un satélite (longitud y latitud) | E-04: Señal satelital de posicionamiento y navegación de 50 bits/segundo y a una frecuencia de 1600 MHz | S-04: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene las coordenadas en términos de longitud y latitud con un mínimo de 4 dígitos decimales |
| Subsistema de monitoreo interno | Monitorea las variables atmosféricas internas al nano-satélite (presión, temperatura y humedad relativa) | E-05: Presión externa en un rango de 100 hPa hasta 300 hPa E-06: Temperatura interna en un límite mínimo de -10°C y máximo de 35°C E-07: Humedad relativa entre 70 y 90% | S-05: Señal digital bidireccional de 5 voltios, velocidad máxima de transmisión de 0,1Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20mA que comunica el valor de la temperatura, presión y humedad relativa en decimal |
| Subsistema de Tx & Rx interno | Transmite señal inalámbrica que contiene la altura del nano-satélite | E-08: Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de medida indirecta de la altura del nano-satélite en un rango de 100 a 30.000 metros | S-06: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con una corriente aproximada de 20 mili-amperios que comunica la altura del nano-satélite en un rango de 100 a 25.000 metros |
| Unidad central de procesamiento | Controla y permite comunicación entre los subsistemas | E-09: Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de temperatura E-10: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que comunica la altura del nano-satélite en un rango de 100 a 25.000 metros E-11: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene las coordenadas en términos de longitud y latitud con un mínimo de 4 dígitos decimales -12: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que comunica el valor de la temperatura, presión y humedad relativa en decimal. | S-07: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene coordenadas de ubicación, temperatura interna, humedad relativa interna, presión interna, altura, estado de vuelo ("En aire" o "En tierra") y código de alerta S-08: Señal DC de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que indica que el nano-satélite aterrizó, y así, iniciar a emitir ondas de radiofrecuencia para su recuperación |

| SUBSISTEMA | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|---|--|--|--|
| Subsistema de alimentación de componentes | Almacenamiento de energía eléctrica DC que permita un tiempo de autonomía de 4 horas | Voltaje (Voltios) / corriente (mili-amperios) DC de carga | Voltaje (Voltios) / corriente (mili-amperios) DC que alimenta los subsistemas de la cápsula interna y externa - Los elementos de electrónicos se alimentarán a 5 voltios, y se contará con una salida de 9 voltios |
| Subsistema de comunicación | Enviar información del nano-satélite a través de la red de comunicaciones comercial | <p>E-13: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene coordenadas de ubicación, temperatura interna, humedad relativa interna, presión interna, altura, estado de vuelo ("En aire" o "En tierra") y código de alerta</p> <p>E-14: Señal DC de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que indica que el nano-satélite aterrizó, y así, iniciar a emitir ondas de radiofrecuencia para su recuperación</p> | <p>S-09: Mensaje tipo STRING decodificado del ASCII que contiene coordenadas de ubicación, temperatura interna, humedad relativa interna, presión interna, altura, estado de vuelo ("En aire" o "En tierra") y código de alerta que permita una comunicación entre máquina-humano</p> <p>S-10: Señal de radiofrecuencia detectable en un rango de 3 kilómetros a la redonda con una frecuencia entre 902.5 MHz y 906.5 MHz</p> |

El modelo anterior propone dos cápsulas, una interna y una externa. Esto se debe principalmente a que la electrónica no puede estar expuesta a una temperatura de -60°C así que deberá estar aislada térmicamente, pero la conexión física entre los alerones y paracaídas supone una abertura en la carcasa física que podría causar una despresurización del sistema. Por otra parte, el sensado de la altura es una medida indirecta debido a que se debe realizar un cálculo matemático teniendo la presión como la variable independiente, y para realizar una correcta medición de la altura, el sensor debe estar expuesto a la estratósfera, generando una abertura adicional en la estructura física. Para evitar afectar la bacteria por el fenómeno de despresurización, se propone añadir una segunda cápsula que contenga el subsistema interno de Rx & Tx y un segundo subsistema de alimentación, quedando totalmente aislada la cápsula contenedora de la carga biológica. Adicionalmente, este segundo subsistema de alimentación aseguraría en mayor tiempo de autonomía para el sistema.

Es de resaltar que, en la manifestación del problema, el semillero de astrobiología VIDA veía insegura la recuperación del nano-satélite, debido a la dificultad que podría traer ubicarlo.

Por esto, se propone un subsistema de redundancia, el subsistema de comunicación que emita una señal en radiofrecuencia generar rumbo relativo para la búsqueda y recuperación del nano-satélite. Lo anterior se cumple para un rango no mayor a 3 kilómetros a la redonda.

Sin embargo, esta propuesta de solución complica el diseño y la implementación sistema general debido a que aumenta la cantidad de subsistemas en el nano-satélite, también aumenta costos económicos por la comprar de más elementos electrónicos, recursos humanos y tiempo.

7.2 Modelo B

El subsistema de alimentación de componentes mostrado en la Figura a continuación no se encuentra conectado a otros subsistemas por simplicidad y orden visual en el diagrama, pero se aclara que es la fuente de alimentación para todos los subsistemas que contengan electrónica y, por ende, todos los demás subsistemas se encuentran conectados a este subsistema.

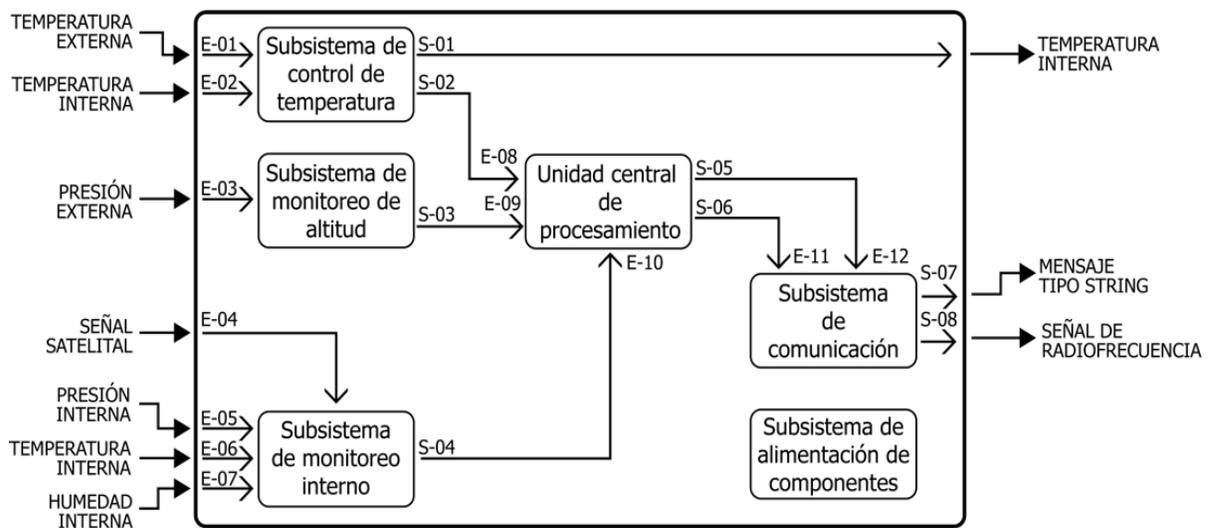


Figura 10. Modelo B de diseño funcional.

La tabla que se muestra a continuación es la descripción de entradas y salidas del subsistema para el modelo A del diseño funcional.

Tabla 2. Descripción de entradas y salidas de los subsistemas para el modelo B.

| SUBSISTEMA | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|---|---|---|---|
| Subsistema de control de temperatura | Controlar la temperatura interna del nano-satélite y mantenerla en un rango de 15°C y 25°C | E-01: Temperatura externa en un límite mínimo de -60°C y máximo de 35°C | S-01: Temperatura interna en un rango de 15°C a 25°C S-02: Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios |
| Subsistema de monitoreo de altitud | Medir la presión externa y mediante dicha presión, calcular la altura de elevación en la cual se encuentra el nano-satélite | E-03: Presión externa en un rango de 10 hPa hasta 1023 hPa | S-03: Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de medida indirecta de la altura del nano-satélite en un rango de 100 a 25.000 metros |
| Subsistema de monitoreo interno | Monitorea las variables atmosféricas internas al nano-satélite (presión, temperatura y humedad relativa) | E-04: Señal satelital de posicionamiento y navegación de 50 bits/segundo y a una frecuencia de 1600 MHz E-05: Presión externa en un rango de 10 hPa hasta 300 hPa E-06: Temperatura interna en un límite mínimo de -10°C y máximo de 35°C E-07: Humedad relativa entre 70 y 90% | S-04: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que comunica el valor de la temperatura, presión, coordenadas de ubicación (longitud y latitud) y humedad relativa en decimal |
| Subsistema de alimentación de componentes | Almacenamiento de energía eléctrica DC que permita un tiempo de autonomía de 4 horas | Voltaje (Voltios) / corriente (mili-amperios) DC de carga | Voltaje (Voltios) / corriente (mili-amperios) DC que alimenta los subsistemas de la cápsula interna y externa - Los elementos de electrónicos se alimentarán a 5 voltios, y se contará con una salida de 9 voltios |
| Unidad central de procesamiento | Controla y permite comunicación entre los subsistemas | E-08: Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de temperatura E-09: Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de la altura E-10: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que comunica el valor de la temperatura, presión, coordenadas (longitud y latitud) y humedad relativa en decimal | S-05: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene coordenadas de ubicación, temperatura interna, humedad relativa interna, presión interna, altura, estado de vuelo ("En aire" o "En tierra") y código de alerta S-06: Señal DC de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que indica que el nano-satélite aterrizó, y así, iniciar a emitir ondas de radiofrecuencia para su recuperación |

| SUBSISTEMA | FUNCIÓN(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|----------------------------|---|--|--|
| Subsistema de comunicación | Enviar información del nano-satélite a través de la red de comunicaciones comercial | <p>E-11: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene coordenadas de ubicación, temperatura interna, humedad relativa interna, presión interna, altura, estado de vuelo ("En aire" o "En tierra") y código de alerta</p> <p>E-12: Señal DC de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que indica que el nano-satélite aterrizó, y así, iniciar a emitir ondas de radiofrecuencia para su recuperación</p> | <p>S-07: Mensaje tipo STRING decodificado del ASCII que contiene coordenadas de ubicación, temperatura interna, humedad relativa interna, presión interna, altura, estado de vuelo ("En aire" o "En tierra") y código de alerta que permita una comunicación entre máquina-humano</p> <p>S-08: Señal de radiofrecuencia detectable en un rango de 3 kilómetros a la redonda con una frecuencia entre 902.5 MHz y 906.5 MHz</p> |

El modelo anterior propone una sola cápsula. Esto se debe principalmente a que se facilitan las conexiones internas de la electrónica y elimina subsistemas que podrían aparecer usando varias cápsulas. Por otra parte, facilita el desarrollo del subsistema de control de temperatura, porque en caso de tener dos cápsulas, implica añadir un subsistema de control de temperatura adicional en la segunda cápsula.

Esta propuesta de solución facilita el diseño y la implementación sistema general debido a que disminuye la cantidad de subsistemas, también disminuye costos económicos, recursos humanos y tiempo. Sin embargo, para realizar una correcta medición de la altura, el sensor de presión debe estar expuesto al medio ambiente, generando una abertura en la estructura, junto con la abertura para el paracaídas y alerones, lo que causaría transferencias térmicas con el ambiente y/o despresurización del sistema durante el descenso y paso por la troposfera (momento en el cual se eyectará el paracaídas).

7.3 Discusión de modelos

De acuerdo con el análisis hecho por cada modelo, se puede llegar a la conclusión de que el modelo A, aunque resulte más costoso y complejo, da mayores garantías de generar las condiciones adecuadas para la supervivencia de la bacteria. Por otra parte, aumenta los tiempos de autonomía, en cuanto al sistema de alimentación hace factible la recuperación

del nano-satélite mediante el subsistema de eyección y dirección y el subsistema de detección de radiofaro. Por lo anterior, el modelo A de diseño funcional es el elegido para el desarrollo del proyecto.

8 DISEÑO DETALLADO

8.1 Requerimientos de subsistemas

A continuación, se muestran los requerimientos funcionales, de calidad y restricción para cada subsistema del modelo escogido (Modelo A).

8.1.1 Subsistema de control de temperatura

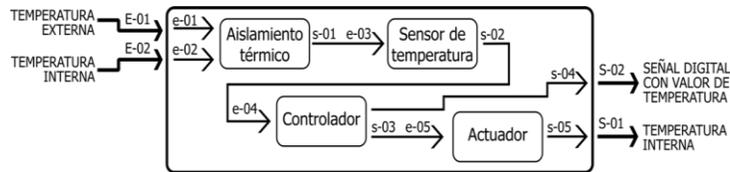


Figura 11. Estructura funcional para el subsistema de control de temperatura.

Tabla 3. Requerimientos para el subsistema de control de temperatura.

| COMPONENTE | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|-----------------------|---|---|--|
| Aislamiento térmico | Aislar térmicamente, la temperatura interna de la externa | <p>e-01: Temperatura del medio ambiente en un rango de -60°C a 35°C</p> <p>e-02: Temperatura del medio ambiente en un rango de -10°C a 35°C</p> | <p>s-01: Temperatura del medio ambiente en un rango de -10°C a 35°C</p> |
| Sensor de temperatura | Medir la temperatura interna del nano-satélite | <p>e-03: Temperatura del medio ambiente en un rango de -10°C a 35°C</p> | <p>s-02: Señal digital de salida con protocolo de comunicación estándar mayor 0,1Mbit/s</p> |
| Controlador | Ajusta la temperatura en rango de 15°C a 25°C | <p>e-04: Señal digital de entrada con protocolo de comunicación estándar mayor 0,1Mbit/s</p> | <p>s-03: Señal DC de 0 o 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que habilita el actuador generador de calor</p> <p>s-04: Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de temperatura</p> |

| COMPONENTE | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|------------|---|---|--|
| Actuador | Genera calor para aumentar la temperatura de la cápsula interna del nano-satélite | e-05: Señal DC de 0 voltios o 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que habilita el actuador generador de calor | s-05: Temperatura interna en un rango de 15°C a 25°C. |

Para el subsistema de control de temperatura se realizará un control de tipo PID debido a que según el sistema teórico de control de temperatura de una planta el lazo cerrado, basta con un compensador proporcional para estabilizar el sistema y evitar ceros en el denominador de la función de transferencia del sistema. Se usará el integrador I para disminuir el error presente en el sistema y mantener la temperatura lo más cercano posible a una temperatura de 20°C.

8.1.2 Subsistema de monitoreo de altitud

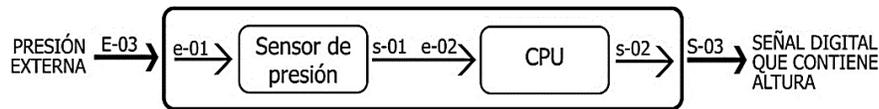


Figura 12. Estructura funcional para el subsistema de monitoreo de altitud.

Tabla 4. Requerimientos para el subsistema de monitoreo de altitud.

| COMPONENTE | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|-------------------|--|---|---|
| Sensor de presión | Medir la presión externa del nano-satélite y así, calcular la altura | e-01: Presión externa en un rango de 10 hPa hasta 1023 hPa | s-02: Señal digital bidireccional a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente no mayor a 20 mili-amperios que comunica el valor de la presión externa en hPa |
| CPU | Mide la altura (medida indirecta) a través de un cálculo de la presión atmosférica | e-02: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que comunica el valor de la presión externa en hPa | s-03: Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de medida indirecta de la altura del nano-satélite en un rango de 100 a 25.000 metros |

8.1.3 Subsistema de ubicación y navegación

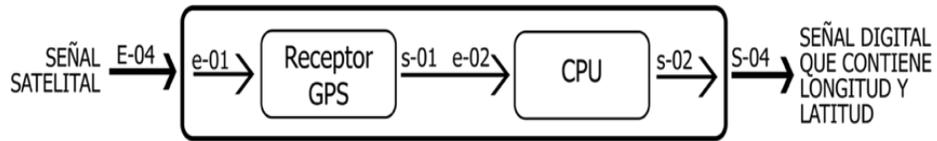


Figura 13. Estructura funcional para el subsistema de ubicación y navegación.

Tabla 5. Requerimientos para el subsistema de monitoreo interno.

| COMPONENTE | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|--------------|--|---|---|
| Receptor GPS | Recibe señal GPS de mínimo dos satélites | e-01: Señal satelital de posicionamiento y navegación de 50 bits/segundo y con mínimo 5 satélites de conexión. | s-01: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con corriente de 20 mA. |
| COMPONENTE | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
| Controlador | Convierte la señal del GPS en una señal en decimal especificando latitud y altitud | e-02: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que comunica posición en decimal | s-02: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mA que contiene las coordenadas en términos de longitud y latitud en decimal |

8.1.4 Subsistema de monitoreo interno

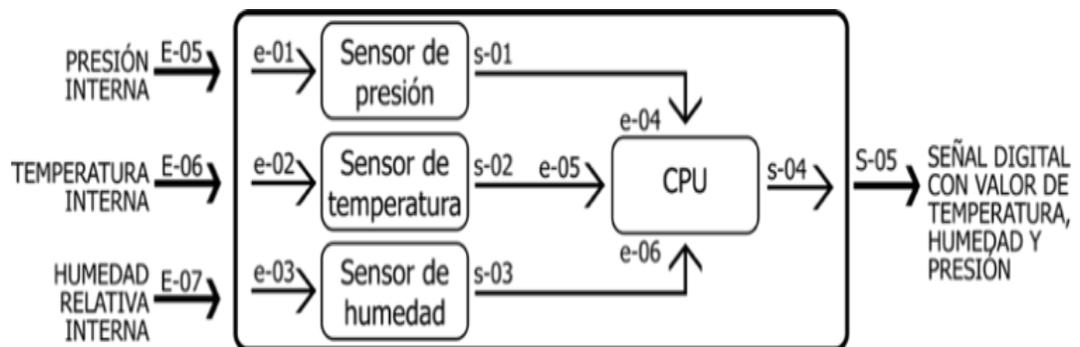


Figura 14. Estructura funcional para el subsistema de monitoreo interno.

Tabla 6. Requerimientos para el subsistema de monitoreo interno.

| COMPONENTE | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|-----------------------|---|---|---|
| Sensor de presión | Medir la presión interna del nano-satélite | e-01: Presión externa en un rango de 300 hPa hasta 1100 hPa | s-01: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que comunica presión en BCD con resolución mínima de 0.06hPa |
| Sensor de temperatura | Medir la temperatura interna del nano-satélite | e-02: Temperatura interna en un límite mínimo de -10°C y máximo de 35°C | s-02: Señal digital unidireccional de 5 voltios y con resolución mínima de 8 bits |
| Sensor de humedad | Medir la humedad relativa del nano-satélite | e-03: Humedad relativa entre 70 y 90% | s-03: Señal digital unidireccional de 5 voltios y con resolución mínima de 8 bits |
| CPU | Acopla las señales y las integra en un solo mensaje para ser retransmitido en decimal | e-04: Señal digital bidireccional a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s que comunica presión en BCD con resolución mínima de 0.06hPa e-05: Señal digital unidireccional de 5 voltios y con resolución mínima de 8 bits e-06: Señal analógica entre 0 y 5v de 1 mili-amperio con resolución de ±1% que indica la humedad relativa | s-04: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que comunica el valor de la temperatura, presión y humedad relativa en decimal |

8.1.5 Subsistema interno de Tx y Rx

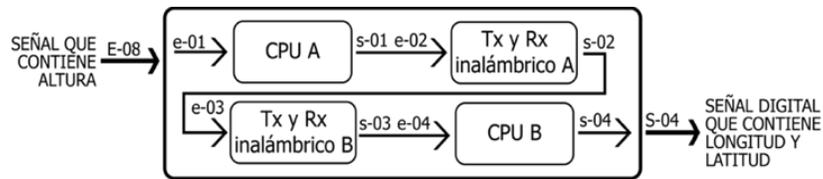


Figura 15. Estructura funcional para el subsistema interno de Tx y Rx.

Tabla 7. Requerimientos para el subsistema interno de Tx y Rx.

| COMPONENTE | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|------------|---|--|---|
| CPU A | Recibe señal que contiene altura y la codifica para ser transmitida por medio | e-01: Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de medida indirecta de la altura | s-01: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente |

| COMPONENTE | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|-----------------------|---|--|--|
| | de un protocolo de comunicación inalámbrico estándar | del nano-satélite en un rango de 100 a 25.000 metros | 20 mili-amperios que contiene la altura en un rango de 100 a 25.000 metros |
| Tx y Rx inalámbrico A | Transmite una señal que indica la altura del nano-satélite inalámbricamente | e-02: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene la altura en un rango de 100 a 25.000 metros | s-01: Señal inalámbrica que contiene valor de la altura en un rango de 100 a 25.000 metros |
| Tx y Rx inalámbrico B | Recibe una señal que indica la altura del nano-satélite inalámbricamente | e-03: Señal inalámbrica en banda ISM de 2,4 GHz con potencia máxima de 1mw que contiene la altura en un rango de 100 a 25.000 metros | s-03: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene la altura en un rango de 100 a 25.000 metros |
| CPU B | Recibe señal por medio de un protocolo de comunicación inalámbrico estándar que contiene altura y la retransmite en binario | e-04: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene la altura en un rango de 100 a 25.000 metros | s-04: Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de medida indirecta de la altura del nano-satélite en un rango de 100 a 25.000 metros |

8.1.6 Unidad de procesamiento central

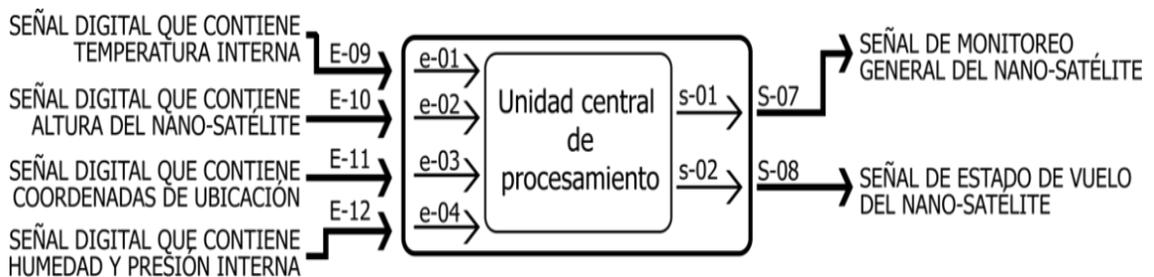


Figura 16. Estructura funcional para la CPU.

Los requerimientos de la unidad de procesamiento central son los mismos que se establecieron en apartado de la tabla "Unidad central de procesamiento" y por tanto no se mencionan de nuevo.

8.1.7 Subsistema de comunicación

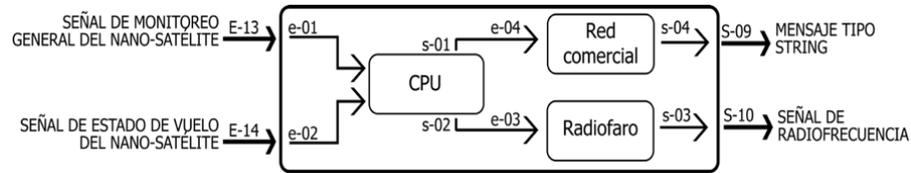


Figura 17. Estructura funcional del subsistema de comunicación

Tabla 8. Requerimientos para el subsistema de comunicación.

| COMPONENTE | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|---------------|--|--|--|
| CPU | Recibe una señal de notificación del nano-satélite y enviar dicha información a través de la red de comunicaciones comercial | <p>e-01: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene coordenadas de ubicación, temperatura interna, humedad relativa interna, presión interna, altura, estado de vuelo ("En aire" o "En tierra") y código de alerta</p> <p>e-02: Señal DC de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que indica que el nano-satélite aterrizó, y así, iniciar a emitir ondas de radiofrecuencia para su recuperación</p> | <p>s-01: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene informe general del estado del nano-satélite (temperatura, humedad, presión, altura, ubicación y código de alerta)</p> <p>s-02: Señal DC de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que indica que el nano-satélite aterrizó, y así, iniciar a emitir ondas de radiofrecuencia para su recuperación</p> |
| Radiofaro | Transmite una señal que facilita la recuperación del nano-satélite una vez ha aterrizado. | <p>e-03: Señal DC de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que indica que el nano-satélite aterrizó, y así, iniciar a emitir ondas de radiofrecuencia para su recuperación</p> | <p>s-03: Señal de radiofrecuencia detectable en un rango de 3 kilómetros a la redonda con una frecuencia entre 902.5 MHz y 906.5 MHz</p> |
| Red comercial | Recibe una señal de notificación del nano-satélite y enviar dicha información a través de la red de | <p>e-04: Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene informe general del estado del nano-satélite</p> | <p>s-04: Mensaje tipo STRING decodificado del ASCII que contiene coordenadas de ubicación, temperatura interna, humedad relativa interna, presión interna, altura, estado de vuelo ("En aire" o "En tierra") y código de</p> |

| COMPONENTE | FUNCION(ES) | ENTRADA(S) | SALIDA(S) |
|------------|--------------------------|---|--|
| | comunicaciones comercial | (temperatura, humedad, presión, altura, ubicación y código de alerta) | alerta que permita una comunicación entre máquina-humano |

8.1.8 Subsistema de alimentación de componentes



Figura 18. Estructura funcional del subsistema de alimentación de componentes

Los requerimientos del subsistema de alimentación de componentes se establecieron en la *tabla 1* del presente documento y por tanto no es necesario repetir la tabla de requerimientos

8.2 Requerimientos de componentes

A continuación, se muestran los requerimientos de los componentes en base los requerimientos de los subsistemas y, su vez, la tabla comparativa para selección de componentes.

8.2.1 Sensor de temperatura

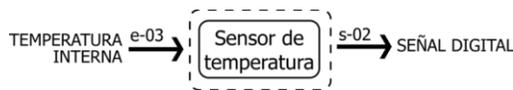


Figura 19. Estructura funcional del sensor de temperatura.

Tabla 9. Selección de sensor de temperatura.

| SUBSISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA | | | | |
|--------------------------------------|--|--|---|--|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | LM35 | DHT22 | SHT15 |
| e-03 | Temperatura del medio ambiente en un rango de -10°C a 35°C | Rango de temperaturas: Desde -55° C a 150° C | Rango de temperaturas: Desde -40° C a 80° C | Rango de temperaturas: Desde -40° C a 123° C |

| SALIDA | REQUERIMIENTO | LM35 | DHT22 | SHT15 |
|--------|--|---|---|--|
| s-02 | Señal digital de salida con protocolo de comunicación estándar mayor 0,1Mbit/s que comunica la temperatura | Señal de salida análoga entre 0 y 5 voltios Precisión: ±0,5° C Conversión: 10 mV / °C Tiempo de respuesta: 4 min. | Señal que comunica la temperatura mediante el puerto SDA del protocolo I ² C Precisión: ±0,5° C Resolución: 16 bit Muestras/segundo: 0,5 | Señal que comunica la temperatura mediante el protocolo I ² C Precisión: ±0,3° C Resolución: 14 bit Muestras/segundo: 1 |

Se determinó usar el sensor DHT22 debido a que el rango de lectura de temperatura se enmarca en los parámetros de los requerimientos y con la resolución necesaria. Adicionalmente, señal de salida es digital disminuyendo los erros posibles que pueda generar el ADC del CPU, y, permite una fácil comunicación con la CPU. Finalmente, el voltaje de alimentación se enmarca en el voltaje suministrado por el subsistema de alimentación de componentes. A continuación, se muestra la tabla de características del datasheet del fabricante.

Tabla 10. Especificaciones técnicas. [9]

| | |
|---------------------------|--|
| Model | DHT22 |
| Power supply | 3.3-6V DC |
| Output signal | digital signal via single-bus |
| Sensing element | Polymer capacitor |
| Operating range | humidity 0-100%RH; temperature -40~80Celsius |
| Accuracy | humidity +-2%RH(Max +-5%RH); temperature <+-0.5Celsius |
| Resolution or sensitivity | humidity 0.1%RH; temperature 0.1Celsius |
| Repeatability | humidity +-1%RH; temperature +-0.2Celsius |
| Humidity hysteresis | +/-0.3%RH |
| Long-term Stability | +/-0.5%RH/year |
| Sensing period | Average: 2s |
| Interchangeability | fully interchangeable |
| Dimensions | small size 14*18*5.5mm; big size 22*28*5mm |

8.2.2 Controlador

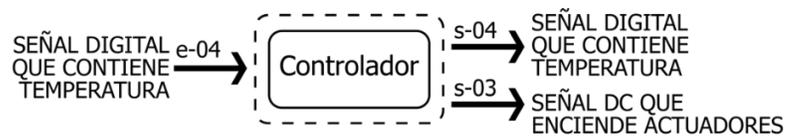


Figura 20. Estructura funcional del controlador.

Tabla 11. Selección de componente controlador.

| SUBSISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA | | | |
|--------------------------------------|---|--|---|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | PIC 18F4550 | ARDUINO LEONARDO |
| e-04 | Señal digital de entrada con protocolo de comunicación estándar mayor 0,1Mbit/s | Cuenta con dos puertos seriales de comunicación que permite leer la señal de entrada proveniente de sensor por el puerto SDA | Cuenta con dos puertos seriales de comunicación que permite leer la señal de entrada proveniente de sensor por el puerto SDA. Adicionalmente, cuenta con una librería específica para el sensor DHT22 |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | PIC 18F4550 | ARDUINO LEONARDO |
| s-03 | Señal DC de 0 o 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que habilita el actuador generador de calor | Cuenta con señal digital de salida con 5 voltios y un máximo de 25 mili-amperios | Cuenta con señal digital de salida con 5 voltios y un máximo de 40 mili-amperios |
| s-04 | Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de temperatura | Cuenta con señal digital de salida con 5 voltios y un máximo de 25 mili-amperios y 16 puertos digitales de salida | Cuenta con señal digital de salida con 5 voltios y un máximo de 25 mili-amperios y 22 puertos digitales de salida |

Se elige el Arduino Leonardo debido a que cumple con los requerimientos de entrada y salida. Adicionalmente, cuenta con una librería para el sensor DHT22 que facilita la integración de tecnología. A continuación, se muestran las características técnicas del datasheet del fabricante.

Tabla 12. Especificaciones técnicas. [10]

| | |
|-----------------------------|---|
| Microcontroller | ATmega32u4 |
| Operating Voltage | 5V |
| Input Voltage (Recommended) | 7-12V |
| Input Voltage (limits) | 6-20V |
| Digital I/O Pins | 20 |
| PWM Channels | 7 |
| Analog Input Channels | 12 |
| DC Current per I/O Pin | 40 mA |
| DC Current for 3.3V Pin | 50 mA |
| Flash Memory | 32 KB (ATmega32u4) of which 4 KB used by bootloader |
| SRAM | 2.5 KB (ATmega32u4) |
| EEPROM | 1 KB (ATmega32u4) |
| Clock Speed | 16 MHz |
| Length | 68.6 mm |
| Width | 53.3 mm |
| Weight | 20 g |

8.2.3 Actuador

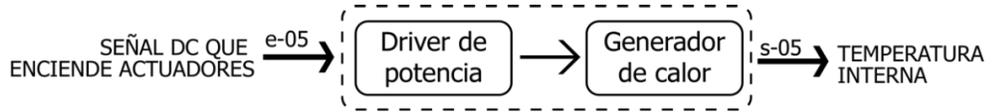


Figura 21. Estructura funcional del actuador.

Tabla 13. Selección de componente actuador.

| SUBSISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA | | |
|--------------------------------------|--|--|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | CELDA PELTIER |
| e-05 | Señal DC de 0 voltios o 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios | Necesita una señal de 1.8 voltios y una corriente aproximada de 1.7 A para alcanzar delta de temperatura de 20°C |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | CELDA PELTIER |
| s-05 | Temperatura interna en un rango de 15°C a 25°C. | Genera un máximo de 66°C de temperatura |

Por requerimiento del investigador principal se solicitó usar la celda Peltier como elemento generador de calor. A continuación, se muestra una gráfica de temperatura contra potencia tomada del datasheet del fabricante.

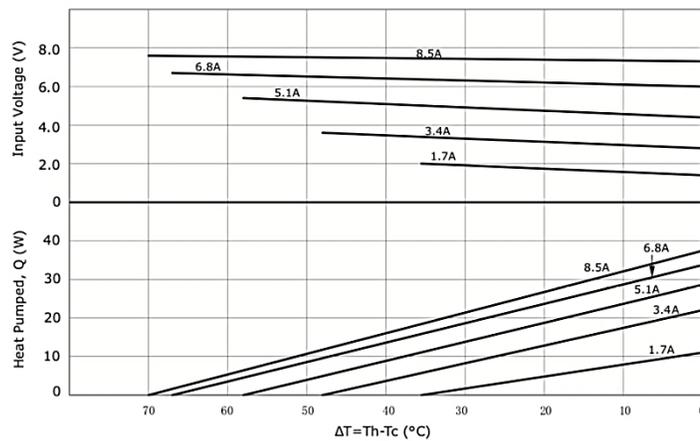


Figura 22. Comportamiento de temperatura contra potencia [11].

8.2.4 Sensor de presión



Figura 23. Estructura funcional del sensor de presión.

Tabla 14. Selección de sensor de presión.

| SUBSISTEMA DE MONITOREO DE ALTITUD | | | | |
|------------------------------------|--|---|--|---|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | BMP180 | MS5611 | BMP280 |
| e-01 | Presión externa en un rango de 10 hPa hasta 1023 hPa | Rango de presión: Desde 300 hPa hasta 1100 hPa | Rango de presión: Desde 10 hPa hasta 1200 hPa | Rango de presión: Desde 300 hPa hasta 1100 hPa |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | BMP180 | MS5611 | BMP280 |
| s-01 | Señal digital bidireccional a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que comunica el valor de la presión externa en hPa. | Señal de salida analoga entre 0 y 3.3 voltios Precisión: ±0,5 metros Resolución: 16 bit Muestras/segundo: 1 | Señal que comunica la altura mediante el puerto SDA del protocolo I ² C Precisión: ±0,5 metros Resolución: 24 bit Muestras/segundo: 1 | Señal que comunica la altura mediante el protocolo I ² C Precisión: ±0,1 metros Resolución: 16 bit Muestras/segundo: 1 |

Se eligió el sensor MS5611 debido a que es el único sensor que logra obtener una medida mínima de 10 mPa, es el único que cumple el requerimiento de entrada. A continuación, se muestra la gráfica de sensado de presión y datasheet:

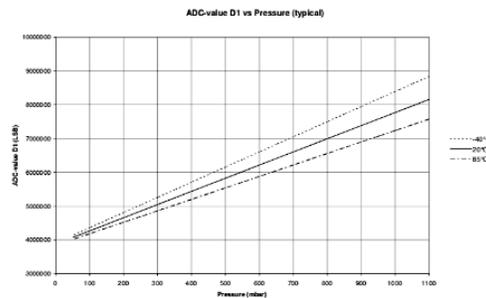


Figura 24. Sensado de presión [12]

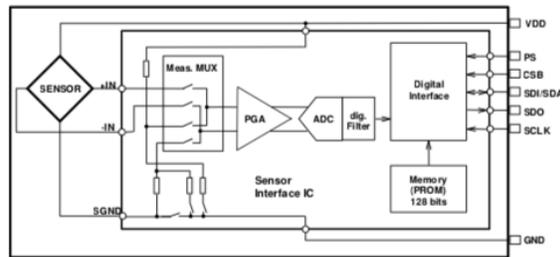


Figura 25. Diagrama de bloques de funcionamiento del componente [12].

8.2.5 CPU (Monitoreo de Altitud)

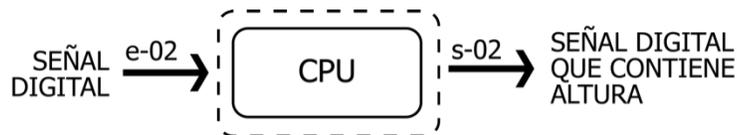


Figura 26. Estructura funcional de la CPU (Monitoreo de Altitud).

Tabla 15. Selección de componente de CPU (Monitoreo de Altitud).

| SUBSISTEMA DE MONITOREO DE ALTITUD | | | |
|------------------------------------|---|--|--|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | PIC 18F4550 | ARDUINO LEONARDO |
| e-02 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que comunica el valor de la presión externa | Cuenta con dos puertos seriales de comunicación que permite leer la señal de entrada proveniente de sensor por el puerto SDA | Cuenta con dos puertos seriales de comunicación que permite leer la señal de entrada proveniente de sensor por el puerto SDA. Adicionalmente, cuenta con una librería específica para I ² C |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | PIC 18F4550 | ARDUINO LEONARDO |
| s-02 | Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de la altura en un rango de 100 a 25.000 | Cuenta con señal digital de salida con 5 voltios y un máximo de 25 mili-amperios y 16 puertos digitales de salida | Cuenta con señal digital de salida con 5 voltios y un máximo de 25 mili-amperios y 22 puertos digitales de salida |

Se elige el Arduino Leonardo debido a que cumple con los requerimientos de entrada y salida. Adicionalmente, cuenta con una librería para I²C que facilita la

integración de tecnología. Es importante resaltar que tiene el mismo costo que el PIC 18F4550. No se muestran las especificaciones debido a que ya fueron mostradas en la Tabla 12.

8.2.6 Receptor GPS



Figura 27. Estructura funcional del receptor de GPS.

Tabla 16. Selección de componente receptor de GPS.

| SUBSISTEMA DE UBICACIÓN Y NAVEGACIÓN | | | |
|--------------------------------------|---|--|--|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | SIM808 | UBOX M AX-M8 |
| e-01 | Señal satelital de posicionamiento y navegación de 50 bits/segundo y con mínimo 4 satélites de conexión. | Cuenta con una conexión mínima con 4 satélites y detecta la ubicación hasta una altura máxima de 18.000 metros | Cuenta con una conexión mínima con 4 satélites (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou) y detecta la ubicación hasta una altura máxima de 50.000 metros |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | SIM808 | UBOX M AX-M8 |
| s-01 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s que comunica posición en decimal | Señal de salida comunicada mediante protocolo de comunicación serial usando comandos AT | Señal de salida comunicada mediante protocolo de I ² C |

En este caso se usarán ambos sistemas GPS con el fin de generar redundancia en el subsistema y mitigar los posibles errores que pueda haber en la ubicación del nano-satélite. A continuación, se muestra un diagrama de bloques de funcionamiento del GPS U BOX y SIM808 respectivamente que describe detalladamente los elementos que conformar cada parte del componente.

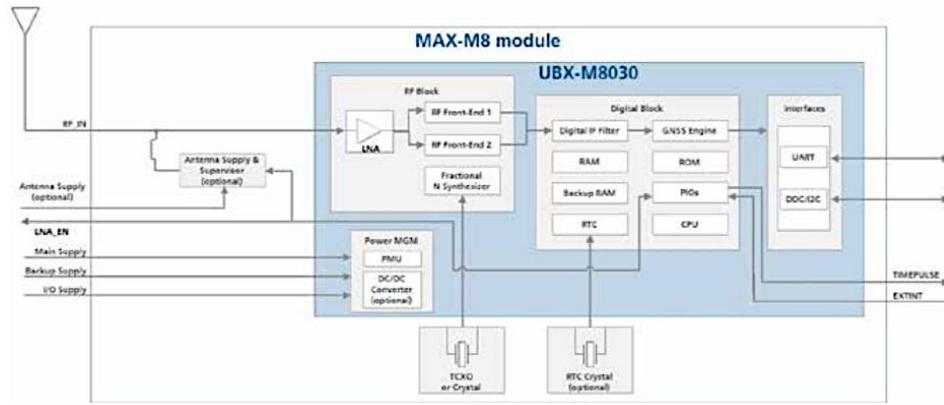


Figura 28. Diagrama de bloques del componente UBLOX GPS [13].

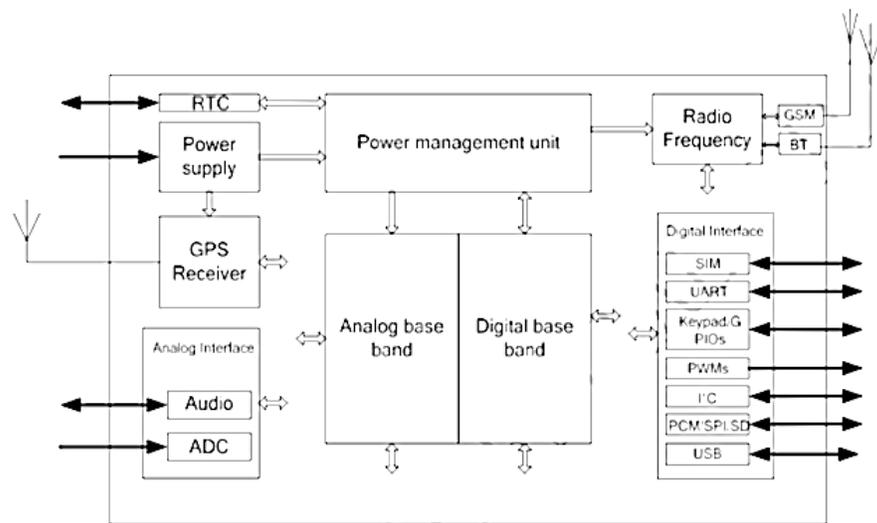


Figura 29. Diagrama de bloques del funcionamiento del GPS SIM808 [14].

8.2.7 CPU (Ubicación y navegación)

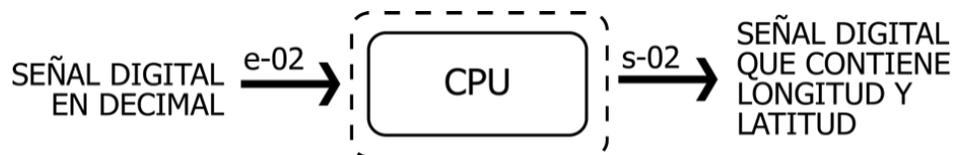


Figura 30. Estructura funcional del receptor de GPS (Ubicación y navegación).

Tabla 17. Selección de componente de la CPU (Ubicación y navegación).

| SUBSISTEMA DE UBICACIÓN Y NAVEGACIÓN | | | |
|--------------------------------------|--|---|--|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | PIC 18F2550 | ARDUINO LEONARDO |
| e-02 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s que comunica posición en decimal | Cuenta con dos puertos seriales de comunicación que permite leer la señal de entrada en I ² C y adicionalmente, cuenta con dos pines Tx y Rx para comunicación serial permitiendo leer ambos GPS | Cuenta con dos puertos seriales de comunicación que permite leer la señal de entrada en I ² C y adicionalmente, cuenta con dos pines Tx y Rx para comunicación serial permitiendo leer ambos GPS. Por otra parte, cuenta con una librería específica para I ² C. |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | PIC 18F2550 | ARDUINO LEONARDO |
| s-02 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que comunica posición en decimal | Sólo cuenta con un puerto I ² C el cual ya es usado por uno de los GPS conectado. | Cuenta con dos puertos de comunicación I ² C, uno por los pines 17 y 18 (SDA y SCL respectivamente) y los pines A0 y A1 (SCL y SCA respectivamente). |

Se elige el Arduino Leonardo porque cumple con el requerimiento de entrada, el cual. A continuación, se muestran las especificaciones técnicas del componente.

Tabla 18. Especificaciones técnicas [10].

| | |
|-----------------------------|---|
| Microcontroller | ATmega32u4 |
| Operating Voltage | 5V |
| Input Voltage (Recommended) | 7-12V |
| Input Voltage (limits) | 6-20V |
| Digital I/O Pins | 20 |
| PWM Channels | 7 |
| Analog Input Channels | 12 |
| DC Current per I/O Pin | 40 mA |
| DC Current for 3.3V Pin | 50 mA |
| Flash Memory | 32 KB (ATmega32u4) of which 4 KB used by bootloader |
| SRAM | 2.5 KB (ATmega32u4) |
| EEPROM | 1 KB (ATmega32u4) |
| Clock Speed | 16 MHz |
| Length | 68.6 mm |
| Width | 53.3 mm |
| Weight | 20 g |

8.2.8 Sensor de presión (monitoreo interno)



Figura 31. Estructura funcional del sensor de presión (monitoreo interno).

Tabla 19. Selección de sensor de presión (monitoreo interno).

| SUBSISTEMA DE MONITOREO INTERNO | | | | |
|---------------------------------|---|--|--|---|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | BMP180 | MS5611 | BMP280 |
| e-01 | Presión externa en un rango de 300 hPa hasta 1100 hPa | Rango de presión: Desde 300 hPa hasta 1100 hPa | Rango de presión: Desde 10 hPa hasta 1200 hPa | Rango de presión: Desde 300 hPa hasta 1100 hPa |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | BMP180 | MS5611 | BMP280 |
| s-01 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con corriente de 20 miliamperios que comunica presión. | Señal de salida analógica entre 0 y 3.3 voltios Precisión: ±0,06 metros Resolución: 16 bit Muestras/segundo: 1 | Señal que comunica la temperatura mediante el puerto SDA del protocolo I ² C Precisión: ±0,03 metros Resolución: 24 bit Muestras/segundo: 1 | Señal que comunica la temperatura mediante el protocolo I ² C Precisión: ±0,06 metros Resolución: 16 bit Muestras/segundo: 1 |

Debido a que es un sensor que ya se usa en el subsistema de monitoreo de altitud, en esta nueva aplicación se usa el mismo sensor haciendo que sólo se deba replicar el uso del componente. No se muestran las especificaciones técnicas debido a que se encuentran presentes en la Figura 24.

8.2.9 Sensor de temperatura (monitoreo interno)

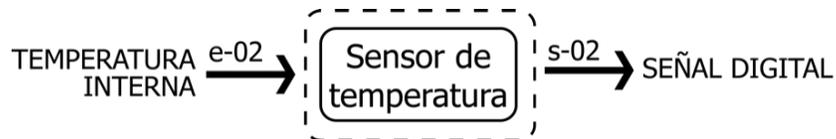


Figura 32. Estructura funcional del sensor de temperatura (monitoreo interno).

Tabla 20. Selección de sensor de temperatura (monitoreo interno).

| SUBSISTEMA DE MONITOREO INTERNO | | | | |
|---------------------------------|---|---|---|--|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | LM35 | DHT22 | SHT15 |
| e-02 | Temperatura del medio ambiente en un rango de -10°C a 35°C | Rango de temperaturas: Desde -55° C a 150° C | Rango de temperaturas: Desde -40° C a 80° C | Rango de temperaturas: Desde -40° C a 123° C |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | LM35 | DHT22 | SHT15 |
| s-02 | Señal digital unidireccional de 5 voltios y con resolución mínima de 8 bits | Señal de salida analoga entre 0 y 5 voltios Precisión: ±0,5° C Conversión: 10 mV / °C Tiempo de respuesta: 4 min. | Señal que comunica la temperatura mediante el puerto SDA del protocolo I ² C Precisión: ±0,5° C Resolución: 16 bit Muestras/segundo: 0,5 | Señal que comunica la temperatura mediante el protocolo I ² C Precisión: ±0,3° C Resolución: 14 bit Muestras/segundo: 1 |

Debido a que es un sensor que ya se usa en el subsistema de control de temperatura, en esta nueva aplicación se usa el mismo sensor haciendo que sólo se deba replicar el uso del componente. No se muestran las especificaciones técnicas debido a que se encuentran presentes en la tabla 10.

8.2.10 Sensor de humedad (monitoreo interno)



Figura 33. Estructura funcional del sensor de humedad (monitoreo interno).

Tabla 21. Selección del sensor de humedad (monitoreo interno).

| SUBSISTEMA DE MONITOREO INTERNO | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|---|---|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | DHT11 | DHT22 |
| e-03 | Humedad relativa entre 70 y 90% | Rango de humedad: Desde 20% a 90% HR | Rango de humedad: Desde 0% a 100% HR |

| SALIDA | REQUERIMIENTO | DHT11 | DHT22 |
|--------|---|---|---|
| s-03 | Señal digital unidireccional de 5 voltios y con resolución mínima de 8 bits | Señal que comunica la temperatura mediante el puerto SDA del protocolo I ² C Precisión: ±1% HR Resolución: 8 bit Muestras/segundo: 0,5 | Señal que comunica la temperatura mediante el puerto SDA del protocolo I ² C Precisión: ±1% HR Resolución: 8 bit Muestras/segundo: 1 |

Las características del sensor DHT22 se encuentran especificadas en la tabla 10.

8.2.11 CPU (monitoreo interno)

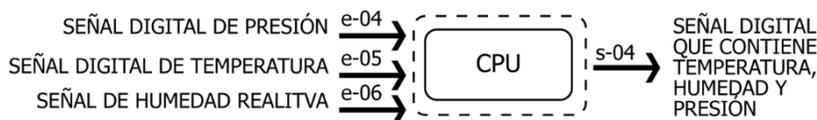


Figura 34. Estructura funcional de la CPU (Monitoreo interno).

Tabla 22. Selección de la CPU (Monitoreo interno).

| SUBSISTEMA DE MONITOREO INTERNO | | | |
|---------------------------------|---|--|--|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | PIC 18F4550 | ARDUINO LEONARDO |
| e-04/e-05/e-06 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que comunica el valor de la presión externa | Cuenta con dos puertos seriales de comunicación que permite leer la señal de entrada proveniente de sensor por el puerto SDA | Cuenta con dos puertos seriales de comunicación que permite leer la señal de entrada proveniente de sensor por el puerto SDA y puerto de Tx y Rx para manejo con comandos AT. Adicionalmente, cuenta con una librería específica para I ² C |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | PIC 18F4550 | ARDUINO LEONARDO |
| s-04 | Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de la altura en un rango de 100 a 25.000 | Cuenta con señal digital de salida con 5 voltios y un máximo de 25 mili-amperios y 16 puertos digitales de salida | Cuenta con señal digital de salida con 5 voltios y un máximo de 40 mili-amperios y 22 puertos digitales de salida |

El Arduino Leonardo cumple todos los requerimientos de entrada y salida. Se elige el Arduino Leonardo debido a que Arduino es compatible con el sensor DHT22. Las especificaciones se encuentran en la tabla 12.

8.2.12 CPU A (Tx y Rx interno)

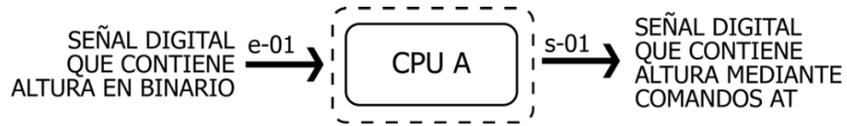


Figura 35. Estructura funcional de la CPU A (Tx y Rx interno).

Tabla 23. Selección de e la CPU A (Tx y Rx interno).

| SUBSISTEMA INTERNO DE Tx Y Rx | | | |
|-------------------------------|---|---|---|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | PIC 18F4550 | ARDUINO LEONARDO |
| e-01 | Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de medida indirecta de la altura del nano-satélite en un rango de 100 a 25.000 metros | Cuenta con 16 puertos digitales de I/O a 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios | Cuenta con 22 puertos digitales de I/O a 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | PIC 18F4550 | ARDUINO LEONARDO |
| s-01 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene la altura en un rango de 100 a 25.000 metros | Cuenta con un puerto de comunicación serial Tx y Rx usando comandos AT | Cuenta con un puerto de comunicación serial Tx y Rx usando comandos AT. Cuenta con librería para manejar dichos puertos |

Dado que en el Arduino Leonardo cuenta con una librería que facilita la comunicación hacia el transmisor inalámbrico, se elige la opción del Arduino. Las especificaciones se muestran en la tabla 12.

8.2.13 Tx y Rx inalámbrico A (Tx y Rx interno)

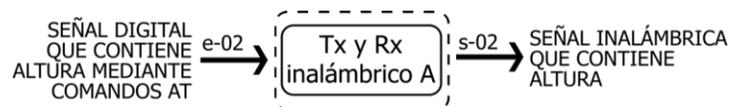


Figura 36. Estructura funcional del Tx y Rx inalámbrico A.

Tabla 24. Selección de Tx y Rx inalámbrico A.

| SUBSISTEMA INTERNO DE Tx Y Rx | | | |
|-------------------------------|---|--|---|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | BLUETOOTH HC-05 | MÓDULO RF DE 433 MHz |
| e-02 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene la altura en un rango de 100 a 25.000 metros | Cuenta con un puerto de comunicación serial Tx y Rx usando comandos AT | Cuenta con un puerto de comunicación serial Tx y Rx |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | BLUETOOTH HC-05 | MÓDULO RF DE 433 MHz |
| s-02 | Señal inalámbrica que contiene valor de la altura en un rango de 100 a 25.000 metros | Señal inalámbrica en banda ISM de 2,4 GHz con potencia máxima de 1 mw - Alcance máximo de 5 metros | Señal inalámbrica a 433MHz con potencia máxima de 10 mw - Alcance entre 20 y 200 metros |

La opción que más se adapta a los requerimientos en cuanto implementación por simplicidad de uso es el Bluetooth.

8.2.14 Tx y Rx inalámbrico B (TX y Rx)

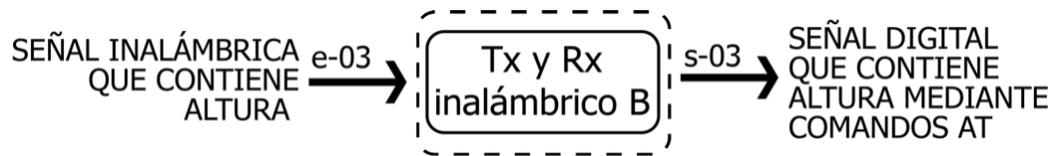


Figura 37. Estructura funcional del Tx y Rx inalámbrico B.

Tabla 25. Selección de Tx y Rx inalámbrico B.

| SUBSISTEMA INTERNO DE Tx Y Rx | | | |
|-------------------------------|--|--|---|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | BLUETOOTH HC-05 | MÓDULO RF DE 433 MHz |
| e-03 | Señal inalámbrica que contiene valor de la altura en un rango de 100 a 25.000 metros | Señal inalámbrica en banda ISM de 2,4 GHz con potencia máxima de 1 mw - Alcance máximo de 5 metros | Señal inalámbrica a 433MHz con potencia máxima de 10 mw - Alcance entre 20 y 200 metros |

| SALIDA | REQUERIMIENTO | BLUETOOTH HC-05 | MÓDULO RF DE 433 MHz |
|--------|---|--|---|
| s-03 | Señal digital bidireccional de una velocidad de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de 20 mili-amperios que contiene la altura | Cuenta con un puerto de comunicación serial Tx y Rx usando comandos AT | Cuenta con un puerto de comunicación serial Tx y Rx |

La opción que más se adapta a los requerimientos en cuanto implementación por simplicidad de uso es el Bluetooth. Adicionalmente, el módulo cuenta con una librería que facilita el uso en Arduino.

8.2.15 CPU B (Tx y Rx interno)

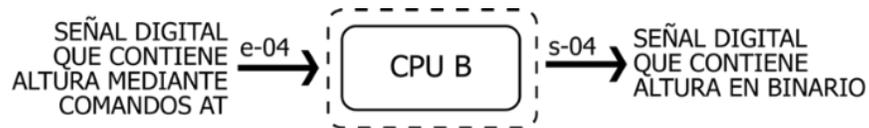


Figura 38. Estructura funcional de la CPU B (Tx y Rx interno).

Tabla 26. Selección de la CPU B (Tx y Rx interno).

| SUBSISTEMA INTERNO DE Tx Y Rx | | | |
|-------------------------------|---|---|---|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | PIC 18F4550 | ARDUINO LEONARDO |
| e-04 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene la altura en un rango de 100 a 25.000 metros | Cuenta con un puerto de comunicación serial Tx y Rx usando comandos AT | Cuenta con un puerto de comunicación serial Tx y Rx usando comandos AT. Cuenta con librería para manejar dichos puertos |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | PIC 18F4550 | ARDUINO LEONARDO |
| s-04 | Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de medida indirecta de la altura del nano-satélite en un rango de 100 a 25.000 metros | Cuenta con 16 puertos digitales de I/O a 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios | Cuenta con 22 puertos digitales de I/O a 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios |

Dado que en el Arduino Leonardo cuenta con una librería que facilita la comunicación hacia el transmisor inalámbrico, se elige la opción del Arduino. Las especificaciones se muestran en la tabla 12.

8.2.16 Unidad central de procesamiento



Figura 39. Estructura funcional de la unidad central de procesamiento.

Tabla 27. Selección de la unidad central de procesamiento.

| UNIDAD DE PROCESAMIENTO CENTRAL | | | |
|---------------------------------|---|--|--|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | RASPBERRY PI 3 | LATTE PANDA |
| e-01 | Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de temperatura | Cuenta un GPIO de 40 pines con un voltaje máximo de entrada 3.3 voltios y corriente máxima de 20 mili-amperios | Cuenta un GPIO de 40 pines con un voltaje máximo de entrada 5 voltios y corriente máxima de 40 mili-amperios |
| e-02 | Señal digital en binario de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios, que contiene valor de la altura en un rango de 100 a 25.000 | Cuenta un GPIO de 40 pines con un voltaje máximo de entrada 3.3 voltios y corriente máxima de 20 mili-amperios | Cuenta un GPIO de 40 pines con un voltaje máximo de entrada 5 voltios y corriente máxima de 40 mili-amperios |
| e-03 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios. | Cuenta con un puerto de comunicación I ² C | Cuenta con tres puertos de comunicación I ² C |
| e-04 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s que comunica el valor de la temperatura, presión y humedad relativa en decimal | Cuenta con un puerto de comunicación I ² C | Cuenta con tres puertos de comunicación I ² C |

| SALIDA | REQUERIMIENTO | RASPERRY PI 3 | LATTE PANDA |
|--------|--|--|--|
| s-01 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene coordenadas de ubicación, temperatura interna, humedad relativa interna, presión interna, altura y estado de vuelo. | Cuenta con un puerto de comunicación I ² C | Cuenta con tres puertos de comunicación I ² C |
| s-02 | Señal DC de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que indica que el nano-satélite aterrizó, y así, iniciar a emitir ondas de radiofrecuencia para su recuperación | Cuenta un GPIO de 40 pines con un voltaje máximo de entrada 3.3 voltios y corriente máxima de 20 mili-amperios | Cuenta un GPIO de 40 pines con un voltaje máximo de entrada 5 voltios y corriente máxima de 40 mili-amperios |

La CPU seleccionada es la tarjeta LattePanda debido a que, a diferencia de las Raspberry, cuenta con dos puertos más para protocolo de comunicación I²C. Adicionalmente, maneja el lenguaje C como lenguaje base de programación que lo diferencia de la Raspberry la cual maneja Python como lenguaje base. Finalmente, LattePanda maneja un voltaje de entrada y salida de 5 voltios en el GPIO, en caso de usar la Raspberry, se debería realizar un subsistema de acondicionamiento de señal que regule el voltaje a 3,3 voltios.

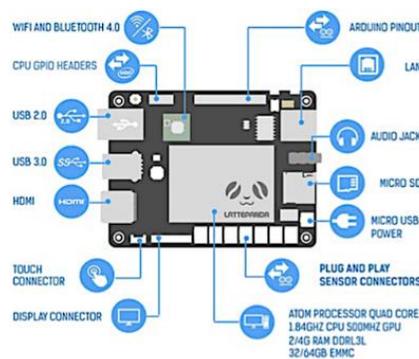


Figura 40. Periféricos de la tarjeta LattePanda [15].

8.2.17 CPU (Comunicación)

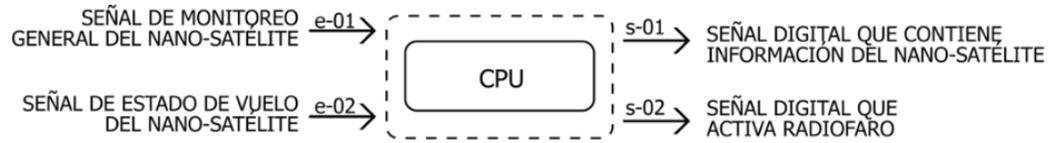


Figura 41. Estructura funcional de la CPU (Comunicación).

Tabla 28. Selección de la CPU (Comunicación).

| SUBSISTEMA DE COMUNICACIÓN | | | |
|----------------------------|---|--|--|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | PIC 18F4550 | ARDUINO LEONARDO |
| e-01 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s con un corriente de aproximadamente 20 mili-amperios que contiene coordenadas de ubicación, temperatura interna, humedad relativa interna, presión interna, altura, estado de vuelo ("En aire" o "En tierra") y código de alerta | Cuenta con dos puertos seriales de comunicación que permite leer la señal de entrada proveniente de sensor por el puerto SDA | Cuenta con dos puertos seriales de comunicación que permite leer la señal de entrada proveniente de sensor por el puerto SDA. Adicionalmente, cuenta con una librería específica para I ² C |
| e-02 | Señal DC de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que indica que el nano-satélite aterrizó, y así, iniciar a emitir ondas de radiofrecuencia para su recuperación | Cuenta con 16 puertos digitales de I/O a 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios | Cuenta con 22 puertos digitales de I/O a 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | PIC 18F4550 | ARDUINO LEONARDO |
| s-01 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s que contiene coordenadas de ubicación, temperatura interna, humedad relativa interna y presión interna. | Cuenta con un puerto de comunicación serial Tx y Rx usando comandos AT | Cuenta con un puerto de comunicación serial Tx y Rx usando comandos AT. Cuenta con librería para manejar dichos puertos |

| SALIDA | REQUERIMIENTO | PIC 18F4550 | ARDUINO LEONARDO |
|--------|--|---|---|
| s-02 | Señal DC de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que indica que el nano-satélite aterrizó, y así, iniciar a emitir ondas de radiofrecuencia para su recuperación | Cuenta con 16 puertos digitales de I/O a 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios | Cuenta con 22 puertos digitales de I/O a 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios |

8.2.18 Radiofaro (Comunicación)

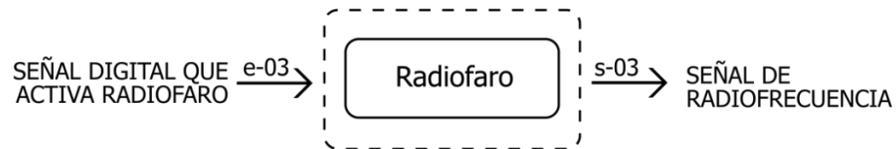


Figura 42. Estructura funcional del radiofaro.

Tabla 29. Selección de radiofaro.

| SUBSISTEMA DE COMUNICACIÓN | | |
|----------------------------|--|---|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | RF BEACON MARCO POLO |
| e-03 | Señal DC de 5 voltios y aproximadamente 20 mili-amperios que indica que el nano-satélite aterrizó, y así, iniciar a emitir ondas de radiofrecuencia para su recuperación | Cuenta con un puerto de enable que permite activar o desactivar la emisión de ondas |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | RF BEACON MARCO POLO |
| s-0e | Señal de radiofrecuencia detectable en un rango de 3 kilómetros a la redonda con una frecuencia entre 902.5 MHz y 906.5 MHz | Señal de radiofrecuencia detectable en un rango de 3 kilómetros a la redonda con una frecuencia entre 902.5 MHz y 906.5 MHz |

Por requerimiento del investigador principal se usa el radiobeacon RF Marco Polo debido a que ya se cuenta con el dispositivo y las especificaciones cumplen los requerimientos establecidos.

8.2.19 Red comercial (Comunicación)

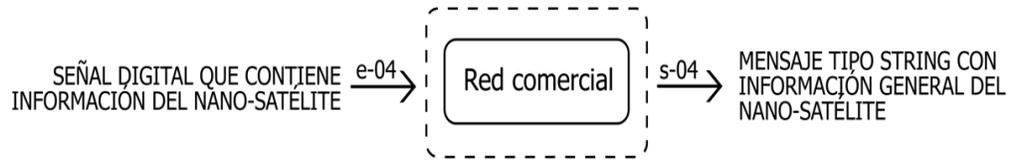


Figura 43. Estructura funcional del componente que conecta a la red comercial.

Tabla 30. Selección de componente que conecta a la red comercial.

| SUBSISTEMA DE COMUNICACIÓN | | | |
|----------------------------|--|---|--|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | SIM908 | SIM808 |
| e-04 | Señal digital bidireccional de 5 voltios a una velocidad máxima de transmisión de 0,1 Mbit/s que contiene coordenadas de ubicación, temperatura interna, humedad relativa interna y presión interna | Cuenta con un puerto de comunicación serial Tx y Rx usando comandos AT | Cuenta con un puerto de comunicación serial Tx y Rx usando comandos AT |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | SIM908 | SIM808 |
| s-04 | Mensaje tipo STRING decodificado del ASCII que contiene coordenadas de ubicación, temperatura interna, humedad relativa interna, presión interna, altura, estado de vuelo ("En aire" o "En tierra") y código de alerta que permita una comunicación entre máquina-humano | Capacidad GNSS con sensibilidad de -165 dBm – Conexión a red comercial en banda GSM - Capacidad de conexión satelital sólo con satélites americanos | Capacidad GNSS con sensibilidad de -160 dBm – Conexión a red comercial en banda GSM - Capacidad de conexión satelital con satélites americanos y rusos |

8.2.20 Fuente DC (Alimentación de componentes)

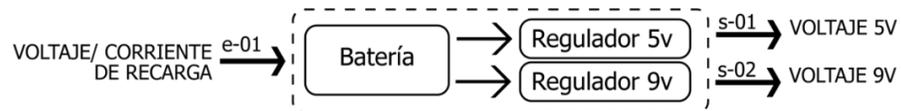


Figura 44. Estructura funcional de la fuente DC.

Tabla 31. Selección de batería.

| SUBSISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE COMPONENTES | | | |
|---|--|---|--|
| ENTRADA | REQUERIMIENTO | LIPO 11.1 VOLTIOS -10.000 mAh | LIPO 11.1 VOLTIOS -6.000 mAh |
| e-01 | Voltaje (Voltios) / corriente (mili-amperios) DC de recarga de batería | Carga de 12 voltios a 1,5 Amperios. | Carga de 12 voltios a 1,5 Amperios. |
| SALIDA | REQUERIMIENTO | LIPO 11.1 VOLTIOS -10.000 mAh | LIPO 11.1 VOLTIOS -6.000 mAh |
| s-01 | Voltaje (Voltios) / corriente (mili-amperios) DC que alimenta el subsistema de la cápsula interna y externa - Los elementos de electrónicos se alimentarán a 5 voltios, y se contará con una salida de 9 voltios | Si el consumo total del sistema es de 1 amperio por hora, esta batería da un tiempo de autonomía de 10 horas. | Si el consumo total del sistema es de 1 amperio por hora, esta batería da un tiempo de autonomía de 6 horas. |

El subsistema de alimentación de componentes, adicional a la batería seleccionada, contará con un regulador DC-DC comercial a 1.5 A como corriente máxima y entre 0 y 12 voltios. Se usará un regulador de voltaje comercial, el LM2596. El pcb del circuito junto con una fotografía del componente se muestra a continuación:

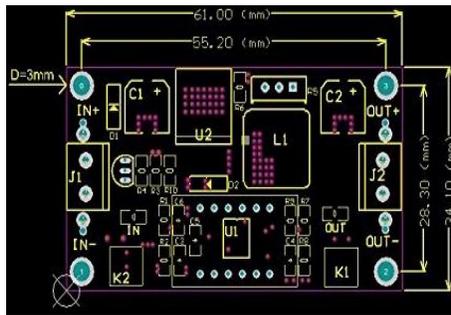


Figura 45. PCB del regulador [16].

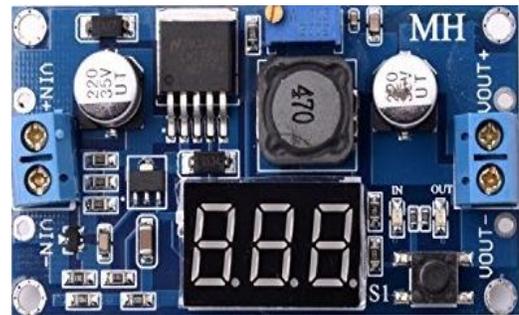


Figura 46. Regulador DC-DC [16].

8.3. Esquemático del sistema

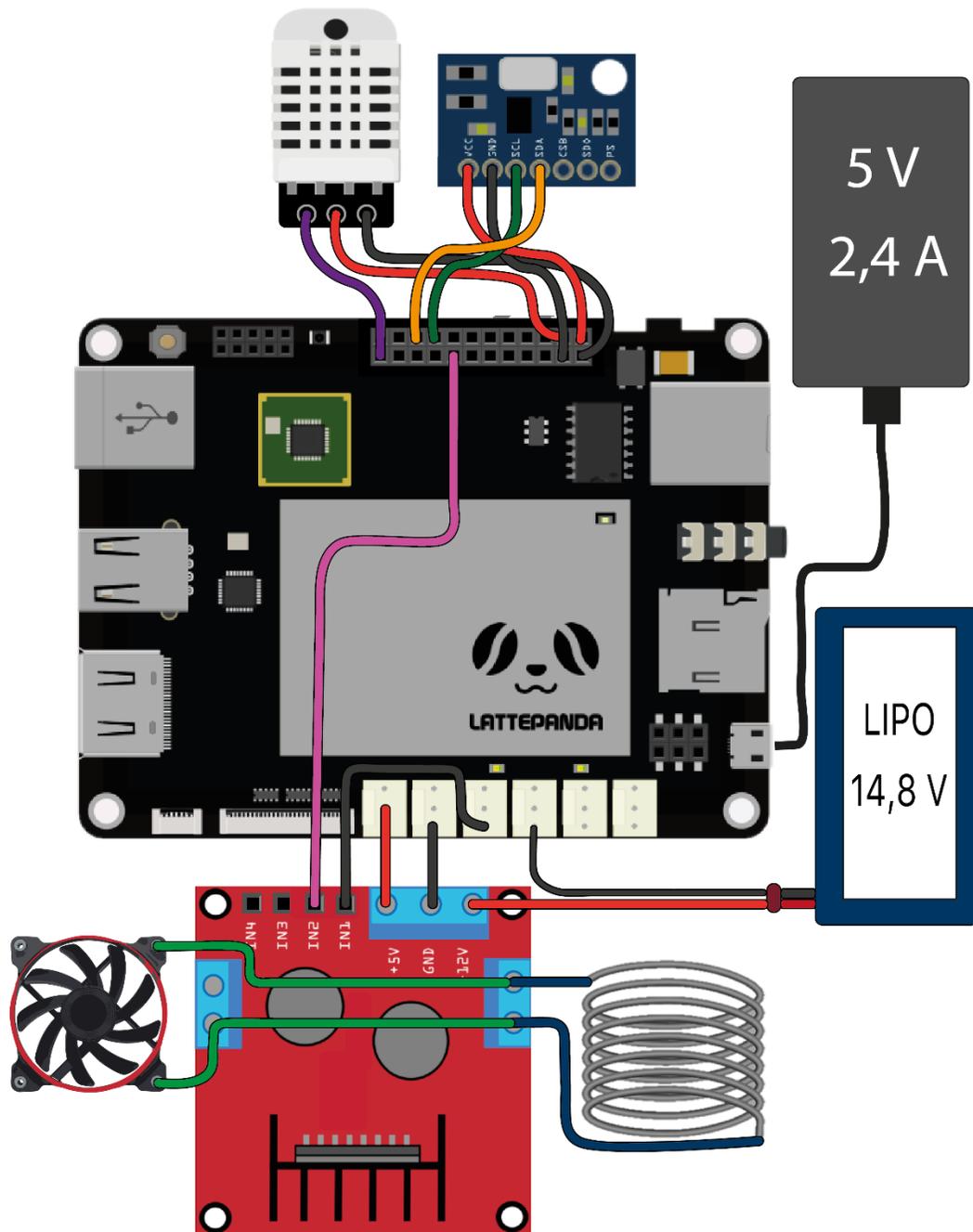


Figura 47. Esquemático general de conexión del circuito.

9 PLAN DE PRUEBAS DEL SISTEMA

No se cuenta con una cámara térmica ni con una cámara de vacío así que la prueba las pruebas térmicas se harán con un congelador y queda pendiente para la siguiente fase del proyecto realizar la prueba de presión por medio de la cámara de vacío.

9.1 Plan de pruebas de componentes

9.1.1 Sensor de temperatura DHT22

- **Objetivo**

Comprobar que el componente sense la temperatura del medio ambiente en un rango de -10°C a 35°C y la comunique mediante el protocolo I²C.

- **Materiales**

Cámara térmica que permitan variar la temperatura en un rango de -10°C y 35°C . Termómetro calibrado. Arduino Leonardo (controlador).

- **Desarrollo**

1. Ajustar el sensor y el controlador a una velocidad de comunicación de 9600 baudios.
2. Ajustar el ambiente a una temperatura de -10°C .
3. Verificar la temperatura ambiente mediante el termómetro patrón. En caso de no ser la deseada, reajustar.
4. Registrar 10 veces el valor sensado por el componente.
5. Aumentar en 5°C la temperatura del medio ambiente.
6. Repetir los pasos 3, 4 y 5 hasta alcanzar una temperatura de 35°C .
7. Calcular la media estadística de los 10 valores registrados por el componente en cada una de las temperaturas ajustadas.

9.1.2 Arduino Leonardo

- **Objetivo**

Comprobar salidas digitales y análogas del Arduino Leonardo.

- **Materiales**

Osciloscopio.

Arduino Leonardo.

- **Desarrollo**

1. Conectar una carga resistiva de $500\ \Omega$ a cada uno de los pines digitales del Arduino.
2. Habilitar todos los pines digitales del Arduino.
3. Verificar la señal DC de salida del Arduino mediante un osciloscopio.
4. Cambiar la resistencia de carga a $1k\ \Omega$ y luego a $10k\ \Omega$ en todos los pines digitales. Repetir pasos 2 y 3 respectivamente.
5. Calcular la media estadística de los valores registrados
6. Conectar una carga resistiva de $500\ \Omega$ a un pin PWM del Arduino.
7. Generar una señal PWM entre 0 y 5 voltios a una frecuencia de 500 Hz con ciclo útil del 30%.
8. Verificar el periodo del ciclo útil mediante el osciloscopio.
9. Repetir los pasos 7 y 8 con un ciclo útil de 50% y luego del 90%.
10. Cambiar la resistencia de carga a $1k\ \Omega$ y repetir pasos 7 y 8.

9.1.3 Celda Peltier

- **Objetivo**

Comprobar que la celda Peltier genere una temperatura de 20°C .

- **Materiales**

Termómetro. Fuente. Multímetro

- **Desarrollo**

1. Conectar una fuente DC en serie con resistencia de $1,2\ \Omega$ (de 5 W de potencia) y la celda Peltier.
2. Ajustar la fuente a 1,8 voltios.
3. Medir la temperatura máxima alcanzada en la celda usando el termómetro.

4. Calcular el delta de temperatura con respecto a la temperatura ambiente y la registrada en el paso anterior.

9.1.4 Receptor GPS SIM808 & M AX-M8

- **Objetivo**

Comprobar el funcionamiento del receptor GPS en un recorrido mínimo de 5 kilómetros.

- **Materiales**

SIM808. UBOC M AX-M8. Arduino Leonardo. Automóvil. Celular con Google Maps.

- **Desarrollo**

1. Conectar el sensor SIM808 y M AX-M8 a un Arduino Leonardo.
2. Programar los sensores.
3. Mediante un vehículo, realizar un recorrido de mínimo 5 km.
4. Durante el recorrido, registrar las coordenadas en términos de latitud y longitud, de los dos sensores y el celular (valor patrón) cada 500 metros de recorrido.
5. Calcular el margen del error de los dos GPS (SIM808 y M AX-M8) frente al valor patrón.
6. Realizar la misma prueba en un ambiente rural para comprobar la precisión.

9.1.5 Sensor de humedad DHT22

- **Objetivo**

Verificar el valor sensado de humedad relativa por el componente.

- **Materiales**

Humidificador. Sensor de humedad relativa calibrado (patrón).

- **Desarrollo**

1. Conectar el sensor de humedad relativa al Arduino Leonardo.
2. Configurar protocolo I²C a una velocidad de 9600 baudios.

3. Ajustar el ambiente a una humedad relativa de 80%
4. Verificar la HR del ambiente mediante el sensor patrón.
5. Aumentar en 5% la HR del medio ambiente y repetir el paso 4 hasta alcanzar una HR del 95%

9.1.6 *LattePanda*

- **Objetivo**

Verificar la comunicación I²C entre la LattePanda y dos arduinos.

- **Materiales**

2 arduinos nano.

- **Desarrollo**

1. Conectar los dos arduinos y LattePanda en paralelo por los puertos I²C.
2. Configurar el LattePanda como maestro y los arduinos como esclavos.
3. Configurar la velocidad de comunicación a 9600 baudios.
4. Asignar a cada esclavo un canal.
5. Enviar 500 caracteres iguales ("A") por el primer canal del maestro al esclavo (Trama 1).
6. Contar el número de errores encontrados en la trama.
7. Enviar 500 caracteres iguales ("A") por el primer canal del esclavo al maestro (Trama 2).
8. Contar el número de errores encontrados en la trama.
9. Enviar 500 caracteres iguales ("A") por el segundo canal del maestro al esclavo (Trama 3).
10. Contar el número de errores encontrados en la trama.
11. Enviar 500 caracteres iguales ("A") por el segundo canal del esclavo al maestro (Trama 4).
12. Contar el número de errores encontrados en la trama.

9.1.7 RF BEACON MARCO POLO

- **Objetivo**

Comprobar rango de detección de onda en el radiofaro.

- **Materiales**

Decámetro.

- **Desarrollo**

1. Habilitar el emisor de ondas.
2. A partir del punto inicial donde se encuentra el emisor de ondas, alejarse 30 metros usando el decámetro.
3. Verificar si el radiobeacon detecta la señal emitida.
4. Repetir el paso 2 y 3 hasta alcanzar una distancia 1,5 km.
5. Repetir el paso todos los pasos anteriores en otra dirección.

9.1.8 Regulador DC-DC.

- **Objetivo**

Comprobar el funcionamiento del regulador DC-DC.

- **Materiales**

Multímetro

- **Desarrollo**

1. Conectar batería de 12 voltios a la entrada del regulador.
2. Ajustar el trimmer a 5 voltios.
3. Comprobar el voltaje de salida en el regulador.
4. Ajustar el trimmer a 9 voltios.
5. Comprobar el voltaje de salida en el regulador.
6. Conectar carga de 5Ω a 1 watt en la salida regulada a 5 voltios.
7. Medir corriente con el multímetro.
8. Conectar carga de 9Ω a 1 watt en la salida regulada a 9 voltios

9.2 Plan de pruebas de subsistemas

9.2.1 Subsistema de control de temperatura

- **Objetivo**

Comprobar el funcionamiento del sistema de control de temperatura.

- **Materiales**

Cámara térmica. Termómetro. Fuente DC. Cronómetro.

- **Desarrollo**

1. Fijar -10°C en la cámara térmica. Comprobar con un termómetro.
2. Insertar la cápsula contenedora del sistema de control de temperatura dentro de la cámara térmica.
3. Con el termómetro medir la temperatura interna de la cápsula.
4. Monitorear cada 10 minutos la temperatura interna de la cápsula durante 1 hora.
5. Calcular la media estadística de los valores obtenidos.

9.2.2 Subsistema de monitoreo interno

- **Objetivo**

Comprobar que el subsistema sense las variables físicas de presión, temperatura, humedad relativa, y las comunique por medio del protocolo I²C.

- **Materiales**

Cámara térmica. Humificador. Termómetro. Sensor de humedad. Programa Arduino.

- **Desarrollo**

1. Fijar temperatura en -10°C en la cámara térmica. Verificar temperatura con el termómetro.
2. Comprobar mediante el monitor serial de Arduino que el subsistema indique la temperatura de la cámara.
3. Medir mediante el termómetro la temperatura ambiente.

4. Comprobar mediante el monitor serial de Arduino que el subsistema indique la temperatura ambiente.
5. Mediante el sensor de humedad, medir la humedad relativa.
6. Comprobar mediante el monitor serial de Arduino que el subsistema indique la humedad relativa del ambiente.
7. Aumentar la humedad relativa en un 10% con respecto a la humedad relativa del ambiente.
8. Mediante el sensor de humedad, medir la nueva humedad relativa del ambiente.
9. Comprobar mediante el monitor serial de Arduino que el subsistema indique la humedad relativa del ambiente.

9.2.3 Subsistema de comunicación

- **Objetivo**

Comprobar conexión entre el componente y un dispositivo enlazado a la red comercial. En este caso se quiere analizar que el componente haga las veces de emisor y el dispositivo enlazado a la red, funcione como receptor de todos los mensajes emitidos.

- **Materiales**

Celular conectado a la red comercial.

- **Desarrollo**

1. Usando el módulo SIM808, enlazar el componente con un celular conectado a la red comercial.
2. Enviar 100 caracteres iguales ("A") del componente al celular (Trama 1)
3. Contar el número de errores encontrados en la trama.

9.2.4 Subsistema de monitoreo de altitud

- **Objetivo**

Comprobar que el componente sense la altura mediante la variación de la presión atmosférica y la comunique mediante el protocolo I²C.

- **Materiales**

Drone.

Arduino Leonardo.

SIM808.

- **Desarrollo**

Usando el sistema de comunicación GSM (Objetivo desarrollado el semestre anterior), comunicar la altura a la cual se encuentra un drone. Se tendrá como valor patrón el altímetro del drone. El paso a paso es el siguiente:

1. Conectar el sensor a un Arduino y al sistema GSM (SIM808).
2. Mediante el drone, elevar el circuito 10 metros a partir del punto inicial.
3. Registrar la altura enviada por el sistema GSM.
4. Aumentar 10 metros la altura del drone y repetir el punto anterior. Realizar hasta alcanzar 100 metros de altura.

9.2.5 Subsistema interno de Tx & Rx

- **Objetivo**

Verificar el número de errores en una trama de 500 caracteres en un enlace entre dos bluetooth.

- **Materiales**

Arduino Leonardo.

Bluetooth

- **Desarrollo**

1. Usando el Arduino Leonardo, enlazar dos bluetooth (maestro y esclavo) de manera bidireccional.
2. Enviar 500 caracteres iguales ("A") del maestro al esclavo (Trama 1)
3. Contar el número de errores encontrados en la trama.

4. Enviar 500 caracteres iguales ("A") del esclavo al maestro (Trama 2).
5. Contar el número de errores encontrados en la trama.

9.3 Plan de pruebas de integración

- **Objetivo**

Comprobar que los subsistemas se comuniquen con la unidad central de procesamiento y que dicha unidad controle el nano-satélite.

- **Materiales**

Arduino Leonardo.

- **Desarrollo**

1. Conectar todos los subsistemas entre sí.
2. Verificar que exista comunicación mediante el protocolo I²C.
3. Enviar 500 caracteres iguales ("A") del maestro al esclavo (Trama 1)
4. Contar el número de errores encontrados en la trama.
5. Enviar 500 caracteres iguales ("A") del esclavo al maestro (Trama 2).
6. Contar el número de errores encontrados en la trama.
7. Repetir los pasos 3, 4, 5, y 6 desde cada uno de los subsistemas.

10 DISEÑO INDUSTRIAL

10.1 Análisis del contexto

El semillero de Astrobiología VIDA manifestó que el nano-satélite diseñado en la Fase I, podría presentar fallas al superar la troposfera debido a que el sistema de calefacción no garantiza una temperatura adecuada para el correcto funcionamiento de la electrónica a bordo; adicionalmente, la temperatura de la carga biológica no alcanza los 25°C haciendo factible que la bacteria muera. En adición, el nano-satélite no se podría recuperar debido a que el sistema de planeación aerodinámico es insuficiente para asegurar un descenso controlado, y una vez ha aterrizado, las coordenadas de ubicación proporcionadas por el nano-satélite no serían ni

cercanas a las esperadas, y además no tiene un sistema de radio-faro que anuncie su posición final.

Por lo cual se propone realizar un rediseño, implementación y puesta en operación de un nano-satélite que subirá una carga biológica viva (bacteria bacillus acidofillus) a la estratosfera para ser expuesta a la radiación cósmica y la bajará en buen estado (sin evidencia de maltrato por movimientos bruscos o por cambios fuertes de temperatura) para ser recuperada mediante un sistema de comunicación, y posterior estudio por parte de biólogos.

La variable a la cual va a ser exponer la carga biológica es únicamente, la radiación cósmica. Sin embargo, algunas otras variables atmosféricas podrían afectar la bacteria, entre ellas la temperatura y la presión. La temperatura ideal para que la bacteria se cultive es de 45°C, y una vez cultivada la bacteria, para mantenerla con vida, se recomienda una temperatura de cercana a los 20°C, o más. Por otra parte, se debe mantener en un medio ácido con un pH entre 4 y 5 y a una presión atmosférica entre 700 mmHg y 1000 mmHg.

En cuanto a la estratósfera, se encuentra a una altura entre 10.000 y 50.000 metros, con una temperatura mínima de -60°C y máxima de 0°C, presión atmosférica entre los 0 y 250 milibares, densidad de aire entre 0,04 y 0,1 g/L. Adicionalmente, la mayor cantidad de ozono se encuentra entre la troposfera y estratósfera, y teniendo en cuenta que el ozono es O₃, la velocidad de oxidación de los metales es mayor.

Los componentes electrónicos comerciales suelen tener un rango de operación desde los -50°C hasta los 90°C, pero con un óptimo funcionamiento a las 25°C; en este caso se deberá garantizar una temperatura superior a los 10°C para que los componentes electrónicos funcionen correctamente y los parámetros establecidos en el datasheet del fabricante. Adicionalmente, algunos elementos electrónicos como las memorias y microcontroladores pueden fallar al ser sometidos a radiación ultravioleta.

Finalmente, se estima una altura máxima de ascenso de 33.240 metros para un nano-satélite de 3000 gramos de masa, con un globo de helio de 3000 gramos. Lo anterior resulta

en un tiempo de ascenso de 92 minutos antes de que el globo explote; una vez explote se estima una caída libre de poco menos de 20 minutos. Si las condiciones son ideales, y la recuperación toma un tiempo máximo de 120 minutos, se debería tener una autonomía de alimentación de 4 horas. Sin embargo, los tiempos son estimados en condiciones ideales y es vital tener un subsistema de alimentación de 8 horas.

Por otra parte, se debe tener en cuenta la circular 002 del 2015 de la Aero civil colombiana, pues esta establece los reglamentos, en lo relacionado con la realización de operaciones de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia, diferentes a aquellas de recreación y deporte. La finalidad de la circular es la prevención en presentar colisiones entre aeronaves tripuladas, y no tripuladas como es el caso del nano-satélite; para ello se deben tener en cuenta las limitaciones de la operación en Colombia, reglas generales de utilización y permiso para realizar estas operaciones.

El objetivo de este experimento por parte del semillero de Astrobiología BIDA, es realizar una comparación entre una bacteria (*Bacillus acidophilus*) expuesta a la estratosfera (B) y otra que estará en tierra en constante observación (A), analizando si se presentan cambios en la estructura de la bacteria B en respecto a la bacteria A.

Finalmente, es importante mencionar la Norma Técnica Colombiana 4092 – NTC 4092- la cual legisla los requisitos generales y directrices para análisis microbiológicos, del cual se hará cargo el semillero, teniendo en cuenta las condiciones de seguridad del laboratorio e instrumentos.

10.2 Casos de uso

10.2.1 Casos de Uso Típicos

A la hora de poner en operación al nano-satélite, se deben tener en cuenta los siguientes factores, que permitirán el cumplimiento del objetivo del experimento:

- Ausencia de daños físicos en la estructura.

- Correcto cierre hermético que evite despresurizaciones.
- Verificar que los elementos metálicos expuestos al medio ambiente no se encuentren oxidados.
- Verificar que la electrónica que permite el funcionamiento del nano-satélite esté aislada de la radiación cósmica. Que no existan daños en la película que aísla los rayos UV.
- Verificar que no se superen 10kg de masa.

El usuario debe saber operar el nano-satélite, previamente al vuelo. El paso a paso general del uso del nano-satélite, y que típicamente se debe realizar es el siguiente:

1. El usuario deberá contar con permiso de la Aero civil para poder efectuar la operación, para ello debe leer la circular 002 de 2015 de esta entidad.
2. Encender la electrónica a bordo, verificar que los indicadores de encendido de la electrónica estén activos.
3. Realizar calibración de sensores.
4. Verificar la conectividad entre la interfaz que conecta al usuario con el nano-satélite.
5. Ajustar la temperatura interna del nano-satélite hasta los 20°C aproximadamente.
6. Introducir la carga biológica.
7. Cerrar herméticamente las cápsulas.
8. Verificar que no existan alarmas por despresurización o cambios de temperatura.
9. Conectar globo de helio.
10. Iniciar vuelo autónomo de nano-satélite.
11. Verificar estados (ascenso, descenso, fase con paracaídas, aterrizaje) en el subsistema de recepción de ubicación.
12. Usar subsistema de radiofaro y subsistema de recepción de ubicación para generar rumbo relativo y encontrar el nano-satélite.
13. Verificar estado de la carcasa física.

14. Monitorear variables de temperatura y presión para no generar un cambio abrupto de estas condiciones.
15. Extraer carga biológica del nano-satélite para su entrega a biólogos.

10.2.2 Casos de Uso Atípicos

- El principal inconveniente que puede presentarse, es la muerte de la bacteria producto de cambios de presión, temperatura, pH, y humedad relativa, debido a que esto no permitiría cumplir con el objetivo principal del experimento.
- El usuario enciende la electrónica a bordo, sin embargo, al verificar los indicadores de encendido de ésta se encuentran inactivos, de ser así es posible que se presenten daños en la electrónica, y se debe verificar cada componente para encontrar el problema.

Las causas por las cuales puede ocurrir que la bacteria muera son:

- Mal diseño en la estructura física que genere despresurización.
- Mal diseño en el sistema de control de temperatura.
- El sistema de alimentación no cuenta con el tiempo de autonomía requerido (4 horas).
- Movimientos bruscos que afecten el estado de la bacteria.

10.3 Requerimientos industriales

10.3.1 Requerimientos de uso y función

- Practicidad:
 - El sistema deberá contar con un interfaz usuario máquina de fácil acceso.
- Conveniencia:
 - El usuario deberá tener un previo conocimiento y capacitación del funcionamiento del nano-satélite.
- Seguridad:

- El sistema deberá cumplir las estipulaciones de la circular 002 del 2015 de la Aero civil colombiana.
- El sistema deberá cumplir con la NTC 4092 sobre requisitos generales y directrices para análisis microbiológicos.
- **Mantenimiento:**
 - Se recomienda realizar mantenimiento preventivo a la electrónica a bordo, después de cada vuelo, y correctivo en caso de que haya fallas.
- **Reparación:**
 - Los elementos electrónicos se deben poder cambiar en los PCB.
 - Los integrados deben tener sus respectivas bases y cada salida de interconexión con otro PCB debe tener su respectiva bornera.
- **Manipulación:**
 - El usuario sólo podrá intervenir en el sistema mientras se inserta la carga biológica, se inicia el sistema y se prepara el vuelo.
- **Antropometría:**
 - El vuelo debe hacerse con previa autorización de la Aero civil colombiana y espacios donde no existan rutas aéreas comerciales.
- **Ergonomía:**
 - El usuario deberá tener fácil acceso a la cápsula contenedora de la bacteria sin descuidar la seguridad de la misma.
- **Percepción:**
 - El usuario deberá tener una capacitación previa al uso del nano-satélite para evitar cualquier accidente y/o daño alguno.
- **Mecanismo:**
 - El sistema debe superar 10.000 metros, y por cuestiones de diseño no superará los 30.000 metros.
 - El sistema debe tener una temperatura entre -10°C y 25°C.

- El sistema debe contener con una presión interna entre 9000 hPa y 1100 hPa en su interior.
- Acabado:
 - El sistema deberá contar con un acabado industrial con piezas que resista desgastes mecánicos.

10.3.2 Requerimientos de Producción

- De estructura:
 - El sistema deberá tener una estructura física liviana y resistente a golpes y caídas.
 - La estructura física debe estar diseñada de tal manera que se reduzcan la cantidad de uniones.
 - Las uniones que tenga la estructura deberán ser realizadas mediante soldadura, uniones térmicas, y/o de presión.
 - El sellado del sistema deberá realizarse herméticamente, por tanto, debe contar con empaques y tornillos que aseguren el cierre selle la cápsula.
 - El sistema debe contener dos cascaras físicas, una externa y una interna. De exterior a interior, se debe contar con: cáscara externa, espuma para aislamiento térmico, cámara de aire, cáscara interna y espuma para aislamiento térmico. El número de componentes electrónicos oscila entre 20 y 30.
 - El sistema deberá contar con dos motores que dirijan el paracaídas del nano-satélite durante el descenso.
 - El sistema deberá aislar la radiación cósmica en la cápsula contenedora de la electrónica debido a que los rayos UV borran las memorias ROM.
- Técnico-productivas:
 - El modo de producción es manufacturado.
 - El sistema no debe superar un costo de 6 millones de pesos colombianos.
 - Los metales usados en la estructura física deben ser inoxidable.

10.3.3 Requerimientos estéticos y de identificación

- Formales:
 - El sistema deberá contar con un cableado electrónico que facilite el entendimiento de las conexiones entre los PCB.
 - El sistema deberá contar con un acabado industrial.
 - El sistema deberá ser de color negro absorber la mayor cantidad de ondas y así aumentar la temperatura.
 - El sistema deberá contar con franjas reflectoras para permitir fácil ubicación en tierra.

10.4 Materiales, procesos y normativas

10.4.1 Materiales

Para la construcción del sistema se tienen cuatro posibles materiales de construcción. Por una parte, el sistema podría ser construido con en acrílico ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), debido a la resistencia mecánica que presenta el material y su bajo peso; aunque, no da garantía de que pueda soportar golpes y tampoco aísla la radiación cósmica. Como segunda opción, se puede realizar la construcción de la estructura en aluminio debido a que es inoxidable, bajo peso, a su resistencia mecánica y dureza. Una tercera opción se tiene la lámina de acero inoxidable que tiene características similares a las del aluminio, pero su costo es más elevado. Finalmente, se podría usar PVC de tuberías de alta presión para fabricar la estructura debido a su bajo peso y costo, aunque no aísla la radiación incurriendo en la necesidad de agregar una película contra rayos UV.

10.4.2 Procesos

Como se mencionó anteriormente, el presupuesto máximo para realización del proyecto es 6.000.000 de pesos ml/cte. El tiempo para la realización del proyecto culmina a finales del primer semestre del año 2019. La calidad de los acabados es de

prototipo teniendo en cuenta el modo de producción es manufactura, por tanto, no se exigen terminados industriales.

Una propuesta de solución consta de una sola capsula con aislamiento térmico debido a la simplicidad de construcción y a la reducción de recursos económicos, humanos, de tiempo y de máquinas. Sin embargo, el objetivo del proyecto es mitigar cambios bruscos de variables atmosféricas, es por esto que la otra propuesta de solución consta de dos cápsulas, una externa y una interna que genere un doble efecto hermético (para aminorar averías que pueda causar que alguna de las cápsulas no selle correctamente).

10.4.3 Normativas

Todos los elementos metálicos deben ser inoxidable. Específicamente, deben ser en acero inoxidable cumpliendo con la norma AISI 304 o 316. Los tornillos deben ser del mismo tipo de acero y deben cumplir la norma ASME B18.2.1. Por otra parte, los elementos en acrílico deben ser específicamente del tipo fundido transparente sin filtro UV. El aluminio debe ser tipo 11000 debido a su alta resistencia a la corrosión y fácil soldabilidad.

El sistema deberá cumplir la Norma Técnica Colombiana 4092 – NTC 4092, la cual legisla los requisitos generales y directrices para análisis microbiológicos, del cual se hará cargo el semillero, teniendo en cuenta las condiciones de seguridad del laboratorio e instrumentos.

El subsistema deberá cumplir la resolución No. 2355 de noviembre 24 de 2004, del Ministerio de Comunicaciones Resolución y la resolución No. 1056 de mayo 21 de 2008 del Ministerio de Comunicaciones. Dichas resoluciones se enmarcan en el uso del espectro electromagnético, específicamente, frecuencia (UHF) de libre uso y potencia de las señales en dichas frecuencias.

Se debe tener en cuenta la circular 002 del 2015 de la Aero civil colombiana, pues esta establece los reglamentos, en lo relacionado con la realización de operaciones de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia, diferentes a aquellas de recreación y deporte. La finalidad de la circular es la prevención en presentar colisiones entre aeronaves tripuladas, y no tripuladas como es el caso del nano-satélite; para ello se deben tener en cuenta las limitaciones de la operación en Colombia, reglas generales de utilización y permiso para realizar estas operaciones.

10.5 Alternativas de configuración

Para la construcción de la estructura se proponen dos diseños, cada uno con la misma configuración mostrada a continuación, pero con diferentes materiales, construcción y forma:

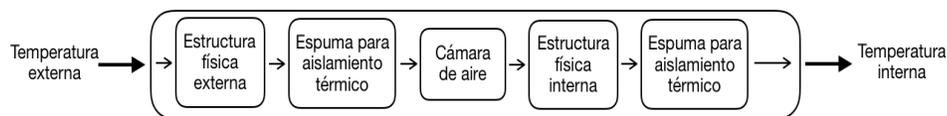


Figura 48. Diagrama de bloques de la estructura física en términos térmicos.

Diseño 1

El primer diseño cuenta con dos cajas metálicas, una contenedora de la otra. En esta configuración se busca representar estructuralmente las funciones que alteran la variable temperatura en el diagrama de la Figura anterior. Inicialmente, la temperatura llega a la caja externa, una vez esta estructura disminuya su temperatura, el aire existente entre la cámara externa e interna empezará enfriarse; luego de que el aire interno se enfríe, la temperatura de la estructura interna comenzará a descender. Con este fenómeno se crea una incubadora que mantiene una temperatura constante en el interior, teniendo en cuenta que la cápsula interna cuenta con un sistema electrónico generador de calor. Finalmente, para absorber mayor temperatura, todos los elementos internos serán de color negro mate.

A continuación, se muestra una construcción 3D de la estructura usando el programa Fusion 360:

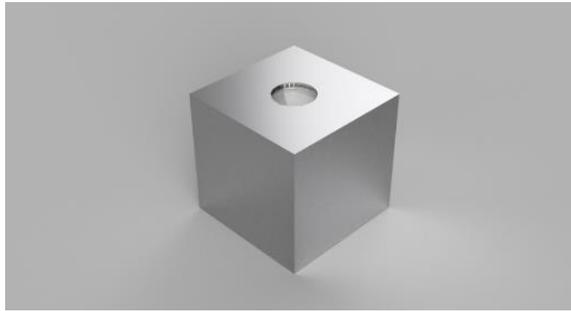


Figura 49. Render del diseño 1.

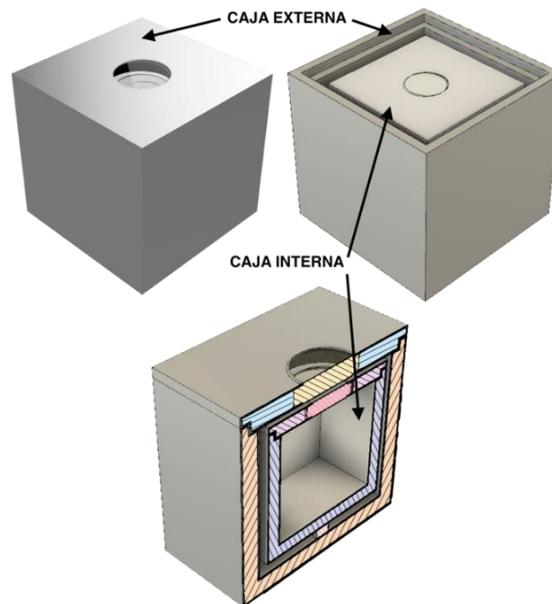


Figura 50. Estructura física interna del diseño 1.

Los materiales a usar en este diseño son:

- 2 láminas de aluminio tipo 11000 de mínimo 1400x725x3 milímetros. Deben ser cortadas a láser y dobladas en los vértices para evitar uniones de soldadura.
- Espuma poliuretano. Aproximadamente se necesitan 6 litros repartidos en 3 litros de Polioliol y 3 litros de isocianato.

- Lamina de acrílico fundido transparente de 400x200x10 milímetros. En esta lámina se cortarán a láser círculos de 100mm de diámetro que funcionarán como ventana de entrada de radiación cósmica.
- 24 tornillos en acero inoxidable 304 o 316 de 1/4" de grosor y un largo de 1" con sus respectivas tuercas ciegas en el mismo material. Asegurarán las tapas a las estructuras.
- 1000 mm de empaque mata-filos de 25mm. Sellará las tapas herméticamente.
- 180 mm de perfil de aluminio micro-fisurado. Contendrá el gel de sílice; las micro-fisuras permiten que la humedad ingrese al gel y evita que se expanda. Con esto se mantiene un ambiente seco en el interior y se evita empañar los acrílicos.
- 1 kilogramo de gel de sílice.

A continuación, se muestra una construcción 3D denotando la ubicación de los materiales:

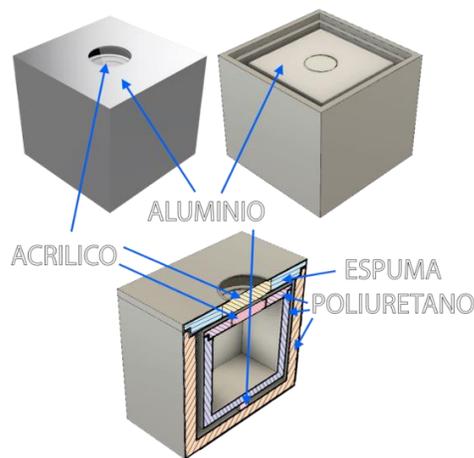


Figura 51. Materiales del diseño 1.

Diseño 2

El segundo diseño cuenta con dos cilindros en PVC, uno externo como contenedor de un segundo cilindro interno. Al igual que el diseño 1, se generan las mismas funciones estructurales para transformar la temperatura usando aislantes térmicos, color y cámaras de aire. A continuación, se muestra una construcción 3D de la estructura usando el programa Fusion 360:



Figura 52. Render del diseño 2.



Figura 53. Estructura física interna del diseño 2.

Los materiales a usar en este diseño son:

- PVC-Piping de 10" por 233 mm de altura. Será la carcasa externa contenedora del resto de la primera capa de espuma poliuretano.
- PVC-Piping de 8" por 192 mm de altura. Será la carcasa interna contenedora de la segunda caja cilíndrica (caja interna).
- PVC-Piping de 6" por 142 mm de altura. Será la carcasa interna contenedora de la segunda capa de espuma poliuretano.
- PVC-Piping de 4" por 100 mm de altura. Será la carcasa interna contenedora de la electrónica y carga biológica.
- Espuma poliuretano. Aproximadamente se necesita 4 litros repartidos en 2 litros de Polioliol y 2 litros de isocianato.
- Lamina de acrílico fundido transparente de 832x524x5 milímetros. En esta lámina se cortarán a láser círculos que funcionarán como ventana de entrada de radiación cósmica y tapas de sellamiento de la cápsula.
- 16 tornillos en acero inoxidable 304 o 316 de 1/4" de grosor y un largo de 1" con sus respectivas tuercas ciegas en el mismo material. Asegurarán las tapas a las estructuras.
- 800 mm de empaque caucho espuma de 25 mm ancho. Sellará las tapas herméticamente.

- 1000 mm de rubber black de 35 mm de espesor. Funcionará como resorte mecánico entre la estructura interna y la externa.
- 600 mm de perfil de aluminio micro-fisurado. Contendrá el gel de sílice; las micro-fisuras permiten que la humedad ingrese al gel y evita que se expanda. Con esto se mantiene un ambiente seco en el interior y se evita empañar los acrílicos.
- 1 kilogramo de gel de sílice.

A continuación, se muestra una construcción 3D denotando la ubicación de los materiales:

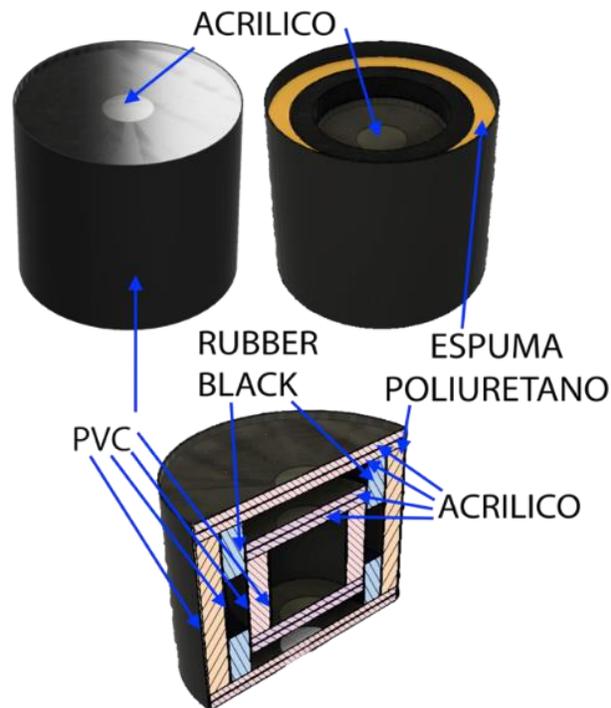


Figura 54. Materiales del diseño 2.

10.5.1 Evaluación y presentación de la alternativa a desarrollar

Para la evaluación de la alternativa a desarrollar es necesario calcular las tasas de transferencia térmica en cada material. En la siguiente tabla se muestra la conductividad térmica de cada material y el total de conductividad del diseño:

Tabla 32. Conducción térmica del diseño 2.

| MATERIAL | CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/mK) | ESPESOR (mm) | RESISTENCIA TERMICA (m ² K/W) | INVERSO RES. TERMICA (W/m ² K) |
|-------------|------------------------------|--------------|--|---|
| ALUMINIO | 209 | 2 | 0,01 | 104,50 |
| POLIURETANO | 0,90 | 25 | 27,78 | 0,04 |
| ACRILICO | 0,18 | 5 | 27,78 | 0,04 |
| AIRE | 0,024 | 5 | 208,33 | 0,00 |
| TOTAL | | | | 104,58 |

Tabla 33. Conducción térmica del diseño 2.

| MATERIAL | CONDUCTIVIDAD TERMICA (W/mK) | ESPESOR (mm) | RESISTENCIA TERMICA (m ² K/W) | INVERSO RES. TERMICA (W/m ² K) |
|--------------|------------------------------|--------------|--|---|
| PVC | 0,25 | 2 | 8,00 | 0,13 |
| RUBBER BLACK | 0,23 | 25 | 108,70 | 0,01 |
| POLIURETANO | 0,90 | 25 | 27,78 | 0,04 |
| ACRILICO | 0,18 | 5 | 27,78 | 0,04 |
| AIRE | 0,024 | 5 | 208,33 | 0,00 |
| TOTAL | | | | 0,21 |

Los criterios para la selección del diseño se evalúan usando criterios como tiempo, costo, resistencia térmica y peso, al final cada uno de estos valores se ponderan en base un valor porcentual. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla de comparación:

Tabla 34. Criterios de evaluación del diseño.

| CRITERIO | ALTERNATIVA 1 | EVALUACIÓN | PONDERACIÓN | ALTERNATIVA 2 | EVALUACIÓN | PONDERACIÓN | PESO |
|-----------------------------------|---------------|------------|-------------|---------------|------------|-------------|-------|
| TIEMPO (Horas) | 30 | 3 | 0,3 | 14 | 5 | 0,5 | 10 % |
| COSTO (\$) | 500.000 | 2 | 0,6 | 100.000 | 5 | 1,5 | 30 % |
| RESIS. TÉRM. (m ² K/W) | 264 | 1 | 0,4 | 380 | 4 | 1,6 | 40 % |
| PESO (Kg) | 5,66 | 4 | 0,8 | 6,60 | 1 | 0,2 | 20 % |
| TOTALES | - | 10 | 2,1 | - | 15 | 3,8 | 100 % |

El criterio con mayor relevancia es la resistencia térmica. Esto es debido a que en el principal objetivo del proyecto es evitar que la carga biológica muera por bajas temperaturas y el medio ambiente donde se encontrará el nano-satélite es la estratosfera con temperatura promedio de -60°C . De acuerdo a lo anterior, otros factores, el dinero es el segundo factor más relevante debido a que no se cuenta con un presupuesto alto. Finalmente, el peso es el tercer factor con mayor relevancia puesto lo que califica a un nano-satélite como nano, es que su peso se encuentre entre 1 kg y 10 kg. Por las razones expuestas anteriormente, la alternativa escogida es la 2 (Diseño 2 del apartado 6.4.5).

10.6 Diseño detallado

10.6.1 Selección de materiales.

Como se describió en el capítulo anterior, los materiales que se usaran son: PVC-Piping, espuma poliuretano, acrílico fundido, acero inoxidable 304, empaque caucho espuma, rubber black, perfil de aluminio micro-fisurado y gel sílice. Las fichas técnicas de los materiales se muestran a continuación:

- PVC-Piping

Tabla 35. Ficha técnica [17]

| MATERIAL | MARCAS | APLICACIONES | PROPIEDADES | PROPIEDADES FÍSICAS |
|----------------------------------|---|--|--|---|
| CLORURO DE POLIVINILO PVC | Solvic Evipol Norvinyl Lacovyl | Marcos de ventanas, cañerías de drenaje, tejas, aislantes de alambre y cableado, baldosas, mangueras, cubiertas estacionarias, calzado de moda, película transparente, prendas tipo piel | Rigido o flexible, claro, durable, impermeable, resistente al fuego y al impacto, buenas propiedades de aislamiento eléctrico, rendimiento limitado a bajas temperaturas | Módulo de tensión: 2.6 N/mm ² Resistencia al impacto de mellado: 2-45 KJ/m ² Coeficiente lineal de expansión: 80 x 10 ⁶ Temperatura máxima de uso continuo: 60 °C |

- Espuma Poliuretano

Tabla 36. Ficha técnica Poliuretano [17].

| MATERIAL | MARCAS | APLICACIONES | PROPIEDADES | PROPIEDADES FÍSICAS |
|----------------------------------|---|---|--|--|
| POLIURETANO PU TERMOFIJOS | Solvic Evipol Norvinyl Lacovyl | Suelas y tacones para zapatos deportivos, cabezas de martillo, sellos, juntas, ruedas para patinetas, telas de piel sintética, engranajes silenciosos | Flexible, caro, elástico, resistente al uso, impermeable | Módulo de tensión: n/a N/mm ² Resistencia al impacto de mellado: n/a KJ/m ² Coeficiente lineal de expansión: n/a x 10 ⁶ Temperatura máxima de uso continuo: n/a °C Gravedad específica: n/a |

- Espuma Polietileno (Rubber Black)

Tabla 37. Ficha técnica Polietileno [17].

| MATERIAL | MARCAS | APLICACIONES | PROPIEDADES | PROPIEDADES FÍSICAS |
|--|-----------------------------------|---|---|---|
| POLIETILENO (BAJA DENSIDAD) LDPE, LLDPE | Polietileno BP Dowlex Eltex | Botellas exprimibles, juguetes, bolsas, aislamiento de alta frecuencia, revestimientos de tanques químicos, sacos para trabajo pesado, empaques en general, tuberías de gas y agua. | Semirrígido, translúcido, muy resistente, impermeable, buena resistencia química, baja absorción de agua, fácilmente procesado con la mayor parte de los métodos, bajo costo. | Módulo de tensión: 0.2-0.4 N/mm ² Resistencia al impacto de Coeficiente lineal de expansión: 100-220 x 10 ⁶ Temperatura máxima: 70 °C Gravedad específica: 1.37 |

- Acrílico fundido

Tabla 38. Ficha técnica Acrílico [17].

| MATERIAL | MARCAS | APLICACIONES | PROPIEDADES | PROPIEDADES FÍSICAS |
|-------------------|---|---|---|---|
| ACRILICOS PMMA | Perspex Diakon Oroglas Plexiglas | Señales, ventanas de inspección, lentes de lámparas de cola, expendedoras de revistas, difusores luminosos, cubiertas contra polvo para aparatos de alta fidelidad. | Duro, Rígido, claridad del vidrio, brillante, resistente al clima, excelente para termoformado, colado y fabricación. | Módulo de tensión: 2.9-3.3 N/mm ² Resistencia al impacto de mellado: 1.5-3.0 KJ/m ² Coeficiente lineal de expansión: 60-90 x 10 ⁶ Temperatura máxima de uso |

- Acero inoxidable 304

Tabla 39. Ficha técnica acero inoxidable [18].

| MATERIAL | MARCAS | APLICACIONES | PROPIEDADES | PROPIEDADES FÍSICAS |
|-------------------|--------|--|--|--|
| ACERO 304 304L | n/a | Electrodomésticos, industria agrícola, alimenticia (cocinas, cubiertos, equipos de procesamiento), farmacéutica, arquitectura (fregaderos, fachadas, mobiliario urbano, etc.), equipos hospitalarios, industria criogénica | Buena resistencia a la corrosión, excelentes propiedades de conformación en frío y soldabilidad. Resistencia a la corrosión intercrystalina. Hasta 350°C. | Densidad: 7.9 Kg/dm ³ Módulo de Elasticidad: 193 Gpa Calor Especifico: 500 J/kg.°K Conductividad Térmica: 21.5 W/mK a 500°C Coeficiente de expansión térmica: 16-18.5 µm/mK |

- Perfil de aluminio micro-fisurado

Tabla 40. Ficha técnica aluminio [19].

| MATERIAL | MARCAS | APLICACIONES | PROPIEDADES | PROPIEDADES FÍSICAS |
|------------------|--------|---|--|---|
| ALUMINIO 1100 | n/a | Paneles decorativos anodizables Placas para litografía Industria Automotriz Electrónica Envases de todo tipo Utensilios domésticos | Buena resistencia a la corrosión, excelentes propiedades de conformación en frío y soldabilidad. Resistencia a la corrosión intercrystalina. Hasta 350°C. | Densidad: Coeficiente de Exp. Térmica: 68° F a 212°F Conductividad Térmica: 1540° (77°9 btu-in/ft2hr°F) |

- Gel sílice

Tabla 41. Ficha técnica sílica [20].

| MATERIAL | MARCAS | APLICACIONES | PROPIEDADES | PROPIEDADES FÍSICAS |
|--------------------------|--------|--|---|--|
| GEL DE SÍLICE AZUL (TSO) | n/a | Principalmente se utiliza como absorbente con indicador de humedad en instrumentos de precisión, en medicina, en el proceso químico de la gasolina, en comestibles, ropa, piel, aparatos eléctricos, industria de gases y otros. | Como agente higroscópico, no solo tiene la función de absorber la humedad, sino que además se decolora variablemente del azul al rosa de acuerdo con la cantidad de humedad absorbida, indicando así la variación de humedad en el medio o entre los paquetes sellados. | Densidad de masa: 650-800 g/l. Capacidad de absorción: 7% mínimo con humedad relativa del 20% - 19% mínimo con humedad relativa del 50% - 26% mínimo con humedad relativa del 90% Humedad relativa 20% - Azul claro / Humedad relativa 35% - Púrpura / Humedad relativa 90% - Rosa claro |

10.6.2 Selección de sistemas mecánicos

En base a los requerimientos de uso y de función, el sistema a usar debe ser hermético y mantenerse sellado en caso de golpes. Para ello se propone un sistema de sellamiento por presión. A continuación, se muestra una imagen que detalla este funcionamiento:



Figura 55 Sistema de apertura y cierre.

En el sistema se evidencia que a medida que los tornillos se aprieten, el caucho presente entre las dos láminas de acrílico comenzará a expandirse. Esto va a generar que choque contra las paredes del PVC, sellando herméticamente la cápsula. Por otra parte, entre más se expanda el caucho, mayor va a ser la fuerza generada en las paredes evitando que se abra el sistema mecánico.

Es importante aclarar que el acrílico inferior estará anclado y sellado a la superficie inferior y superior de la cápsula a manera de proteger la espuma y de facilitar el modo de apertura y cierre de la cápsula. Adicionalmente, fijar el acrílico inferior evita que existan fugas del gel de sílice encargado de absorber la humedad que pueda presentar la cápsula.

10.6.3 Definición de componentes principales

Los componentes principales se dividirán en tres grupos debido a su aplicación dentro del sistema. Primeramente, se mostrará una simulación de térmica a manera de mapa de calor que describe el comportamiento de la temperatura entre el medio ambiente y la cápsula interna que cuenta con una fuente de calor de 10 watts.

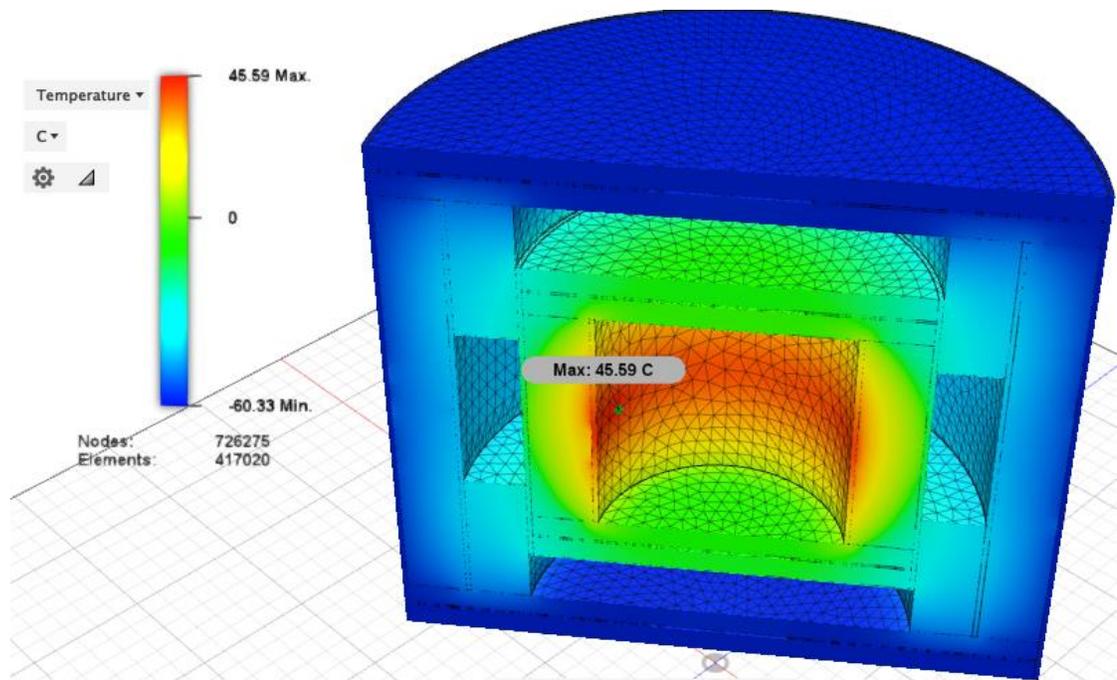


Figura 56. Simulación térmica.

Esta imagen detalla la temperatura máxima y mínima que podría alcanzar el sistema. Por otra parte, se muestra la temperatura típica que podría tener cada sección.

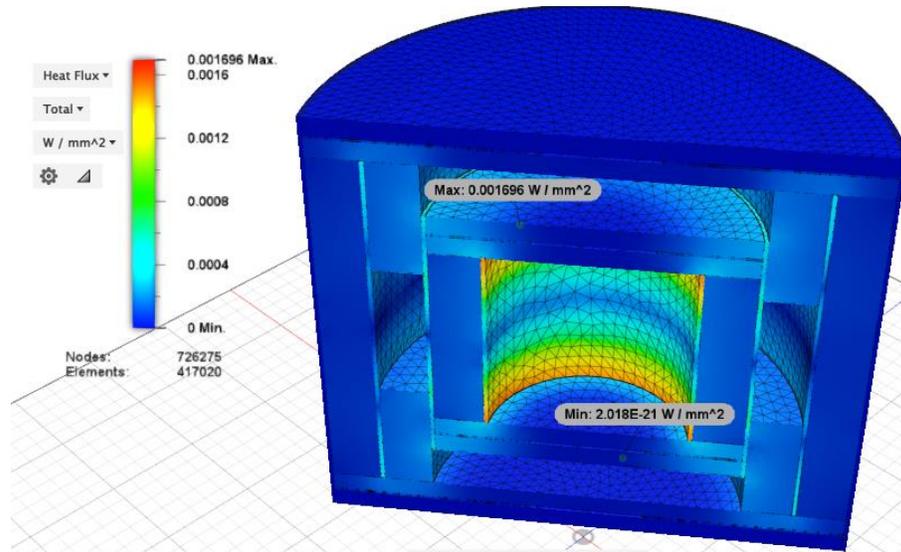


Figura 57. Flujo de calor del sistema.

La imagen anterior detalla el flujo de calor del sistema. Como se puede evidenciar, el material con mayor flujo de calor es el PVC, y específicamente, el existen en la cápsula interna. Esto se debe a que el PVC tiene una constante de conductividad térmica mayor a la del resto de materiales presentes.

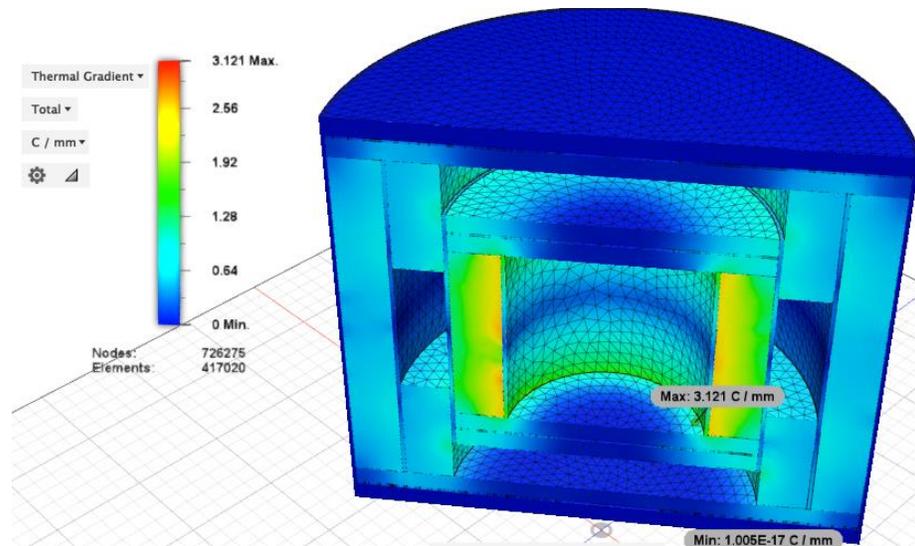


Figura 58. Gradiente térmico.

Finalmente, en esta última Figura, se detalla el gradiente térmico del sistema. Allí se muestra la variación de la temperatura en grados Celsius por mm de distancia. El valor de esta simulación radica en el espesor de los aislantes térmicos y así determinar que los espesores propuestos, son suficientes para mantener una temperatura interna de 20°C.

- Aislantes térmicos

Dentro de los aislantes térmicos se encuentra la espuma poliuretano la cual se encarga de disminuir el caudal de transferencia térmica por conducción entre la temperatura externa (medio ambiente) y la temperatura interna. Se aplicará tanto en la cápsula externa como en la interna, ambas con un espesor de 25 mm.

Por otra parte, se contará con una cámara de aire que cumple la función de retardar la transferencia térmica entre la cápsula externa e interna. La cámara de aire tendrá un espacio de 25 mm entre las dos cápsulas.

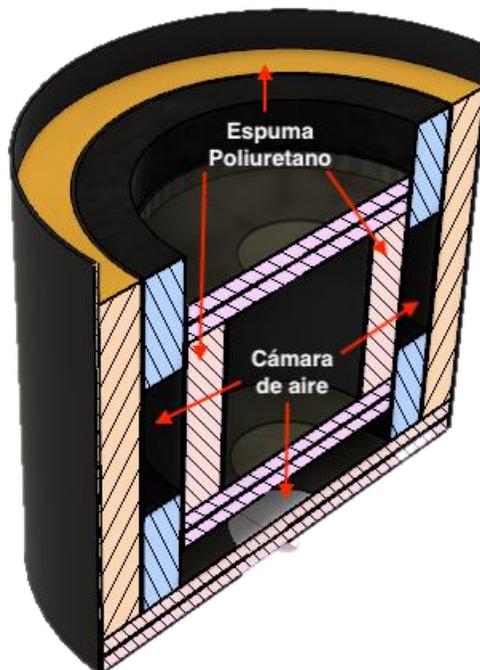


Figura 59. Aislantes térmicos.

- Mecanismos de abertura y cierre

Los materiales que hacen parte del sistema son el caucho espuma (Rubber Black), los tornillos en acero inoxidable y el acrílico. Este mecanismo ya se explicó en el apartado 6.4.7.2.

El acrílico se escogió por su bajo peso, transparencia para la entrada de radiación cósmica, y su resistencia al daño por radiación UV. Los tornillos en acero inoxidable se eligieron debido a que el acero 204 tiene alta resistencia a la corrosión y el medio ambiente donde se encontrará el nano-satélite es la capa de ozono, lo que se traduce en que la velocidad de corrosión en este ambiente es mayor.

El rubber black se eligió debido a su capacidad expansiva, generando que el cierre del sistema sea hermético y garantice que no existan fugas térmicas entre las cápsulas y el medio ambiente.

- Estructura de soporte

Como estructura de soporte se escogió el PVC de tuberías. Este material tiene alta resistencia mecánica a golpes, baja peso, presentación comercial (cilíndrico) y bajo capacidad de transferencia térmica. Cada cápsula será soportada en este material. Se usará una estructura de color negro para absorber temperatura por radiación. El detalle de los calibres y dimensiones se encuentran en el apartado 6.4.5, diseño 2. A continuación se muestra una imagen de la estructura:



Figura 60. Estructura de soporte.

10.7 Aplicación de normativas

La aplicación de la normatividad en cuanto a la manipulación de la bacteria según la Norma Técnica Colombiana 4092 – NTC 4092 referente a micro-organismos corresponde a los biólogos que hagan parte del proyecto.

Frente al uso de las frecuencias del espectro electromagnético, se usará la banda 2,4 GHz para el bluetooth. En cuanto a la comunicación entre el nano-satélite y el ser humano, se usarán las redes de Claro, Movistar o Tigo que ya tienen frecuencias preestablecidas por el gobierno.

10.8 Análisis ergonómico y antropométrico

La interfaz de comunicación entre el sistema y el ser humano se deberá mediante mensajes de texto usando un lenguaje común (no técnico). En cuanto a la estructura física, las dimensiones y pesos se adaptan al ser humano; específicamente, los mecanismos de apertura y los espacios en las cápsulas permiten una interacción sin complicaciones anatómicas.

10.9 Implementación – Producción

Para la producción del nano-satélite se hará por medio de la empresa Vialbo LTDA, serán ellos los encargados de hacer la estructura del nano-satélite usando los materiales previamente descritos y los planos mostrados en el apartado 6.4.8.3. El costo de producción oscila en los 500.000 pesos moneda local corriente y tomará un tiempo de producción de 5 días hábiles.

El paso a paso de los procesos de construcción son los siguientes:

1. Corte de tubos de PVC de 4, 6, 8 y 10" según medidas especificadas en planos.
2. Corte de acrílico según medidas especificadas en planos.
3. Perforación de acrílico para tornillos.
4. Pegado de caucho espuma a tapas de acrílico.
5. Relleno de espuma de poliuretano de la cápsula externa.

6. Pegado de Rubber black a cápsula interna.
7. Relleno de espuma poliuretano de la cápsula interna.
8. Inserción de cápsula interna dentro de la cápsula externa.
9. Sellamiento de cápsulas por medio de las tapas de acrílico.

10.10 Documentación

10.10.1 Iconografía

A continuación, se muestra una iconografía donde se describe el funcionamiento básico del nano-satélite en cuento a materiales y diseño industrial.

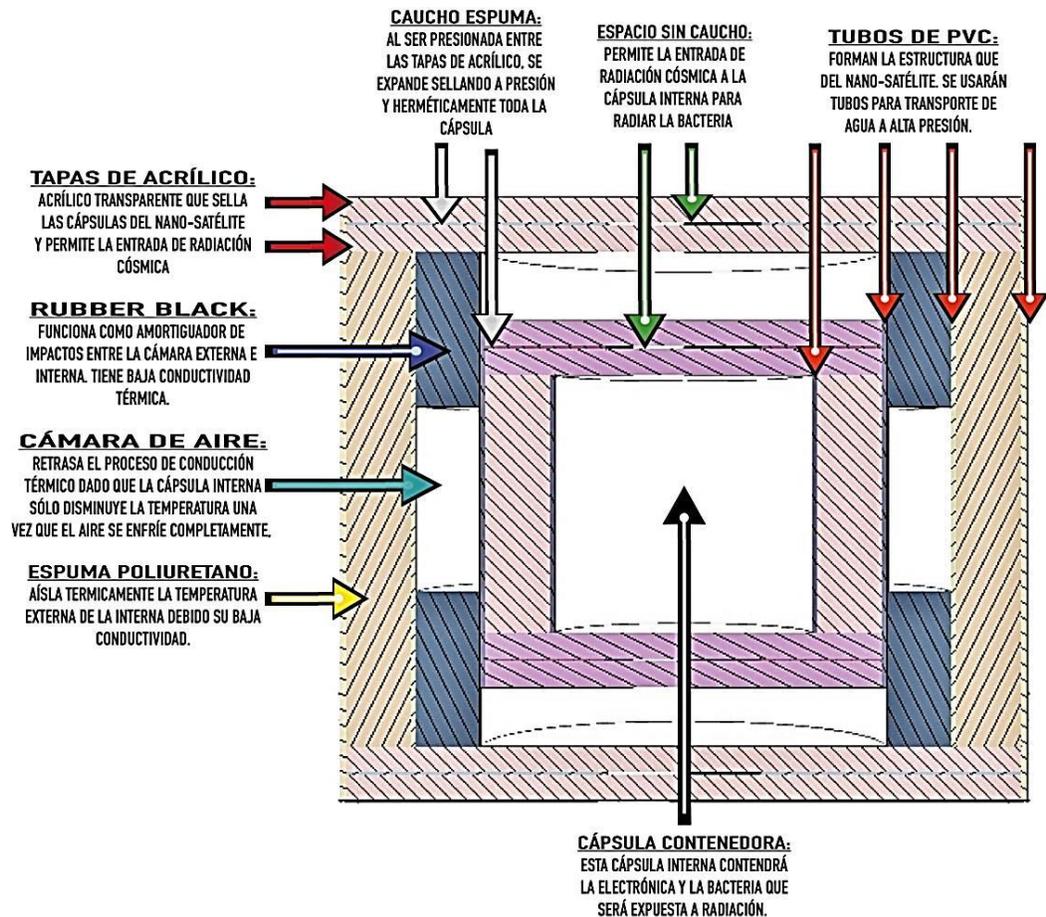


Figura 61. Iconografía de funcionamiento.

10.10.2 Representaciones virtuales

Mediante las siguientes representaciones virtuales se hace una simulación del medio ambiente donde se encontrará el nano-satélite. La simulación consta de imágenes renderizadas del nano-satélite en el medio ambiente detallando en las texturas, materiales y colores.



Figura 62. Simulación de medio ambiente.



Figura 63. Simulación de medio ambiente.



Figura 64. Simulación de medio ambiente.

10.10.3 Planos técnicos

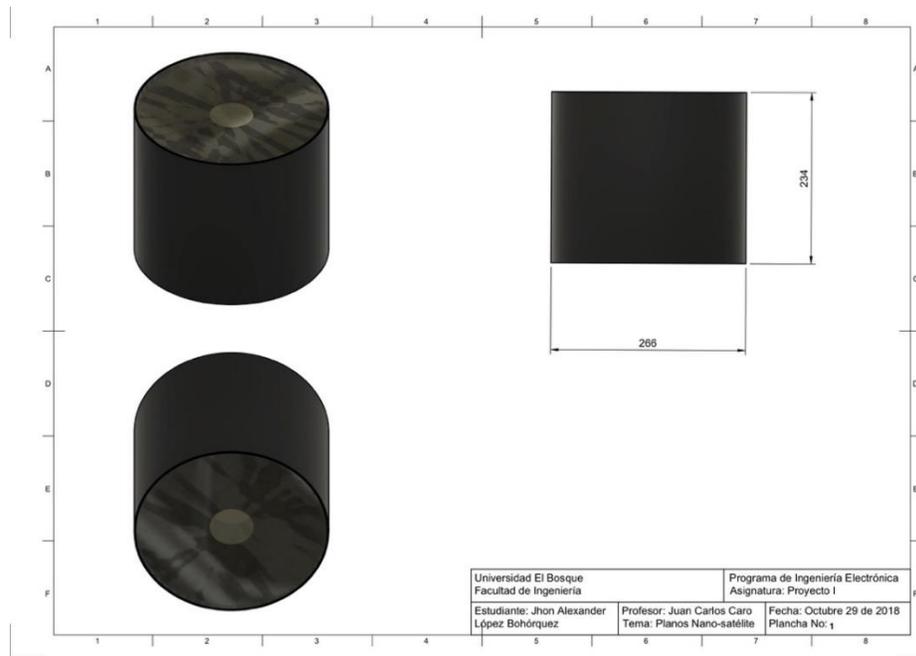


Figura 65. Plancha No. 1.

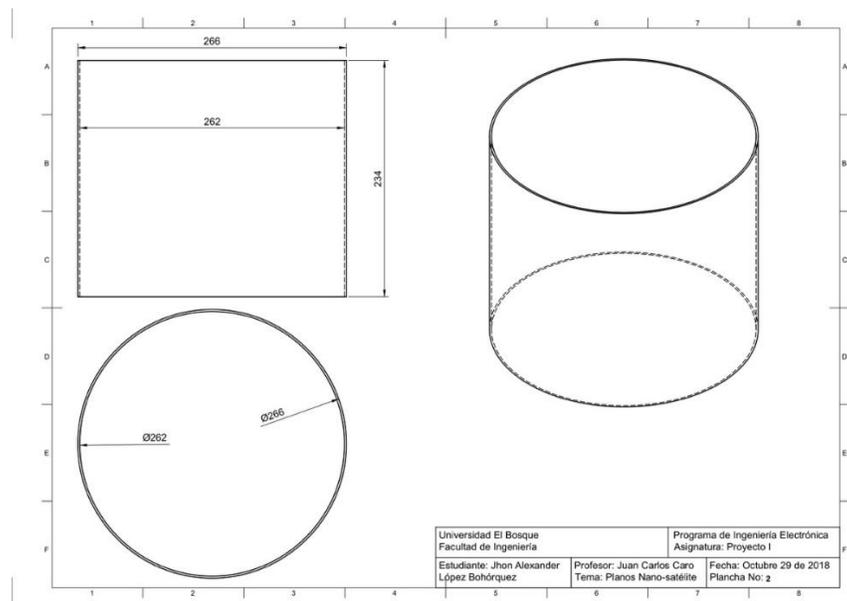


Figura 66. Plancha No. 2.

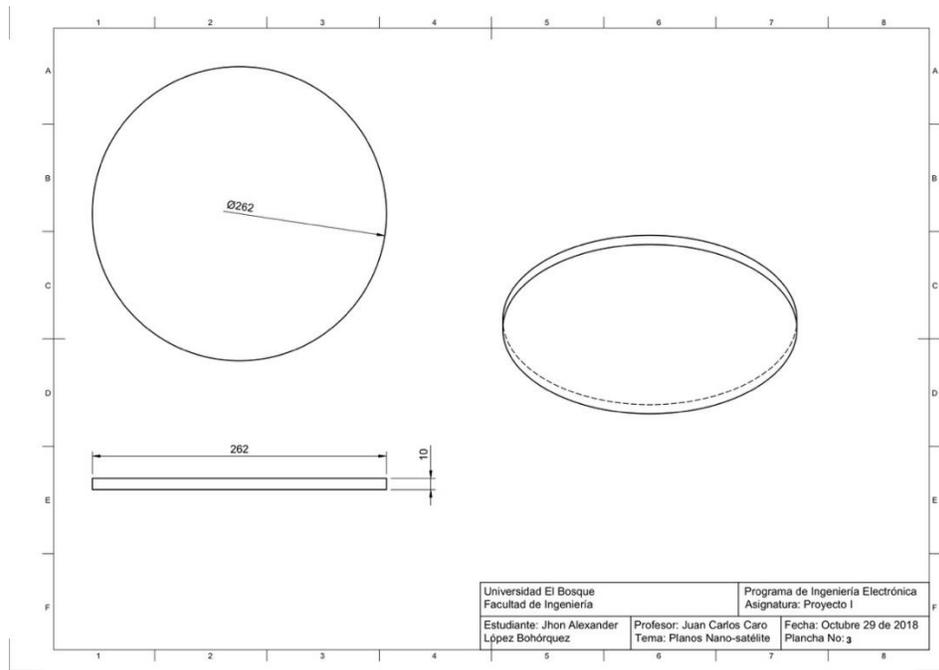


Figura 67. Plancha No. 3.

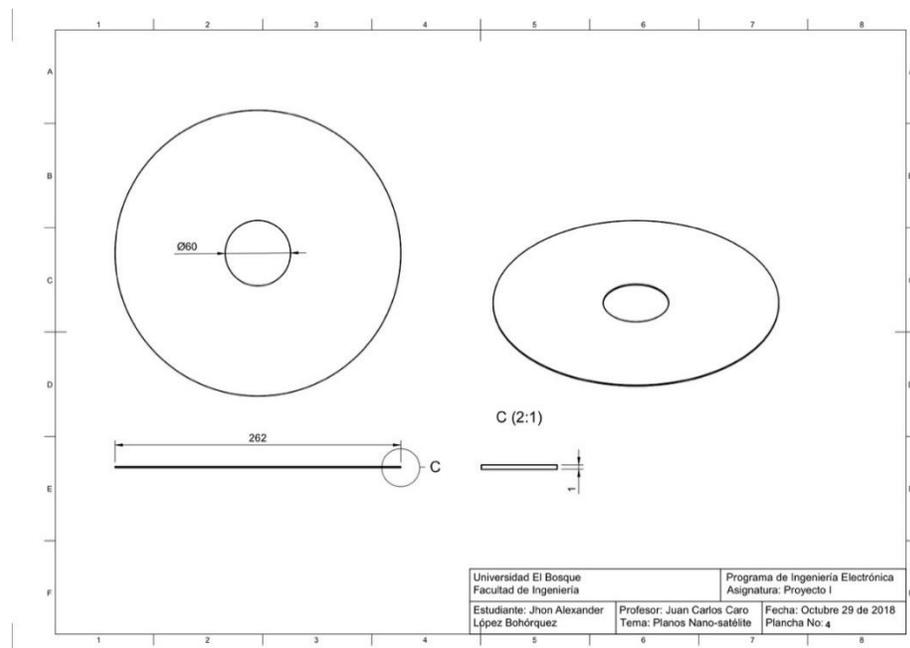


Figura 68. Plancha No. 4.

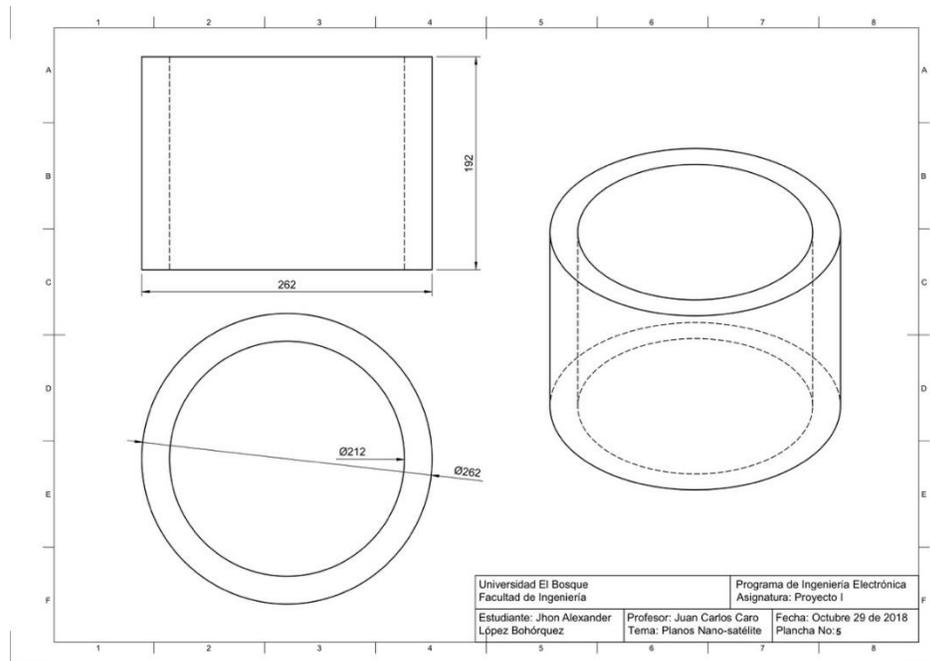


Figura 69. Plancha No. 6.

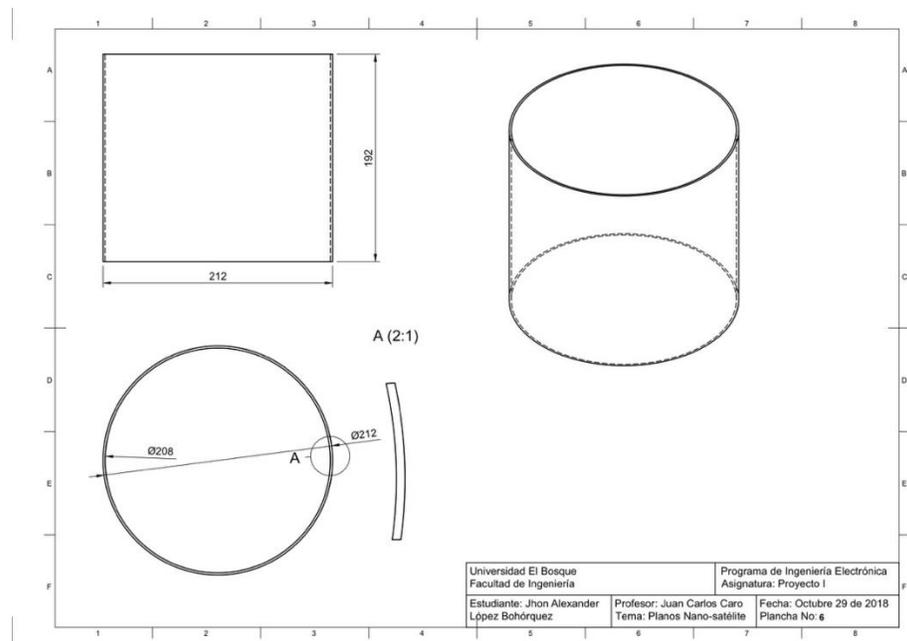


Figura 70. Plancha No. 6.

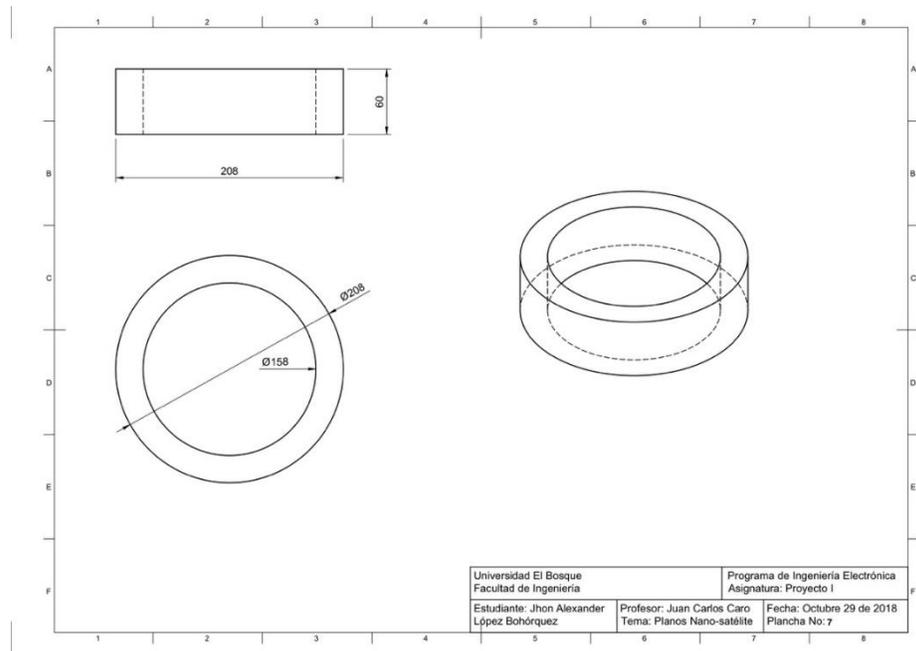


Figura 71. Plancha No. 7.

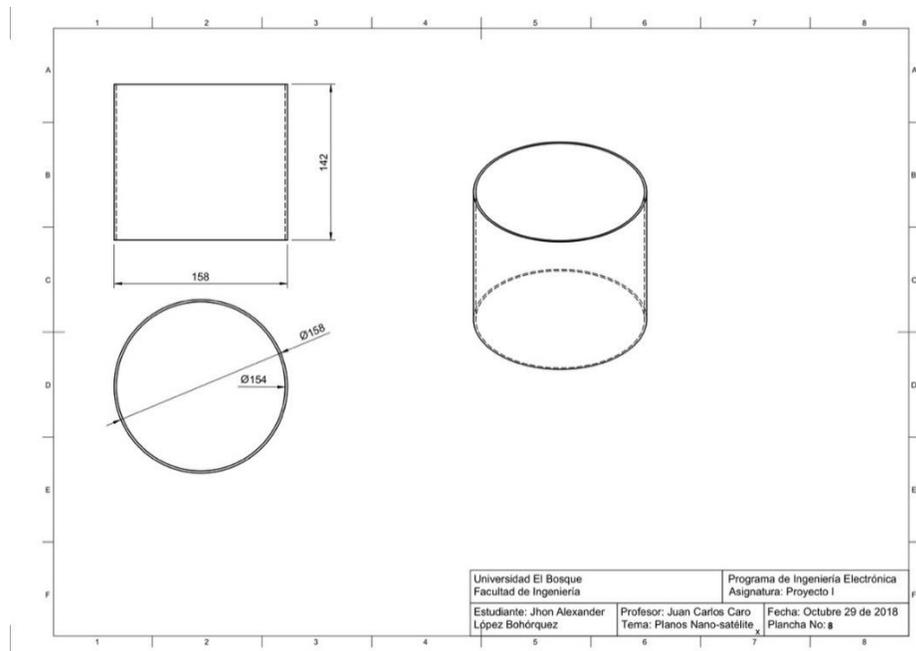


Figura 72. Plancha No. 8.

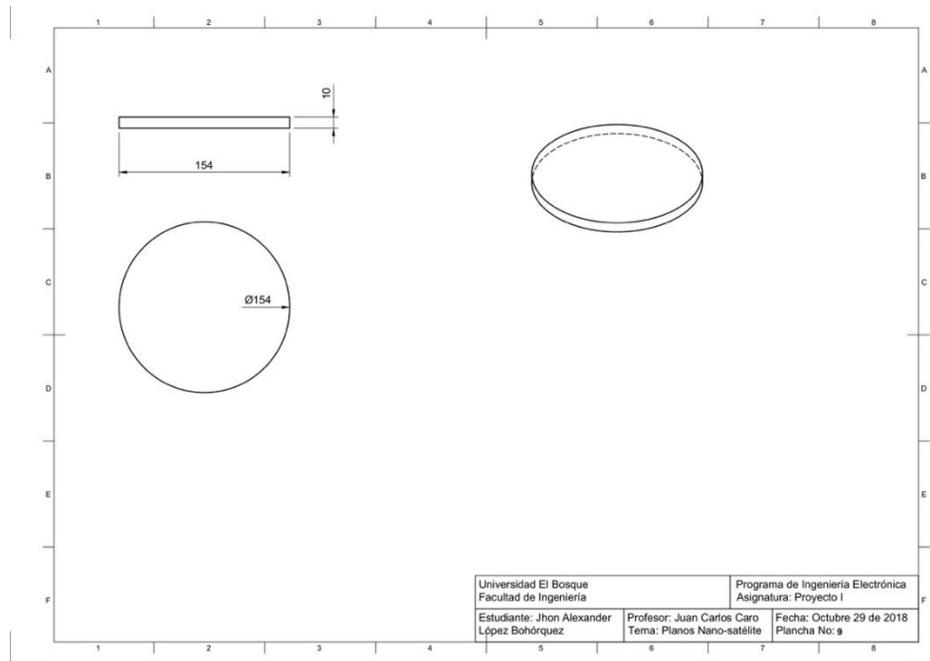


Figura 73. Plancha No. 9.

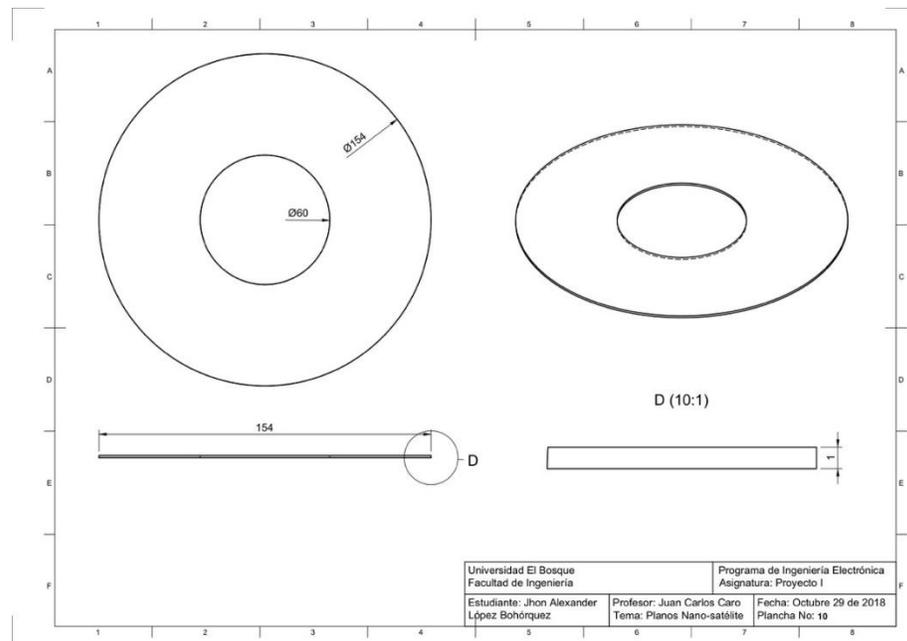


Figura 74. Plancha No. 10.

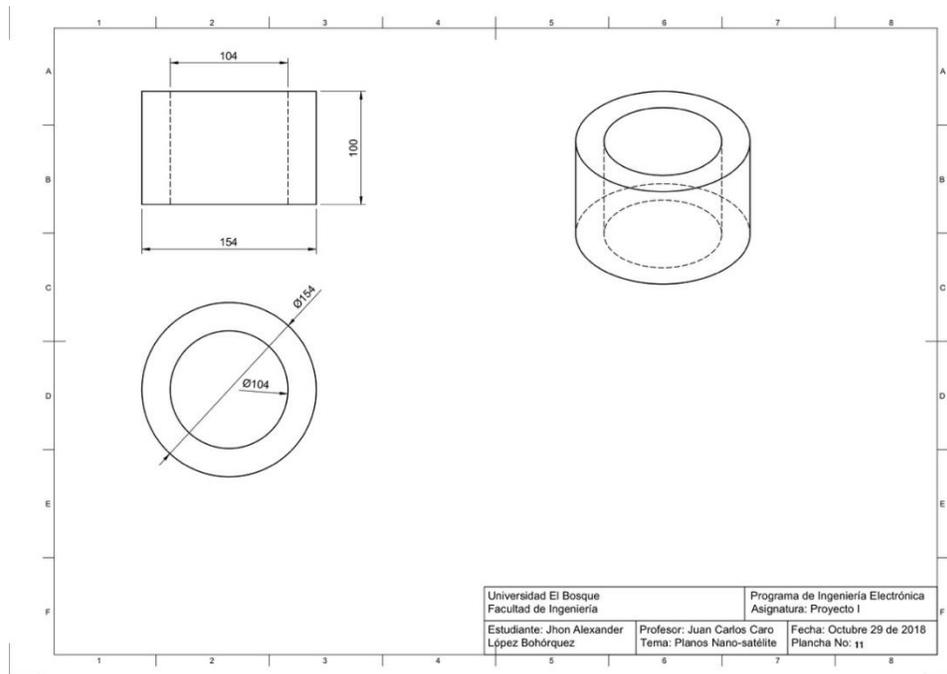


Figura 75. Plancha No. 11.

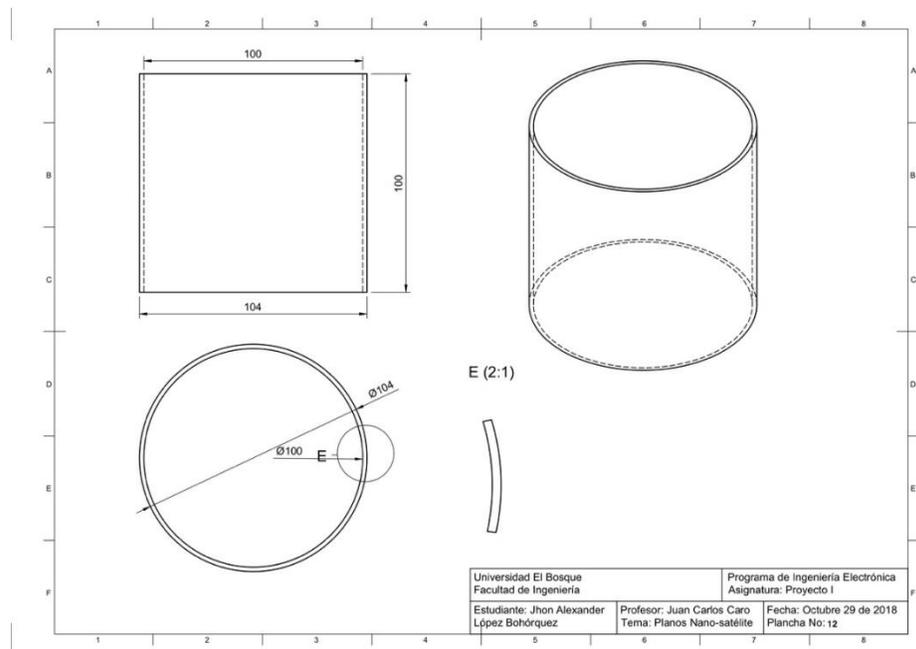


Figura 76. Plancha No. 12.

10.10.4 Modelos tridimensionales

Las siguientes imágenes corresponden a una maqueta comparada con un objeto estándar que permite dimensionar el tamaño real del diseño elegido para la construcción del nano-satélite.



Figura 77. Maqueta, vista frontal.

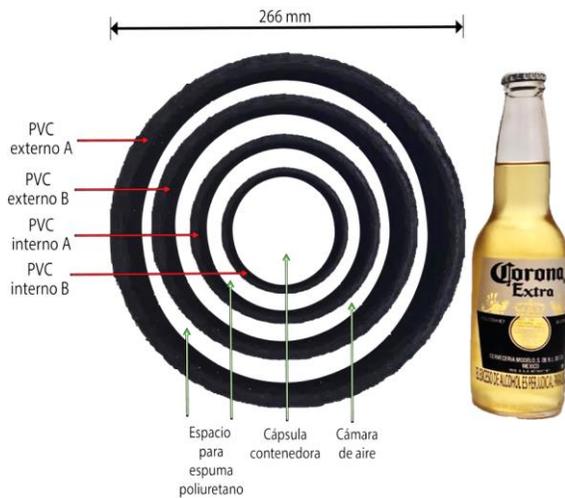


Figura 78. Maqueta, vista superior.

10.11 Implementación de subsistemas

Las imágenes mostradas muestran el desarrollo del diseño planteado. A continuación, se muestra el corte de los tubos en una cortadora sinfín.



Figura 79. Corte de tubo de 4" en cortadora sinfín.



Figura 80. Corte de tubo de 10" en cortadora sinfín.

Una vez cortados los tubos, se procedió a rellenarlos de espuma de poliuretano entre los tubos.



Figura 81. Ajuste de tubos para rellenarlos de espuma.



Figura 82. Tubo con relleno de espuma poliuretano.



Figura 83. Disposición final de los tubos.



Figura 84. Estructura física final - Vista superior.



Figura 85. Estructura física final - Vista frontal.



Figura 86. Estructura final - Vista isométrica.

11 IMPLEMENTACIÓN

11.1.1. Subsistema de ubicación, navegación y comunicación:

La función de este subsistema es recibir una señal GPS mediante, procesarla y comunicarla mediante un mensaje de texto a un número de teléfono celular predefinido. Para ello, se realizó el siguiente montaje:

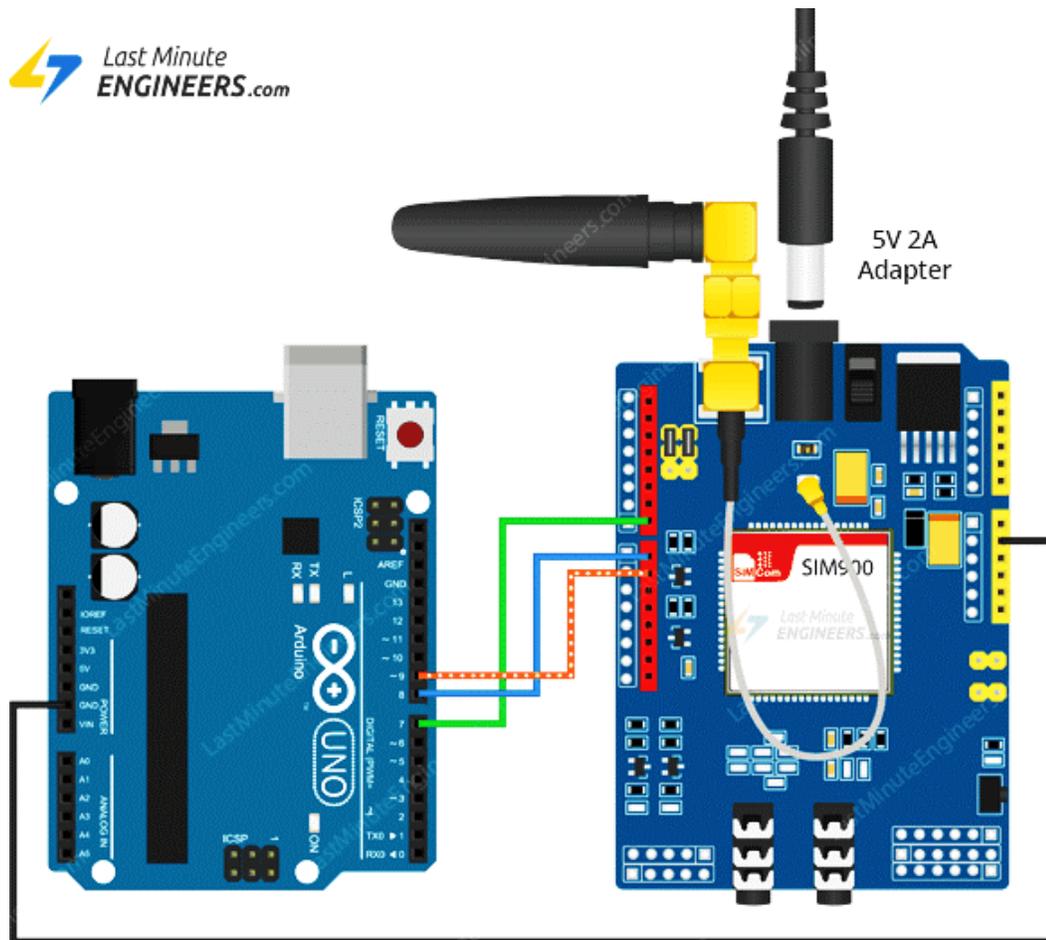


Figura 87. Esquemático y montaje del módulo SIM808 con Arduino UNO [21].

A continuación, se muestra el diagrama de flujo que se codificó para programar el módulo en el IDE de Arduino:

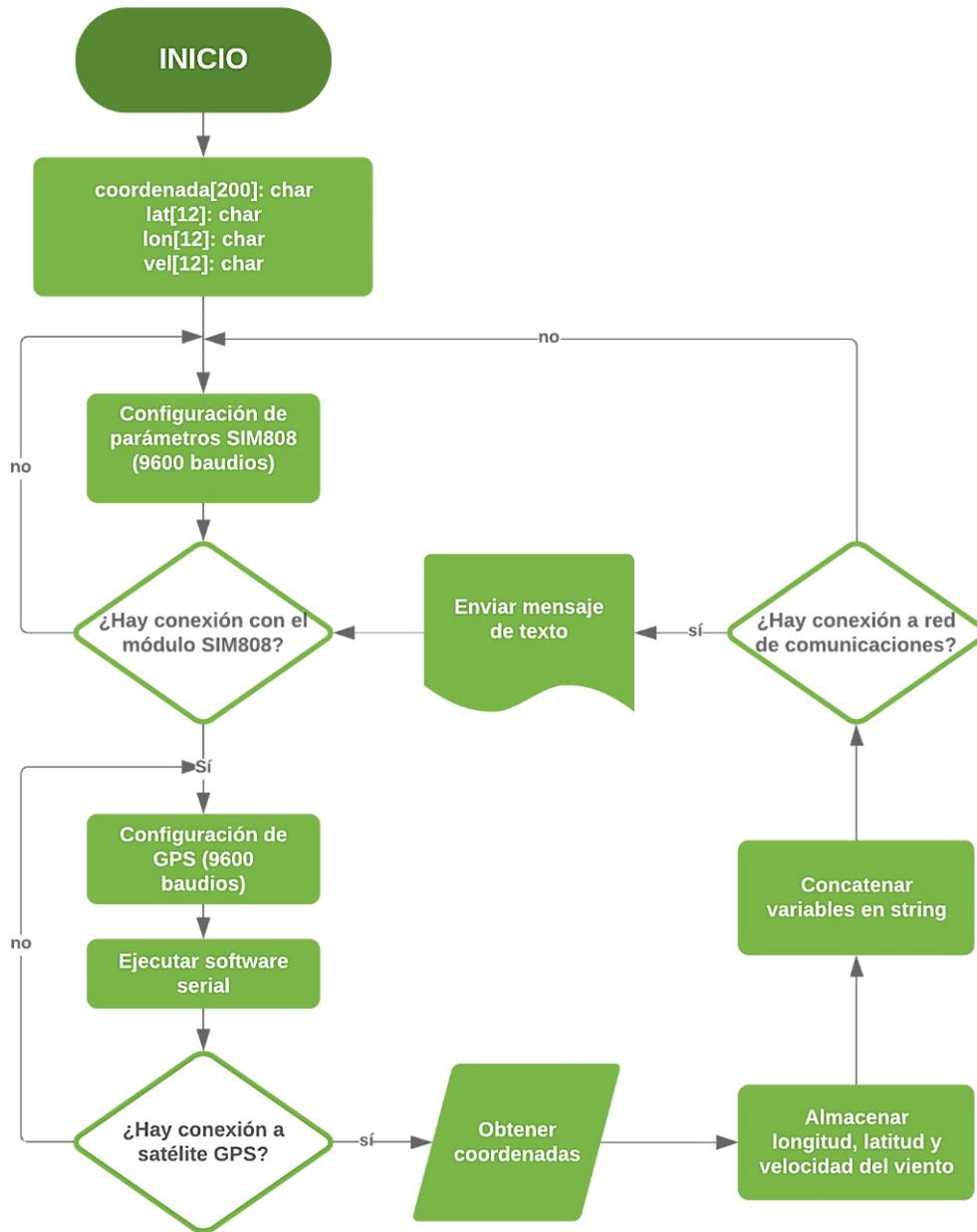


Figura 88. Diagrama de flujo para programación del subsistema de ubicación y comunicación.

Como adicional, se agregó un enlace de internet al mensaje de texto (señal de salida) que abre Google Maps y muestra la ubicación exacta del GPS en el mapa de

Google Maps. Esto se realizó usando la API gratuita ofrecida por Google que se configura mediante la inyección de parámetros de tipo string en el contexto de la URL base que abre la página de Google Maps.

11.1.2. Subsistema de monitoreo interno

El subsistema de monitoreo interno tiene la función de sensor variables las atmosféricas tales como: temperatura, humedad y presión y concatenar la respuesta en una variable de tipo STRING para ser comunicada mediante una señal eléctrica usando el protocolo I²C. Como primera parte, se realizó el montaje del sensor de temperatura y presión. El montaje del sensor MS5611 y DHT22 se muestran a continuación:

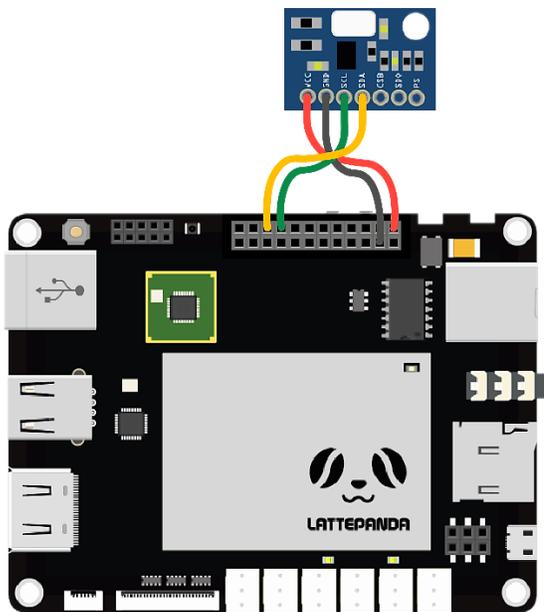


Figura 89. Esquemático de conexión de Arduino Leonardo y sensor MS5611.

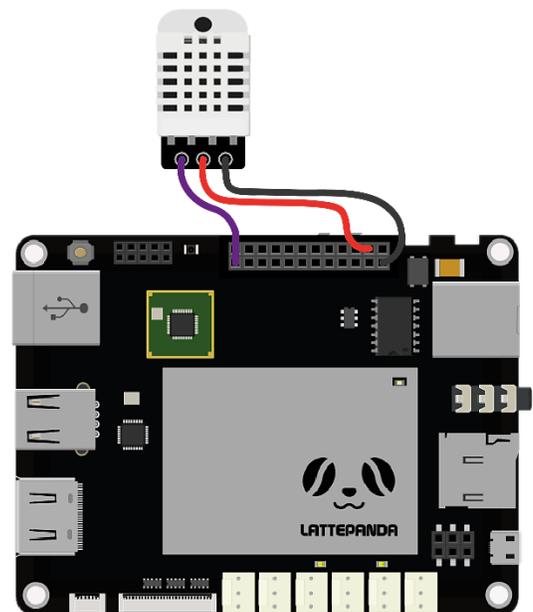


Figura 90. Esquemático de conexión del Arduino Leonardo y el sensor DHT22.

El código usado para la programación del sensor MS5611 se basa en el uso de una librería desarrollada en C# que enlaza una conexión serial usando el protocolo I²C con el sensor que entrega la temperatura y presión en °C y mBar respectivamente. El diagrama de flujo usado para codificar la programación del sensor en Arduino IDE es el siguiente:

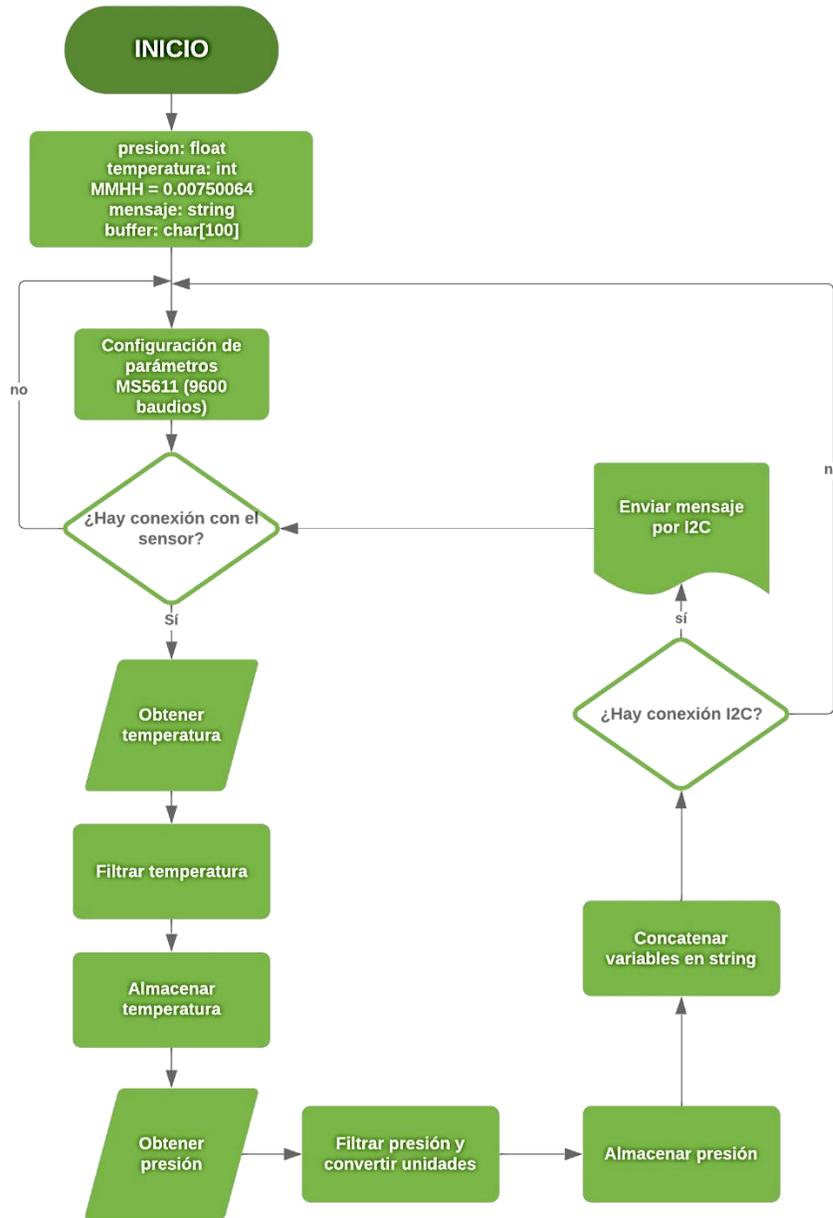


Figura 91. Diagrama de flujo para la programación del sensor DHT22.

Para el sensado de la humedad interna se usó el sensor DHT22. Como primera instancia se conectó el sensor al Arduino Leonardo como se muestra en el esquemático

de la Figura 90. El código del sensor DHT22 desarrollado en Arduino usando lenguaje C se codificó en base al siguiente diagrama de flujo:

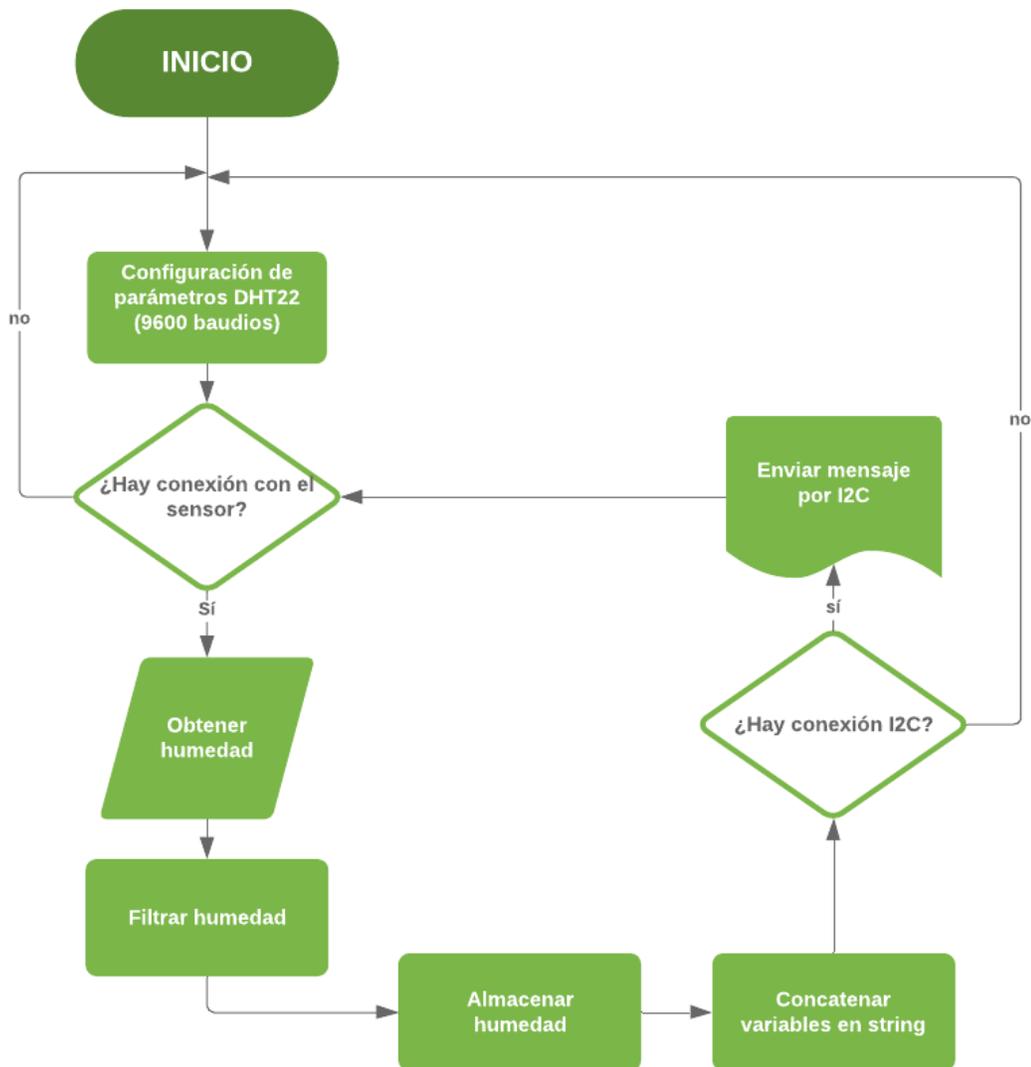


Figura 92. Diagrama de flujo para programación del sensor DHT22.

La siguiente imagen muestra el montaje final entre el Arduino Leonardo y los dos sensores:

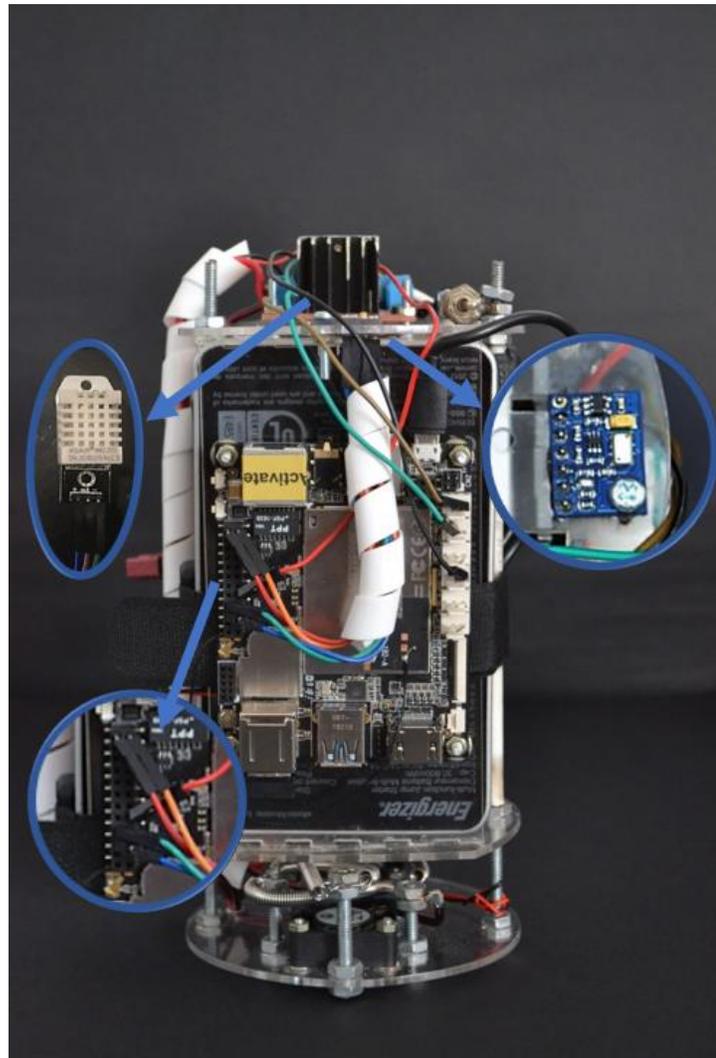


Figura 93. Conexión entre el sensor MS5611 y el Arduino Leonardo.

11.1.3. Unidad de procesamiento central

La unidad de procesamiento central se encarga del monitoreo y almacenamiento de todos los datos sensados por el nano-satélite. Tiene como sistema operativo Windows 10 en arquitectura de x64bits, una memoria interna de 32 Gb donde se almacenó el sistema operativo. Adicionalmente, se agregó una memoria externa de 16 Gb clase 10 donde se almacenan los datos en un archivo de Excel (.xlsx).

Como primera parte se procedió a montar la Lattepanda en la estructura de la electrónica. Una vez hecho, se programó la lectura de los datos usando el protocolo I²C, luego se procesaron los datos lógicamente creando un patrón de configuración de trama; finalmente, se programó la escritura de datos en el archivo de Excel ubicado en la memoria externa. A continuación, se muestra diagrama de flujo con el cual se programó el LattePanda en lenguaje C# usando Visual Studio 2017:

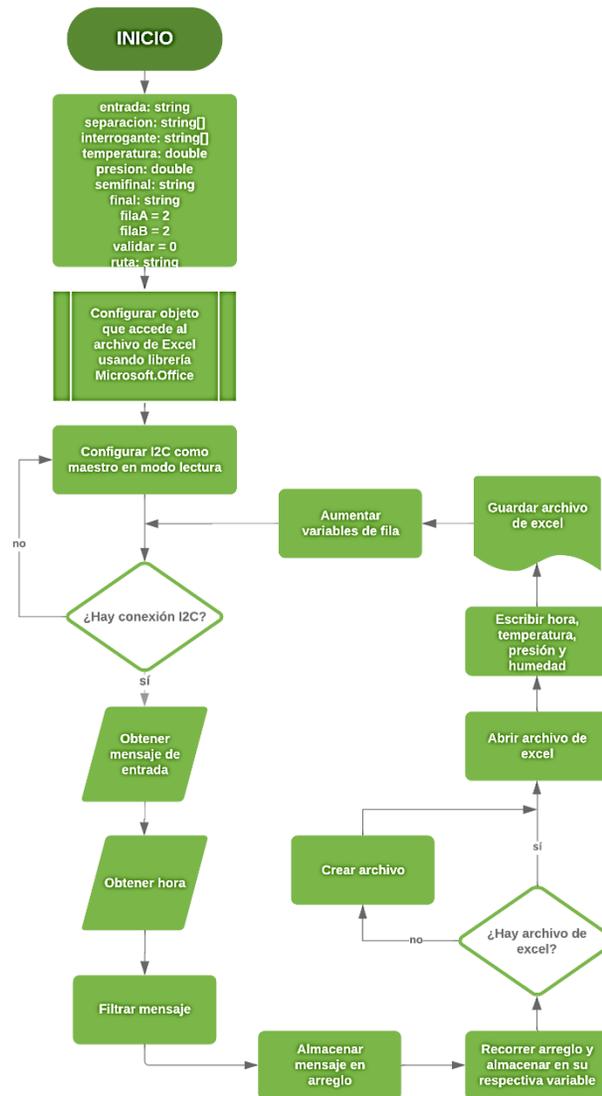


Figura 94. Diagrama de flujo para la programación de la CPU.

La imagen mostrada a continuación muestra la LattePanda situada en la estructura física que contiene la electrónica:

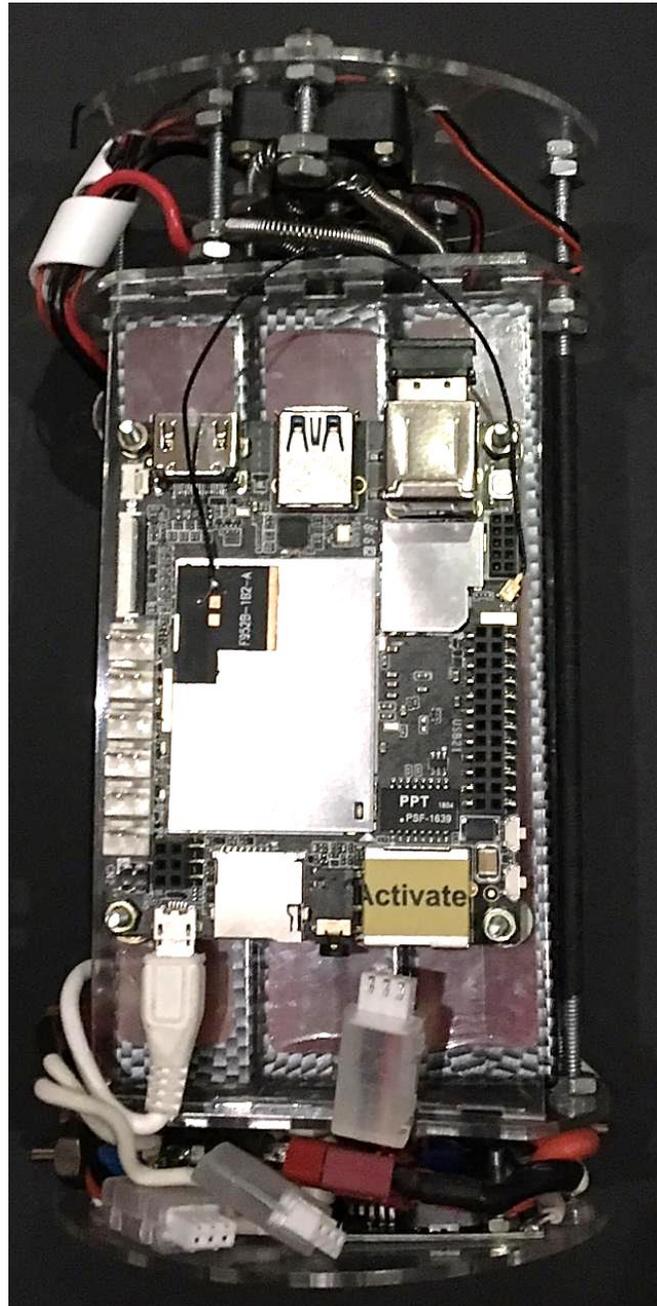


Figura 95. Ajuste de LattePanda en estructura contenedora de electrónica.

11.1.4. Subsistema de alimentación de componentes:

Para este subsistema se usaron tres baterías de alimentación. Dos de las baterías usadas son de tipo Lipo de 5000 mAh a 7.4 voltios y se conectaron en serie formando una sola batería de 14,8 voltios. La tercera batería usada es una batería regulada a 5 voltios y 2,4 amperios de salida con conexión USB para alimentar la CPU (LattePanda). A continuación, se muestra una imagen que muestra las tres baterías ubicadas en la cápsula contenedora de la electrónica y sus respectivas salidas:

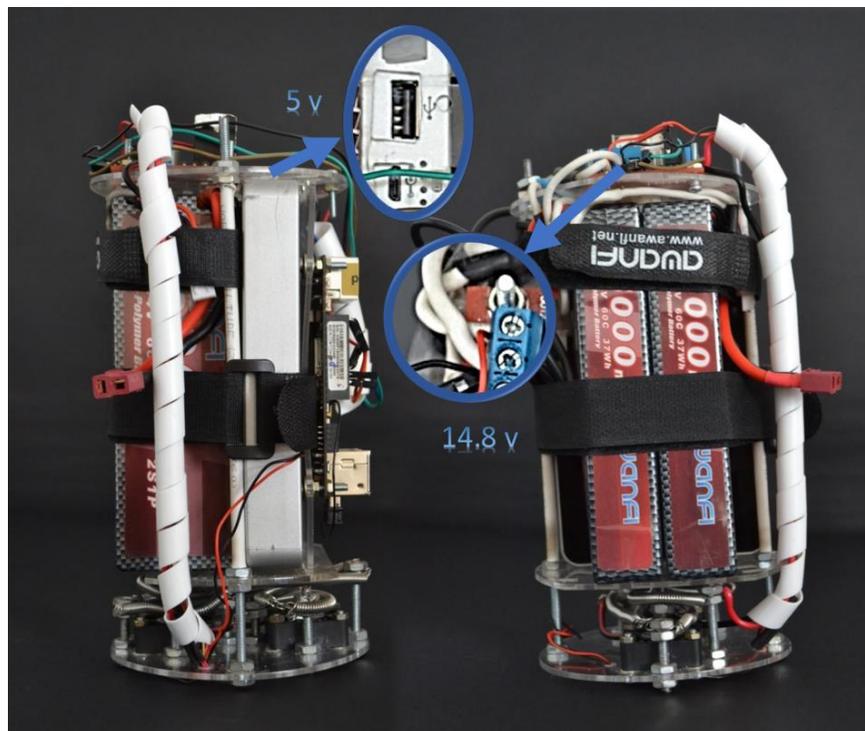


Figura 96. Implementación de baterías en la estructura física contenedora de la electrónica denotando las respectivas salidas de voltaje.

11.1.5. Subsistema de control de temperatura:

El subsistema de control de temperatura se implementó usando una resistencia disipadora de potencia en forma de calor, un puente H como driver de potencia controlado mediante PWM, un Arduino Leonardo y dos ventiladores que funcionan como aspersores de calor. A continuación, se muestra un esquemático del montaje realizado:

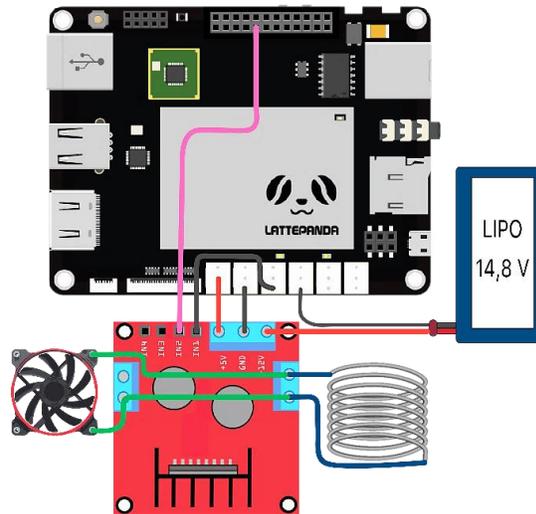


Figura 97. Esquemático de montaje general del Puente H a un Arduino Leonardo.

En la imagen anterior se indica la salida del puente H, la cual va conectada a la resistencia disipadora de energía en forma de calor. El voltaje en la salida tiene un máximo de 14,8 voltios y un mínimo de 0 voltios. El valor del voltaje varía según la señal PWM de 970 Hz, dada por el sistema de control de temperatura.

Una vez conectado el puente H, se procedió a montarlo en la estructura física y conectarlo a las fuentes de alimentación y potencia. Luego de esto se hizo la caracterización de la planta y mediante el método de Ziegler-Nichols con el cual se obtuvo la siguiente gráfica:

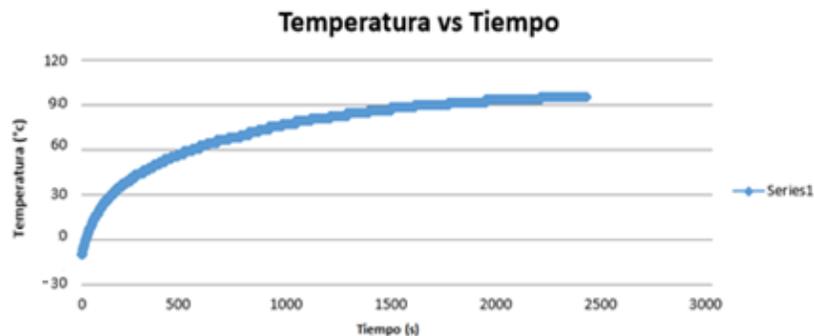


Figura 98. Gráfica de caracterización de la planta.

De allí se calcularon las constantes $k_p=26$, $k_i=11$ y $k_d=62$. Cabe resaltar que fueron redondeadas y no son las dadas por el método de Ziegler-Nichols debido que este método sólo ofrece una aproximación. Finalmente se codificó el sistema de control de temperatura en lazo cerrado y se cargó al Arduino Leonardo. A continuación, se muestra el diagrama de flujo el cual se generó el código fuente usado:

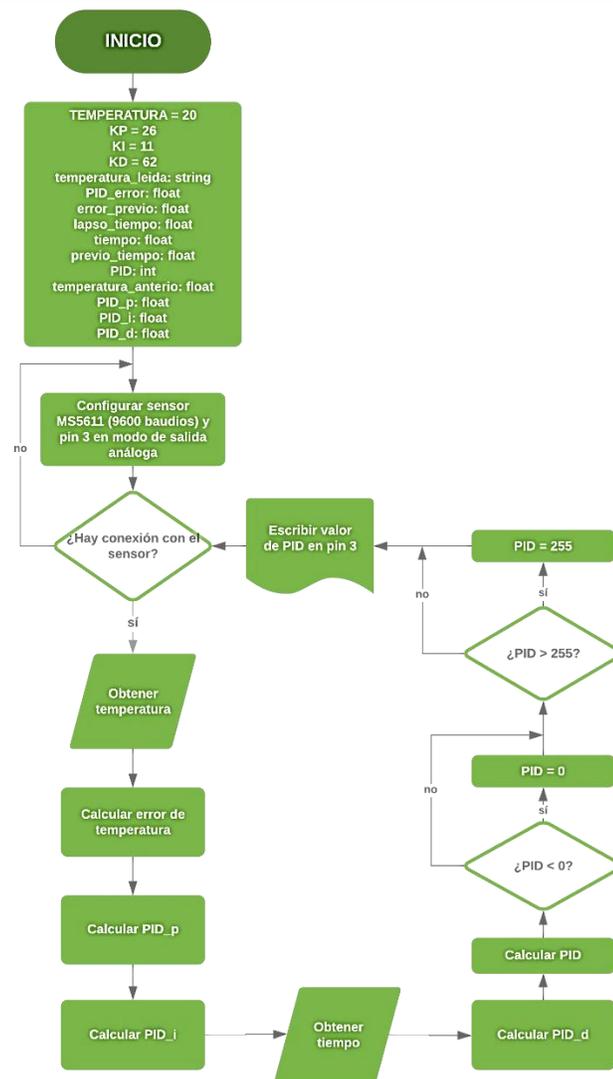


Figura 99. Diagrama de flujo para la programación de PID de temperatura.

El diagrama de flujo del sistema de control de temperatura implementado es el siguiente:

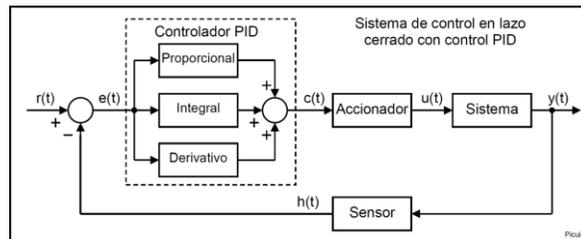


Figura 100. Diagrama de sistema de control PID [22].

El montaje físico de la resistencia disipadora de energía en forma de calor junto con la ubicación de los ventiladores se muestra continuación:

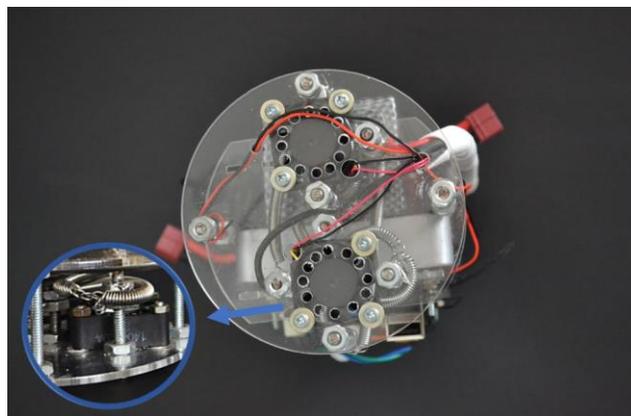


Figura 101. Ubicación de resistencia generadora de calor y dispersor de aire.

11.1.6. Subsistema de monitoreo interno (registro de imagen)

La primera parte que se desarrolló fue adaptar la cámara para que use la CPU (LattePanda) como fuente de alimentación. A continuación, se muestra el hardware:



Figura 102. Cámara interna del nano-satélite.

Una vez hecho esto, se procedió a realizar pruebas de vídeo energizando la CPU para que supla la cámara. Una de las fotografías capturada por la cámara es las siguiente:



Figura 103. Fotografía capturada usando cámara del nano-satélite.

11.1 Integración del sistema

La integración del sistema se resume en la implementación de los subsistemas los cuales se encuentran ubicados en la cápsula contenedora de la electrónica. Todos ellos se encuentran suplidos por el subsistema de alimentación y controlados por Arduino Leonardo. Por otra parte, la función que cumple la CPU (LattePanda) es recopilar toda la información sensada y almacenarla en un archivo de Excel (.xlsx). Para ello se desarrolló un algoritmo en C# usando Visual Studio 2017. El algoritmo se encarga de tomar una trama, dividirla y almacenarla en una columna de Excel, según corresponda. Las tramas de datos se leen cada segundo aproximadamente y tienen el siguiente formato: "t20.20-p560.0-h56". La función principal del algoritmo es verificar que la trama cumpla con el formato, eliminar caracteres especiales diferentes al guion, cambiar los puntos por comas, verificar que cada entero tenga un único carácter especial (" , ") y de acuerdo a las letras iniciales (t de temperatura, p de presión y h de humedad), abrir un archivo de Excel, almacenar los datos sensados en sus respectivas

columnas (temperatura, humedad, presión y hora) y guardar el archivo. El archivo se guarda por trama para evitar que se pierda información en caso de fallo.

El código de programación del sistema está compuesto por subcódigos de programación correspondientes a cada subsistema. El orquestador de los subsistemas y código principal es el incorporado en la unidad de procesamiento central (LattePanda) mostrado anteriormente en la implementación de subsistemas mediante el diagrama de flujo.

Por otra parte, la integración del sistema incluye la incorporación de la electrónica dentro de la cápsula interna. Para ello, se diseñó una estructura que sostenga y de soporte a cada elemento electrónico usado. A continuación, se muestran los planos de dicha estructura.

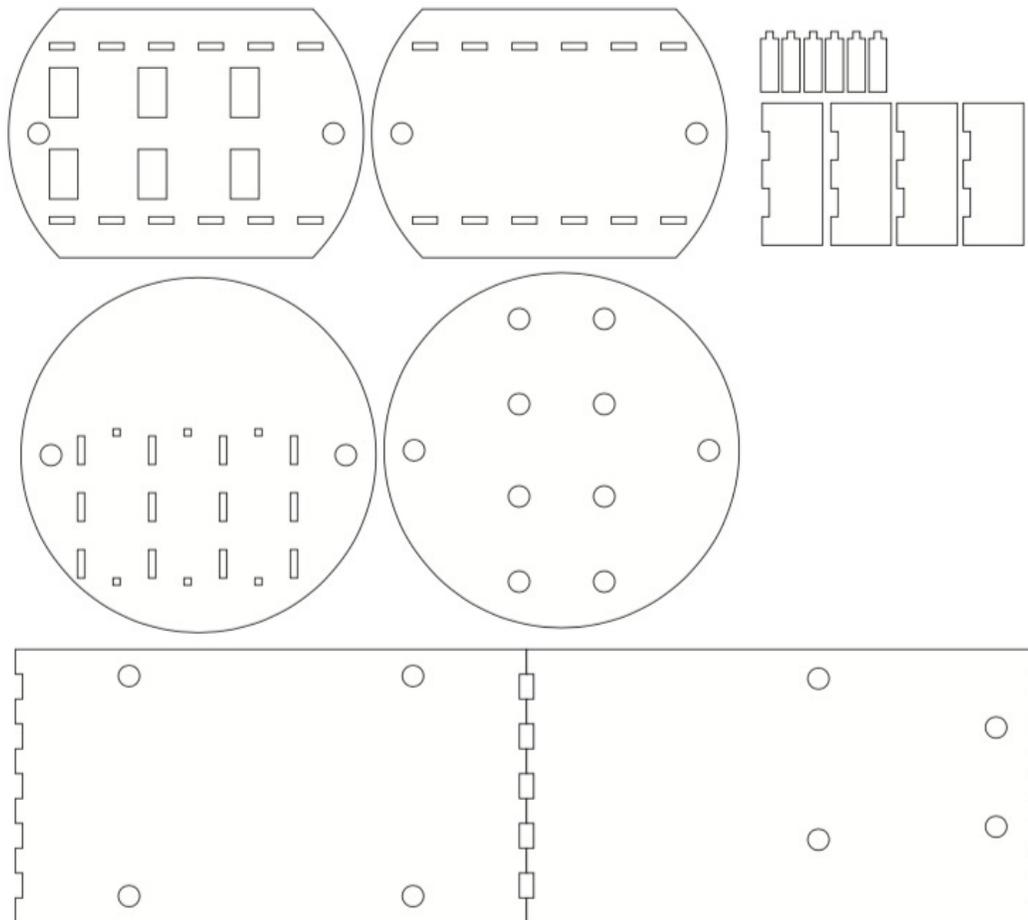


Figura 104. Planos para corte que forman la estructura contenedora y de soporte de la electrónica.

La composición final de la estructura junto con los elementos electrónico se muestra mediante las siguientes imágenes:



Figura 105. Vista frontal de los componentes electrónicos incorporados en la estructura del nano-satélite.

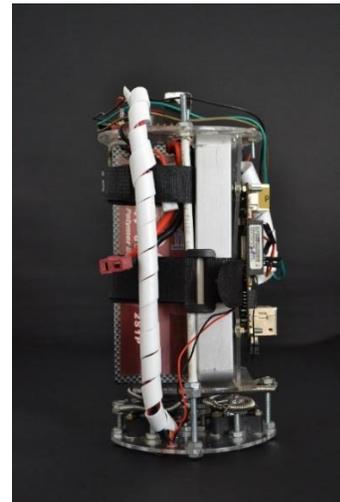


Figura 106. Vista lateral de los componentes electrónicos incorporados en la estructura física.



Figura 107. Vista superior de los componentes electrónicos incorporados en la estructura del nano-satélite.

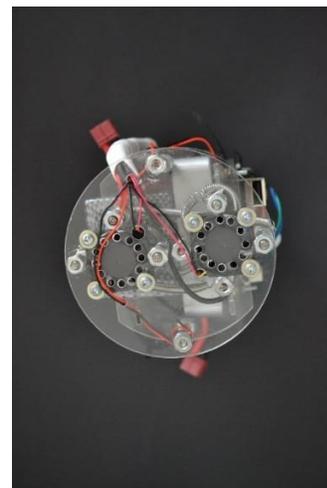


Figura 108. Vista inferior de los componentes electrónicos incorporados en la estructura del nano-satélite.

12 PRUEBAS

12.1 Pruebas de componentes

12.1.1 Sensor de temperatura MS5611

Tabla 42. Prueba del sensor de temperatura MS5611.

| REQUERIMIENTOS | VALOR TEÓRICO | VALOR SENSADO | VALOR SIMULADO | ERROR PORCENTUAL | APROBACIÓN |
|---|---------------|---------------|----------------|------------------|-----------------|
| Temperatura del medio ambiente en un rango de. -10°C a 35°C y comunicar mediante I ² C | -10°C | -10.81 °C | NA | 8.1% | APROBADO |
| | -5°C | -5.3 °C | NA | 6.0% | |
| | 0°C | 0.3 °C | NA | - | |
| | 5°C | 5.43 °C | NA | 8.6% | |
| | 10°C | 11.02 °C | NA | 10.2% | |
| | 15°C | 16.87 °C | NA | 4.2% | |
| | 20°C | 19.28 °C | NA | 2.6% | |
| | 25°C | 27.56 °C | NA | 10.24% | |
| | 30°C | 31.52 °C | NA | 5.06% | |
| | 35°C | 37.94 | NA | 8.4% | |

12.1.2 Resistencia disipadora de energía en forma de calor

Tabla 43. Tabla de resultados de resistencia generadora de calor.

| REQUERIMIENTO | VALOR TEÓRICO | VALOR SENSADO | VALOR SIMULADO | ERROR PORCENTUAL | APROBACIÓN |
|----------------------|---------------|---------------|----------------|------------------|-----------------|
| Delta de temperatura | 20°C | 22°C | NA | 10% | APROBADO |

12.1.3 Sensor de humedad DHT22

Tabla 44. Prueba del sensor de humedad relativa.

| REQUERIMIENTO | VALOR TEÓRICO | VALOR SENSADO | VALOR SIMULADO | ERROR PORCENTUAL | APROBACIÓN |
|----------------------------------|---------------|---------------|----------------|------------------|-----------------|
| Humedad relativa entre 80% y 95% | 80% | 77% | NA | 3,75% | APROBADO |
| | 85% | 82% | NA | 0,88% | |
| | 90% | 88% | NA | 2,22% | |
| | 95% | 92% | NA | 3,15% | |

12.1.4 LattePanda

Tabla 45. Prueba del LattePanda.

| REQUERIMIENTO | VALOR TEÓRICO | VALOR SENSADO | VALOR SIMULADO | ERROR PORCENTUAL | APROBACIÓN |
|---|---------------|---------------|----------------|------------------|-----------------|
| Errores en trama al comunicar arduinos y LattePanda | 0 | 0 | NA | 0% | APROBADO |
| | 0 | 0 | NA | 0% | |
| | 0 | 0 | NA | 0% | |
| | 0 | 0 | NA | 0% | |

12.2 Pruebas de subsistemas

12.2.1 Subsistema de control de temperatura

Tabla 46. Prueba de control de temperatura.

| REQUERIMIENTO | VALOR TEÓRICO | VALOR SENSADO | VALOR SIMULADO | ERROR PORCENTUAL | APROBACIÓN |
|---------------------|---------------|---------------|----------------|------------------|-----------------|
| Temperatura interna | 20°C | 21°C | NA | 5% | APROBADO |

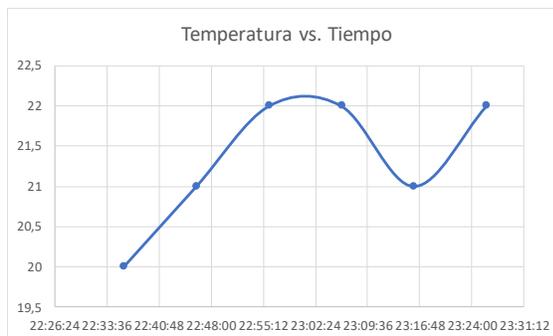


Figura 109. Gráfica de temperatura contra tiempo.

Tabla 47. Datos obtenidos al sensor temperatura contra tiempo.

| HORA | TEMP. | HORA | PRESIÓN |
|----------|-------|----------|---------|
| 22:36:00 | 20 | 22:36:00 | 564,08 |
| 22:46:00 | 21 | 22:46:00 | 564,07 |
| 22:56:00 | 22 | 22:56:00 | 564,08 |
| 23:06:00 | 22 | 23:06:00 | 564,08 |
| 23:16:00 | 21 | 23:16:00 | 564,08 |
| 23:26:00 | 22 | 23:26:00 | 564,08 |

12.2.2 Subsistema de monitoreo interno

Tabla 48. Prueba se monitoreo interno.

| REQUERIMIENTO | VALOR TEÓRICO | VALOR SENSADO | VALOR SIMULADO | ERROR PORCENTUAL | APROBACIÓN |
|--------------------|---------------|---------------|----------------|------------------|------------|
| Sensor temperatura | -10°C | -10.81 °C | NA | 8.1% | APROBADO |
| | -5°C | -5.3 °C | NA | 6.0% | |
| Sensor humedad | 80% | 77% | NA | 3,75% | APROBADO |
| | 85% | 82% | NA | 0,88% | |
| Sensor presión | 560,00 | 564,08 | NA | 0,72% | APROBADO |
| | 560,00 | 564,07 | NA | 0,72% | |

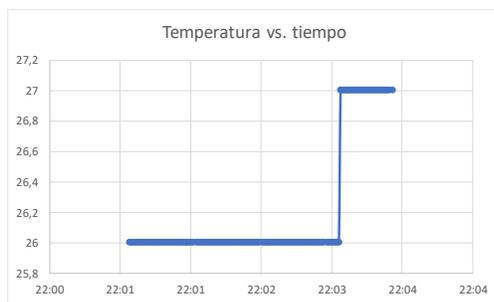


Figura 110. Temperatura medida contra tiempo.

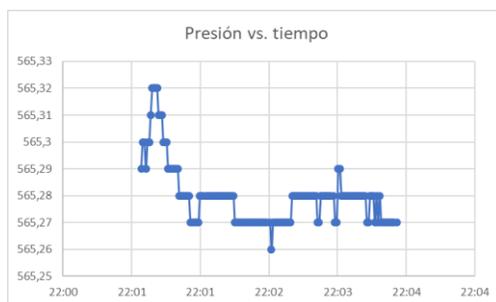


Figura 111. Presión medida contra tiempo.

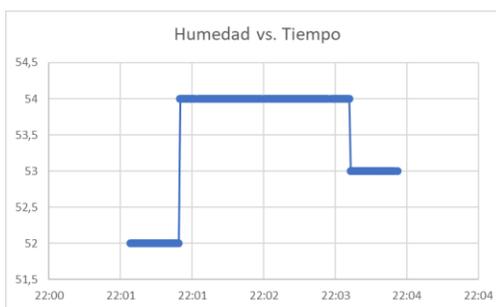


Figura 112. Humedad sensada contra tiempo.

12.2.3 Subsistema de comunicación

Tabla 49. prueba de enlace a red comercial.

| REQUERIMIENTO | VALOR TEÓRICO | VALOR SENSADO | VALOR SIMULADO | ERROR PORCENTUAL | APROBACIÓN |
|------------------|---------------|---------------|----------------|------------------|-----------------|
| Errores en trama | 0 | 0 | NA | 0 | APROBADO |

12.3 Pruebas de integración

12.3.1 Integración de la CPU con subsistema de sensado de variables

Durante la implementación de este subsistema se debía configurar el protocolo I²C por el puerto serial de la CPU "COM5" a una velocidad de 9600 baudios por segundo. La respuesta de a CPU a la comunicación podría ser de dos tipos, para el caso correcto:

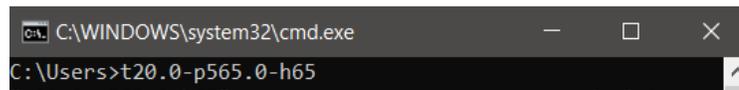


Figura 113. Comunicación correcta del protocolo I2C.

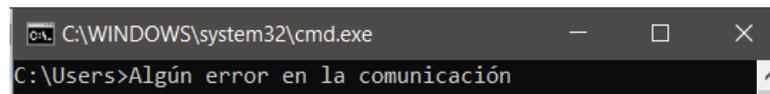


Figura 114. Comunicación incorrecta del protocolo I2C.

Debido a que el Arduino Leonardo está conectado directamente a la placa madre del PCB de la CPU, no se podía verificar por osciloscopio la respuesta de la señal I²C así que el único modo era configurar una trama de datos y enviarlo directamente a la CPU por un puerto COM. La prueba arrojó que un resultado correcto puesto que los datos emitidos por el Arduino se leyeron correctamente en la LattePanda como se muestra a continuación:



Figura 115. Mensaje enviado por el Arduino.

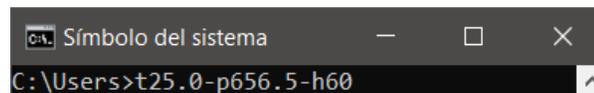


Figura 116. Mensaje recibido por la LattePanda.

De las anteriores se puede evidenciar que la trama enviada desde el Arduino Leonardo fue recibida correctamente por la LattePanda.

13 AJUSTES

Como primera parte, se realizaron ajustes al subsistema de alimentación debido a que por fallas de fabricante en una de las baterías tipo Lipo no entregaba la corriente teórica. En principio se tenían dos baterías Lipo en paralelo reguladas a 5 voltios con dos salidas de tipo USB. A continuación, se muestra el esquemático y PCB diseñado:

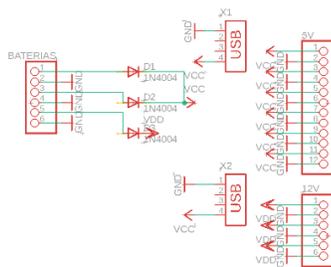


Figura 117. Esquemático del circuito de alimentación a subsistemas.

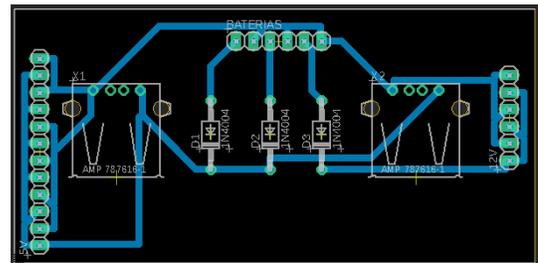


Figura 118. PCB del circuito de repartición de alimentación a subsistemas.

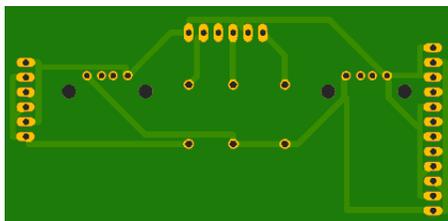


Figura 119. PCB capa inferior de circuito de alimentación de subsistemas.

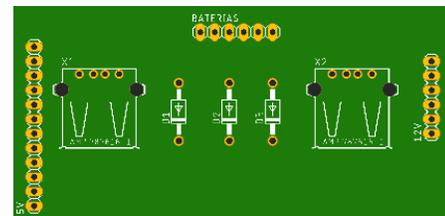


Figura 120. PCB capa superior de circuito de alimentación a subsistemas.

Para corregir esta falla, se reemplazó por una batería de ion de litio regulada a 5 voltios a 2,4 amperios de marca Energizer que alimentaría el Arduino Leonardo y el LattePanda. La batería cuenta con una potencia de salida de 30.000 mWh. Así se consiguió darle un tiempo de autonomía de aproximadamente 4 horas. En cuanto al circuito, se suprimió el regulador y el Arduino y LattePanda se conectaron directamente a la batería.

Por otra parte, debido al cambio de batería, la altura de la cápsula contenedora de la electrónica cambió afectando así la altura de todo el sistema. El aumento por capsula fue de 5

cm en la cápsula interior, concatenado a un aumento de la cápsula exterior, generando así, una altura máxima de 30 cm.

Adicionalmente, se cambió el actuador generador de temperatura debido a que la celda Peltier impedía disipar correctamente el caudal de calor y no alcanzaba la temperatura deseada. Sin embargo, se ajustó este inconveniente usando una resistencia térmica con un consumo máximo 1 amperio, similar al de la celda Peltier pero con mayor eficiencia. Esto se puede evidenciar en que al ajustar la celda Peltier a 5 watts de entrada alcanzó 45°C mientras que la resistencia disipadora de energía en forma de calor alcanzó 60°C.

Por otra parte, por decisión del investigador principal, se decidió implementar una tercera cápsula (no trabajada en el presente documento) externa encargada de la navegación del nano-satélite durante el descenso. En principio se pensó comunicar la cápsula de navegación con la cápsula interna donde se almacenarían los datos recopilados mediante el uso de un subsistema de comunicación mediante bluetooth. Sin embargo, por facilidad y para evitar posibles interacciones que puedan generar fallas entre las cápsulas, se suprimió este subsistema para garantizar una autonomía total de cada sistema. Por esta razón, y bajo la supervisión del investigador principal, no se implementó el subsistema de transmisión y recepción dejando independencia total en cada sistema.

Adicionalmente, el subsistema de monitoreo de altitud se vio afectado con la decisión de implementar una tercera cápsula y aislar la cápsula interna puesto que el monitoreo de la altitud depende de la presión atmosférica y de la temperatura. Más claro, para registrar la altura, se debe tener el sensor expuesto al medio ambiente para que se vea afectado por la presión atmosférica, pero al aislar la cápsula interna y sellarla herméticamente, la presión en el interior de la cápsula será la presión atmosférica inicial que permanecerá constante y, por tanto, no se podrá sentir la altitud y el subsistema arrojará siempre la altura a la cual fue sellada la cápsula. Sin embargo, este cambio repercute positivamente debido que la altura es una variable que es directamente proporcional a la presión y a la temperatura, por tanto así, si existe una variación de la temperatura (variable controlada mediante el subsistema de control de temperatura) y/o de la presión (variable no controlada), se verá reflejada en un gradiente

de altitud respecto a la altitud inicial (momento en el que se sella la cápsula) y la altitud final (altitud registrada con variación).

Finalmente, la implementación de la tercera cápsula afecta la estructura en general debido que una nueva cápsula añade peso extra, y las dos cápsulas implementadas en el presente documento se encuentran cercanas a los 10 kilogramos, muy por el ras de la definición de nano-satélite (de 1 a 10 kg). Debido a lo anterior, se sugiere cambiar el título del proyecto de nano-satélite a micro-satélite el cual tiene un margen de peso de 10 a 100 kg.

14 PRUEBAS DEL SISTEMA

La prueba del sistema se consolida por varias fases: como primera parte, se analizó que cada trama enviada por los subsistemas no contara con errores para poder ser almacenada y registrada, en caso de ser así, se descartaría la trama; para la segunda parte, se analizó que el subsistema de alimentación de componentes supiera la electrónica por el tiempo de autonomía establecido en el requerimiento.

La tabla mostrada a continuación describe la cantidad de errores en la trama encontrados. Para ello, se configuraron 6 tramas preestablecidas y se enviaron mediante el protocolo I²C, luego se analizó que la trama recibida fuese exactamente igual a la enviada y como lo demuestra la siguiente tabla, no hubo errores en las tramas.

| REQUERIMIENTO | VALOR TEÓRICO | VALOR SENSADO | VALOR SIMULADO | ERROR PORCENTUAL | APROBACIÓN |
|-------------------------------|---------------|---------------|----------------|------------------|------------|
| Errores en trama al comunicar | 0 | 0 | NA | 0% | APROBADO |
| | 0 | 0 | NA | 0% | |
| | 0 | 0 | NA | 0% | |
| | 0 | 0 | NA | 0% | |
| | 0 | 0 | NA | 0% | |
| | 0 | 0 | NA | 0% | |

La prueba se integró insertando la cápsula en un congelador de -24°C durante 6 horas. Debido a que no se contaba con una cámara térmica que simulara -60°C para verificar que dentro de la cápsula la temperatura se encontrara entre 15°C y 25°C , se procedió a configurar el subsistema de control de temperatura a 60°C para mantener el mismo delta de temperatura 80°C existente entre los -60°C y los 20°C . La siguiente imagen muestra la temperatura registrada por el sensor del congelador donde se insertó la cápsula:



Figura 121. Temperatura del congelador.

La cápsula sellada y puesta en operación se muestra continuación:



Figura 122. Cápsula puesta en funcionamiento.

Luego se insertó la cápsula en el congelador:



Figura 123. Cápsula insertada en el congelador.

Una vez finalizadas las 6 horas de la prueba se extrajo el módulo de la electrónica y se copió el archivo de Excel generado por el nano-satélite para ser analizado. A continuación, se muestra una imagen del estado externo de la cápsula al finalizar la prueba:



Figura 124. Detalle de congelamiento de la cápsula externa extraída del congelador.

La siguiente gráfica muestra un registro de tiempo almacenado en el Excel extraído del nano-satélite después de culminar la prueba. Dicho Excel es alimentado cada segundo por la LattePanda, y con estos datos se buscaba obtener el tiempo de autonomía que tuvo el sistema puesto que, una vez descargada la batería, no se podrá suplir la CPU y, por ende, no se seguiría escribiendo datos en el archivo de Excel. La gráfica del tiempo de autonomía es la siguiente:

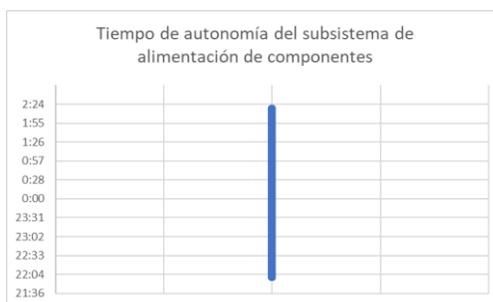


Figura 125. Tiempo de autonomía del sistema.

Adicionalmente, se realizó una prueba de radiación ultravioleta con una lámpara industrial de 20 watts usada en la manufactura del vidrio en procesos de fotocurado. La prueba consistió en radiar la cápsula directamente en la cara superior del nano-satélite con la lámpara durante poco más de 4 horas para verificar que las memorias y componentes electrónicos no sufrieran daños y que las películas contra filtros UV funcionaran. Como evidencia de que las memorias no se vieron afectadas por la radiación, se tiene el registro de vídeo (expuesto a continuación mediante el uso de fotografías) donde se evidencia el tiempo de grabación equivalente al tiempo que duró la prueba. Es importante resaltar que la prueba duró poco más de 4 horas, lo que equivale a un índice de radiación UV de nivel 5, catalogada como alerta naranja. Lo anterior se puede comprobar mediante el estudio realizado por la organización mundial de la salud en su artículo "Exposure to Artificial UV Radiation and Skin Cancer" [25], de donde se extrajo la siguiente tabla:

Tabla 50. Índice UV y Dosis Eritémica Estándar [25]

| UV index | Number of SED/hour | Power of the sun | Duration of exposure equivalent to 1 SED |
|----------|--------------------|------------------|--|
| 1 | 1 | Weak | 2h20 |
| 2 | 2 | Weak | 1h10 |
| 3 | 2.5 | Medium | 45 mn |
| 4 | 3.5 | Medium | 35 mn |
| 5 | 4.15 | Strong | 30 mn |
| 6 | 5 | Strong | 25 mn |
| 7 | 6 | Very strong | 20 mn |
| 8 | 7 | Very strong | 18 mn |
| 9 | 8.5 | Extreme | 16 mn |
| 10 | 9.5 | Extreme | 14 mn |
| 11 | 10.5 | Extreme | 12 mn |

La configuración de la prueba fue la siguiente:



Figura 126. Nano-satélite radiado con rayos UV.



Figura 127. Nano-satélite radiado con rayos UV.

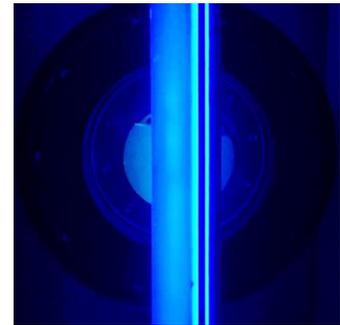


Figura 128. Nano-satélite radiado con rayos UV.

Los resultados del vídeo fueron los siguientes:



Figura 129. Filmación durante la prueba (00:03:05).

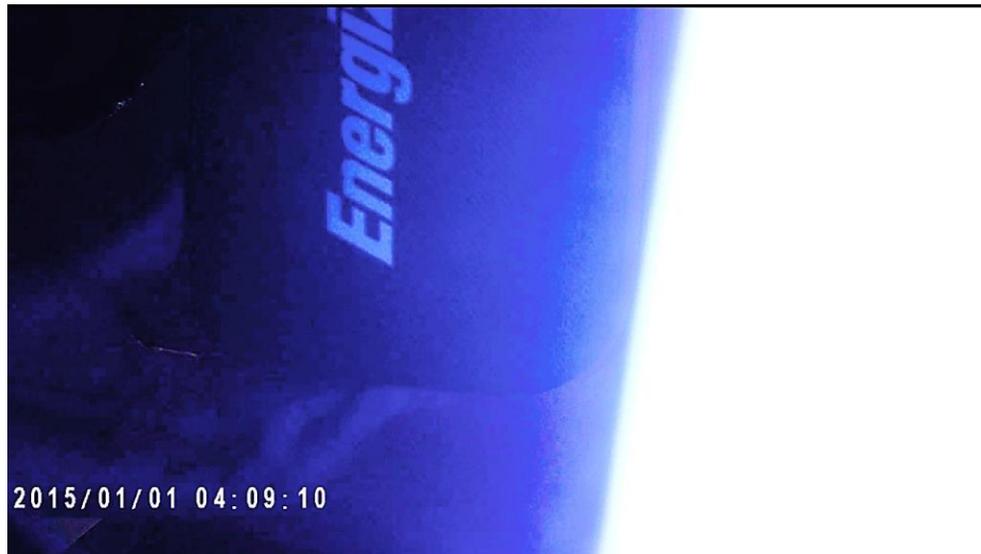


Figura 130. Filmación durante la prueba (04:09:10)

Finalmente, con respecto a las pruebas del sistema se sugiere realizar una prueba de presión usando una cámara de vacío que permita corroborar que el sistema no explote debido a la baja presión en la estratósfera. Adicionalmente, se recomienda aplicar una prueba de vibración que verifique que ninguna de las uniones presentes en la electrónica se pueda desconectar por mala conexión ocasionando un fallo del sistema; lo anterior se debe a que las pruebas realizadas contemplaban una cinemática estática, y durante el vuelo, el nano-satélite estará en constante oscilación.

15 MANUALES

El manual adjunto en el presente documento corresponde al manual de usuario compuesto de tres secciones: Apertura, cierre y LattePanda. Para ver el manual debe dirigirse al capítulo 20 sección 20.1.

16 RESULTADOS

Los resultados que se buscan con la prueba se centran en los objetivos, así que se mostrarán de acuerdo a los objetivos propuestos en el presente trabajo.

16.1 Objetivo 5.2.1

Como primer objetivo se tenía: “Diseñar, implementar y probar sistema de sensado de variables atmosféricas e imagen (presión interna, temperatura interna y humedad interna)”, los resultados de los valores sensados contra tiempo durante la prueba fueron los siguientes:

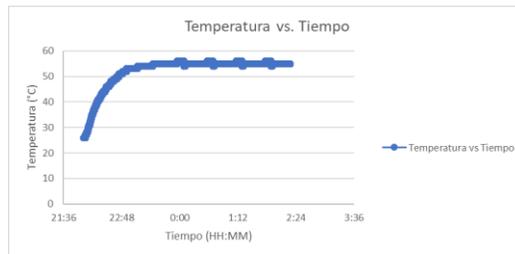


Figura 131. Gráfica de sensado de temperatura durante la prueba del sistema.

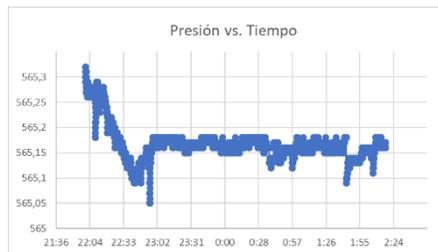


Figura 132. Gráfica de sensado de presión durante la prueba del sistema.

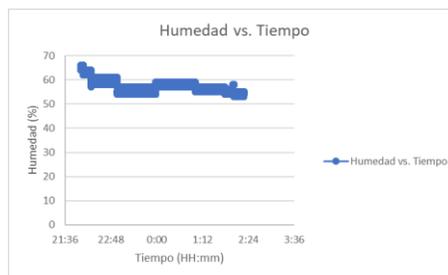


Figura 133. Gráfica de sensado de humedad durante la prueba del sistema.

Por otra parte, el objetivo plantea el sensado de imagen (fotografía y vídeo), sin embargo, los resultados no se muestran a continuación debido a que el vídeo registrado durante la prueba es un registro de aproximadamente 5 horas donde se filmó el interior del congelador (el cual

está aislado de luminosidad) y por tanto se ve una imagen negra con un parpadeo de un led rojo y blanco cada segundo. Sin embargo, como prueba del funcionamiento del subsistema, se tiene el resultado de la prueba del subsistema encontrado en la Figura 103, o en las pruebas del sistema en la Figura 129 y 130 del presente documento.

16.2 Objetivo 5.2.2

Los resultados del segundo objetivo: "Diseñar, implementar y probar sistema de control de temperatura (que asegure el buen estado funcional de la electrónica a bordo durante su viaje a la estratosfera)." se demuestran con la gráfica de la Figura 131 en la cual se evidencia que el sistema alcanzó y mantuvo una temperatura de 57°C con un margen de error del 5% puesto que la temperatura deseada eran 60°C.

16.3 Objetivo 5.2.3

Los resultados del tercer objetivo: "Diseñar, implementar y probar sistema de comunicación (que permita la recuperación del nano-satélite una vez retorne de la estratosfera)." comprende la caracterización y puesta en operación del sensor GPS, el sensor de velocidad de aire y el módulo GSM. Lo anterior se demuestra en la siguiente imagen:

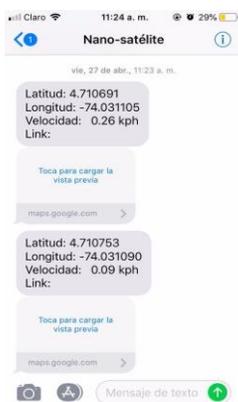


Figura 134. Mensaje de texto enviado mediante el Módulo GSM.

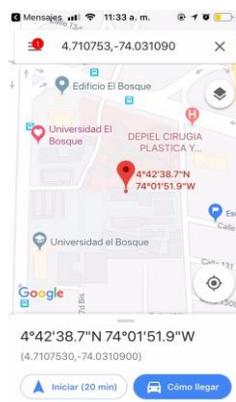


Figura 135. Visualización de la ubicación del GPS en la Universidad El Bosque.



Figura 136. Visualización de la ubicación del GPS en el centro de Bogotá.

Como adicional, se agregó un enlace de internet al mensaje de texto que abre Google Maps y muestra la ubicación exacta del GPS en el mapa de Google Maps. Lo anterior fue probado en el laboratorio F203, antiguo E203 de la Universidad El Bosque instalaciones Bogotá D.C., (Ver Figura 135) y en la carrera 11 A No. 1B, centro de la ciudad de Bogotá D.C (ver Figura 136).

16.4 Objetivo 5.2.4

Finalmente, el cuarto objetivo: "Diseñar e implementar estructura física del nano-satélite." se demuestra mediante las siguientes imágenes:



Figura 137. Perspectiva inferior del módulo electrónico.



Figura 138. Perspectiva superior del módulo electrónico.

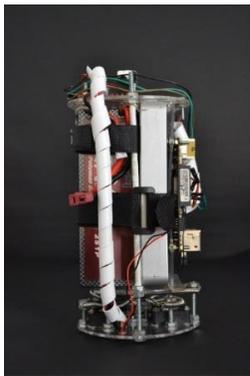


Figura 139. Perspectiva lateral del módulo electrónico.



Figura 140. Perspectiva frontal del módulo electrónico.



Figura 141. Módulo interno.



Figura 144. Módulo externo.

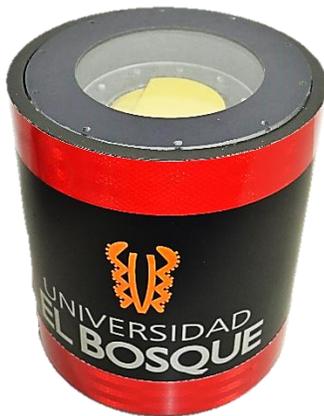


Figura 142. Perspectiva isométrica de cápsula final.



Figura 145. Perspectiva frontal de cápsula final



Figura 143. Perspectiva superior de la cápsula final sin tapas.

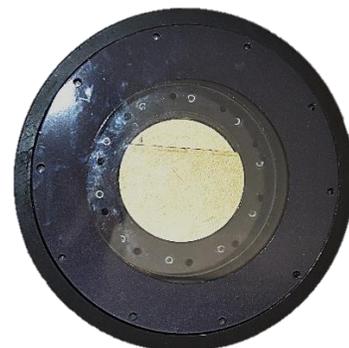


Figura 146. Perspectiva superior de la cápsula con tapas.

17 DISCUSIÓN

Para el cálculo del rendimiento y caracterización de inflado y llenado del globo, se deben considerar tres aspectos esenciales: el tamaño de su globo meteorológico, el peso de su carga útil (nano-satélite) y la cantidad de elevación positiva que desea utilizar. Es importante aclarar que el globo se encuentra en perfecto equilibrio cuando tiene el helio suficiente para levantar su propio peso y el peso de la carga útil, sin embargo, con el fin de que el globo junto a la carga útil vaya hacia arriba, se agrega helio adicional al globo, y dicha fuerza creada para la elevación se conoce como elevación positiva. Con estos tres valores, se determina la cantidad exacta de helio que se necesita; para lograr esto, se adiciona el peso del globo, el peso de la carga útil y el levantamiento positivo, luego se divide esta suma por 27.82 para obtener la cantidad de helio que necesita en pies cúbicos teniendo en cuenta que 1 pie cúbico de helio puede elevar 27.82 gramos. Seguido de esto, se calcula la altitud a la que el globo estallará, sabiendo que se parte del volumen inicial del globo y el volumen máximo permitido por el fabricante del globo. Cuanto menor sea el volumen inicial del globo, más alto irá antes de que alcance su volumen de máximo de quiebre.

Tabla 51. Cálculos y análisis del globo para elevar el nano-satélite.

| Tipo de globo (kg) | Masa neta (kg) | Elevación postivía (kg) | Helio (m ³) | Altitud máxima (m) | Velocidad (km/h) | Tiempo (minutos) |
|--------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|------------------|------------------|
| 0,35 | 10 | 1 | 11,5 | 11940 | 11,6 | 61,8 |
| 0,6 | 10 | 1 | 11,8 | 17400 | 11,4 | 90,7 |
| 1,2 | 10 | 1 | 10,93 | 23040 | 11,34 | 122,2 |

De acuerdo a los resultados obtenidos con respecto al subsistema de sensado de variables atmosféricas se puede analizar que la temperatura, presión y humedad se sensaron y almacenaron correctamente debido a que al analizar los datos se puede evidenciar que no hubo valores atípicos y que los datos sensados corresponden con la realidad. Por otra parte, al analizar los datos sensados para calcular la usando la ecuación para la variación de presión barométrica de la ley de distribución barométrica establece que:

$$P = P_0 e^{-ugh/RT} \quad (1)$$

Donde P es la variación de la presión barométrica, P_0 es la presión atmosférica, μ es la masa molecular del aire terrestre, g es la aceleración de la gravedad, h es la altura con respecto al nivel del mar, R la constante universal del aire y t es la temperatura; cada variable y constante usa las unidades del sistema internacional.

Para expresar la altitud h en función de la presión se debe tener la temperatura constante, la cual se logra usando el subsistema de control de temperatura, sin embargo, para el cálculo de la altitud se dejó expresada como variable debido a que el subsistema asegura una temperatura interna constante con un margen de error del 5% y varianza porcentual del 5%. Por otra parte, la presión que ingresa directamente a la ecuación es la sensada por el subsistema. EL proceso matemático para lograr que la altura quede en función de la presión y la temperatura se basa en la ecuación anterior y su proceso es el siguiente:

$$\ln(P) = \ln(P_0 e^{-ugh/RT}) \quad (2) \qquad \ln(P) - \ln(P_0) = -\frac{ugh}{RT} \quad (5)$$

$$\ln(P) = \ln(P_0) + \ln(e^{-ugh/RT}) \quad (3) \qquad \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = -\frac{ugh}{RT} \quad (6)$$

$$\ln(P) = \ln(P_0) - \frac{ugh}{RT} \quad (4) \qquad h = -\frac{RT}{ug} \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (7)$$

Finalmente, con esa expresión se procedió a calcular la altura con los datos sensados durante la prueba del sistema y el resultado fue el siguiente:

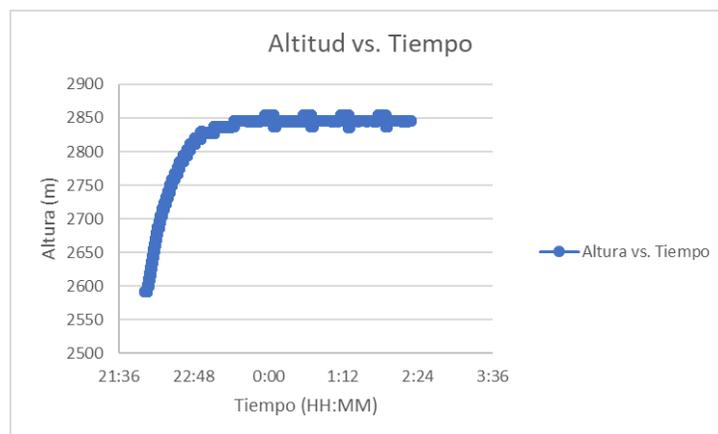


Figura 147. Gráfica de altitud contra tiempo.

Como se puede evidenciar, la altitud inicial indica aproximadamente 2600 metros sobre el nivel del mar a temperatura ambiente, lo cual concuerda con la altitud a la cual se encuentra ubicada la ciudad de Bogotá. Sin embargo, dado que la temperatura configurada en la cápsula fue de 60°C, afecta directamente la medida indirecta de la altura llegando hasta un máximo de 2850 metros, resultado que concuerda con la ley de presión barométrica.

En el caso de que la configuración del sistema hubiese sido la temperatura ambiente, se esperaría una gráfica como la siguiente:

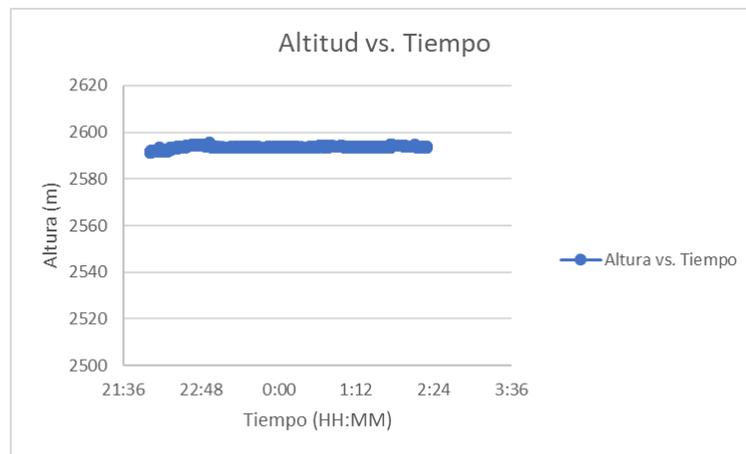


Figura 148. Gráfica de altitud contra tiempo en condiciones constantes.

Por otra parte, usando la ecuación para la variación de presión barométrica con la temperatura constante final alcanzada dentro de la cápsula (55°C) y la altura final registrada (2850m) se tiene que:

$$P = P_0 e^{-\frac{u g h}{RT}} = (760 \text{ mmHg}) e^{-\frac{(0.0289644 \frac{\text{k}\cdot\text{g}}{\text{mol}})(9.80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(2850 \text{ m})}{(8.31432 \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{mol}\cdot\text{K}})(328.15^\circ\text{K})}} \quad (8)$$

$$P = 565 \text{ mmHg}$$

Con lo cual queda demostrado que la presión sensada es correcta y concuerda con el resultado de la altura encontrado. Así pues, se puede analizar que todos los datos son correctos y permiten mantener un monitoreo continuo de la bacteria durante 2 horas de vuelo.

En adición, el resultado de la Figura 133 muestra un descenso en la humedad del ambiente, lo cual se explica por el fenómeno físico del delta de temperatura entre el habitáculo y el ambiente externo, puesto que esta diferencia produce una condensación del vapor de agua presente en el aire interno de la cápsula. Adicionalmente, el aire interno está en constante calentamiento debido al subsistema de control de temperatura haciendo que la humedad se condense con mayor velocidad para ser absorbida por gel de sílice, generando así, un descenso en la humedad del ambiente.

Con respecto al subsistema de control de temperatura se puede analizar de acuerdo a la prueba del sistema que el PID implementado tiene un margen de error aceptado para simular las condiciones de incubadora en las que se debe encontrar la bacteria. Adicionalmente, el subsistema es capaz de mantener una temperatura de 20°C con una temperatura externa de -60°C debido a que, en la prueba del sistema, se simuló el mismo delta de temperatura de 80°C como se expresa a continuación:

Tabla 52. Delta de temperatura entre ambiente de simulación y vuelo.

| Ambiente | T _{exterior} (°C) | T _{interior} (°C) | Δ Temp. |
|----------|----------------------------|----------------------------|---------|
| Prueba | -24 | 56 | -80 |
| Vuelo | -60 | 20 | -80 |

Así mismo, de los resultados encontrados se puede considerar que el tiempo de respuesta de la planta (aproximadamente de 1 hora con un delta de temperatura de 80°C) es acorde al tiempo necesario para evitar que la bacteria muera por cambios bruscos de temperatura y dado a que la temperatura externa en la troposfera es inversamente proporcional a la altura con un comportamiento lineal, el subsistema de control tiene el tiempo suficiente para responder al cambio de temperatura externo; esto teniendo en cuenta que se calcula un tiempo de ascenso de 2 horas hasta la estratosfera. Adicionalmente, la temperatura mínima en la estratosfera es de -60°C y máxima es 0°C aproximándose a la mesósfera, así que el subsistema de control de temperatura es lo suficientemente capaz para generar la temperatura necesaria para evitar que la bacteria se vea afectada por esta variable física. Lo dicho anteriormente se puede explicar de mejor manera en la siguiente imagen:

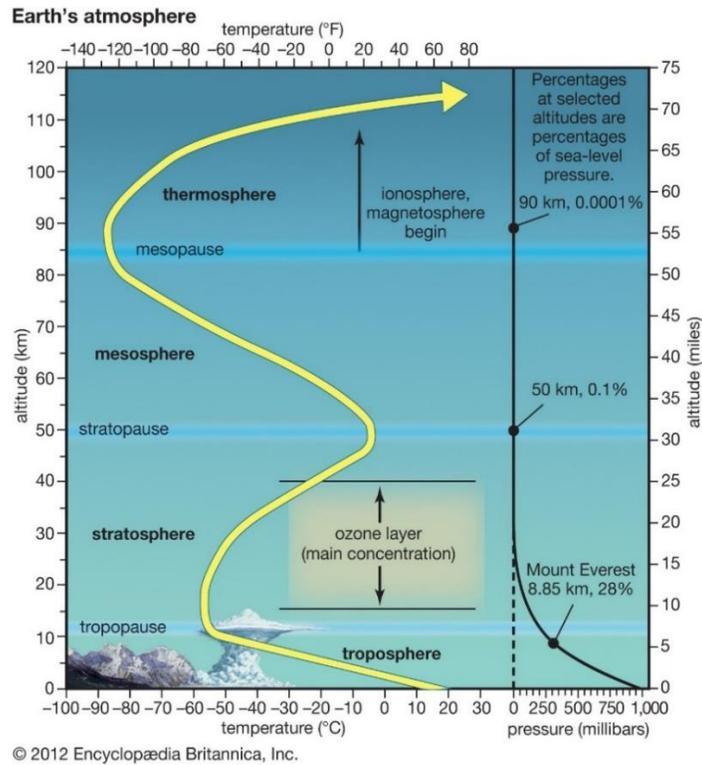


Figura 149. Variación de la temperatura y presión atmosféricas en función de la altitud en la atmósfera terrestre [23].

Debido a lo anterior se puede asumir que los resultados encontrados son correctos y permiten dar seguridad de que la bacteria no morirá por cambios bruscos de temperatura durante las 2 horas aproximadas de vuelo y 2 horas más de holgura.

Adicionalmente, la construcción hermética de la estructura facilita el funcionamiento del sistema de control debido que los materiales usados son usados industrialmente como aislantes térmicos; también, la cápsula cuenta con cámaras aire que trabajan como retardantes térmicos en la transferencia de temperatura. Esto se puede evidenciar de mejor manera en las simulaciones térmicas mostradas en las figuras 56, 57 y 58.

En cuanto al subsistema de comunicación se puede evidenciar que resultados obtenidos se puede evidenciar el módulo GPS es de alta precisión dado a que permite obtener la posición

real en términos de grados, minutos, segundos y décimas de segundos, obteniendo así, la posición exacta.

Por otra parte, el sistema GSM permite comunicar al operario la velocidad del viento y la posición en tiempo real del GPS. Sin embargo, teniendo en cuenta que el sistema de comunicación estará integrado dentro del nano-satélite, se evidencia que, en algún momento durante el ascenso, el GSM no enviará los mensajes de texto con la coordenada debido a que las antenas de telecomunicaciones de los operadores móviles son dirigidas y apuntan hacia la superficie terrestre, no hacia la atmósfera.

Adicionalmente, hace falta realizar pruebas del GSM y el GPS en paisaje rural que no llevaron a operación por problemas administrativos en el semillero de Astrobiología – BIDA de la universidad, puesto que ellos son los poseedores de los materiales. Últimamente, se podría mejorar la exactitud en la posición añadiendo otro GPS para dar redundancia al sistema.

Es de aclarar, que las antenas del GPS se deben encontrar ubicadas en la ventana superior del nano-satélite dentro cápsula contenedora (sección especificada en el diseño industrial), de tal manera que no se verán bloqueadas por la carcasa estructural permitiendo la comunicación bidireccional del sistema.

Finalmente, debido al mismo inconveniente con respecto a que los componentes electrónicos se encontraban en posesión del semillero, todos los materiales usados durante el presente proyecto se suplieron con presupuesto personal y se rediseñó desde cero el diseño hecho por el semillero. Cabe resaltar, este subsistema de comunicación es un respaldo y redundancia puesto que la siguiente fase del proyecto contempla usar un GPS de alta precisión y un radiofaro para recuperar el nano-satélite en un rango de dos kilómetros.

18 CONCLUSIONES

Con respectado al subsistema de sensado de variables se puede concluir que el diseño de los componentes electrónicos usados cumple con los requerimientos y especificaciones para las cuales se emplearon. Ahora bien, al momento de la puesta en operación, los sensores

funcionaron correctamente y en caso de tener una fuente constante de alimentación, permiten ejercer un uso continuo de los mismos. Del mismo modo, los datos arrojados por el subsistema aseguran un monitoreo continuo sobre la bacteria; además de que se conoce si la bacteria se encuentra en estado estable frente las 3 variables de afectación expuestas en este documento (temperatura, presión y humedad).

Del mismo modo, el sensado de imagen se realizó usando una cámara independiente a todos los subsistemas (exceptuando el subsistema de alimentación) que asegura una filmación continua e independiente a fallos de otros subsistemas, en caso de que ocurrieran. Por otra parte, se buscó usar una cámara que garantice un almacenamiento de la información, es por esto por lo que se seleccionó un dispositivo que guarde y finalice los videos con una duración máxima de 10 minutos, así pues, en caso de posible fallo, se perderían 10 minutos de información, equivalentes al 8% del video de las 2 horas de vuelo. Finalmente, se implementó una cámara que tuviese un voltímetro que constantemente esté sensando el voltaje de entrada para predecir el nivel de energía restante en las baterías; más claro, cuando el voltaje sea menor a 4.2 (voltaje mínimo de funcionamiento de la cámara), se guarda la información y apaga el subsistema.

En adición, de acuerdo a los datos encontrados y al análisis hecho, se puede determinar que el subsistema de control de temperatura asegura una temperatura adecuada y constante según lo requerido para que la bacteria viva. Lo anterior se concluye debido a que el tiempo de respuesta de la planta es de aproximadamente 1 hora en la condición extrema de un delta de temperatura de 80°C, y debido a que la temperatura externa con respecto a la temperatura interna varia linealmente dependiendo de la altura, el subsistema tendrá el tiempo necesario para alcanzar y/o regular la temperatura interna configurada. Es importante resaltar que se calcula que el nano-satélite llegue a su altura máxima en un tiempo de 2 horas, por tanto, el subsistema tiene aproximadamente dos veces el tiempo de respuesta para normalizar la temperatura; tener en cuenta que el control es continuo y siempre está actuando sobre la temperatura así que es improbable tener un delta de temperatura de 80°C entre la temperatura

interna y la temperatura deseada teniendo la premisa de que la bacteria debería estar a mínimo, 15°C.

En cuanto al subsistema de ubicación y comunicación, se puede concluir que las mediciones de posición realizadas no tienen variación respecto a las condiciones del espacio, debido a que la medición tomada en el centro de Bogotá se hizo en un espacio cerrado y un espacio abierto, y ambas mediciones arrojaron la misma longitud y la misma latitud, dando por hecho que aunque el subsistema esté bajo condiciones de aislamiento, es capaz de obtener la ubicación y comunicarla al usuario y/o operario del nano-satélite.

El módulo GSM se programó con una sim Avantel debido a que se conecta a la radio-base más cercana de cualquier operador colombiano. Es de aclarar que, aunque Claro, Movistar y Tigo restringen la conexión de Avantel a radio-bases que operen en la banda de 4G LTE, el módulo GSM, no necesita de dicha banda para comunicar los mensajes de texto GSM, por lo que se concluyó que Avantel es el operador apropiado para usar en el módulo.

Según la información teórica, es factible que la precisión del GPS mejore debido a que es un sensor satelital y en un ambiente rural, la relación señal a ruido mejora debido al aumento de la potencia de la señal, siempre y cuando se encuentre en el rango de la radio base del operador comercial. Como se mencionó anteriormente, este es un sistema de respaldo y se puede concluir que cumple correctamente la función para la cual fue diseñado, haciendo así que la recuperación del nano-satélite no dependa únicamente de un solo subsistema y sí de una mayor precisión sobre la recuperación del mismo.

Finalmente, se puede concluir que el diseño estructural, el cual era el máximo riesgo que podía tener el nano-satélite para generar fallos, cumplió con los estándares requeridos adicionando pulidez en los detalles, con una experiencia de usuario intuitiva que asegura que cualquier persona podría usar, y con robustez. Lo anterior se concluye debido a que en el diseño se contempló una cápsula externa capaz de resistir impactos de más de tres pisos y sin fugas que dañen la hermética de la cápsula; por otra parte, se implementó una cápsula interna que funcione como aislante térmico capaz de retardar la conducción térmica, indiferentemente de la externa. Por otra parte, las cápsulas fueron realizadas a forma de prototipo industrial, así

que, podrían ser replicadas industrialmente pasando de prototipo a producto sin mayor cambio y/o afectación en el diseño. Por otra parte, las películas contra rayos UV garantizaron un funcionamiento correcto de la electrónica y protegen las memorias internas del nano-satélite, como se evidencia en las figuras 125 y 126; en dichas imágenes se demuestra que la filmación duró poco más de 4 horas y que la cámara sigue funcionando porque captura claramente un aviso con letras. Es importante aclarar que el elemento con mayor exposición a la radiación UV es la cámara, por tanto, la prueba se realizó sobre este elemento y es prueba concluyente de que las películas protegen la cápsula y por tanto el resto de la electrónica funcionará con normalidad.

En conclusión final del presente proyecto, se puede afirmar que se cumplieron los objetivos propuestos y por tanto, es viable realizar el vuelo ya que se asegura que el nano-satélite alcanzará la estratósfera donde la bacteria será radiada por rayos cósmicos, los cuales no afectarán la electrónica; adicionalmente, se tiene certeza de que se controla la temperatura y se monitorea el estado de la carga biológica durante todo el vuelo más un tiempo de holgura adicional para la recuperación del mismo. Así mismo, se propone proceder con la siguiente fase, la cual se centra en el descenso controlado del nano-satélite.

19 REFERENCIAS DOCUMENTALES

- [1] CHR HANSEN. (2011). FD-DVS YF-L812 Yo-Flex. Technical Data. Acification curve. Recuperada de: http://www.thecheesemaker.com/content/Yogurt_PI%20YF-L812%20667296.pdf
- [2] K. Mitsuhiro and N. Shinichi, "University of Tokyo - Nano Satellite Project "PRISM"", Jstage.jst.go.jp, 2019. [Online]. Available: https://www.jstage.jst.go.jp/article/tstj/7/ists26/7_ists26_Tf_19/_pdf/-char/ja. [Accessed: 27- May- 2019].
- [3] C. Underwood, "SNAP-1: A Low Cost Modular COTS-Based Nano-Satellite – Design, Construction, Launch and Early Operations Phase", Digitalcommons.usu.edu, 2019. [Online]. Available:

- <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1993&context=smallsat>.
[Accessed: 27- May- 2019].
- [4] "ÑuSat-3, satélites de video y un telescopio espacial lanzados mediante un cohete Larga Marcha-4B — Latam Satelital", Latam Satelital, 2019. [Online]. Available: <http://latamsatelital.com/nusat-3-satelites-video-telescopio-espacial-lanzados-mediante-cohete-larga-marcha-4b/>. [Accessed: 27- May- 2019].
- [5] Oberrigh, J. E. (2002). Nanosatellite Science Applications. USA: Springer.
- [6] Buchen, E. (2014). SpaceWorks' 2014 Nano/Microsatellite Market Assessment. 28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites (págs. 1-5). Atlanta: Publicacion de SpaceWorks SSC14-I-3.
- [7] Sánchez, M. (18 de mayo de 2018). Nanosatélite en Colombia orbitará la tierra. La Patria.
- [8] S. Industria y comercio, "Boletín tecnológico - Nanosatélites", Sic.gov.co, 2019. [Online]. Available:
http://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/Propiedad%20Industrial/Boletines_Tecnologicos/Boletin_nanosatelites_29junio.pdf. [Accessed: 06- May- 2019].
- [9] "Digital-output relative humidity & temperature sensor/module", Sparkfun.com, 2018. [Online].
- [10] "Arduino Leonardo", Store.arduino.cc, 2018. [Online]. Disponible: <https://store.arduino.cc/usa/leonardo> [Consultado: 15- Sep- 2018].
- [11] "PELTIER MODULE", Cui.com, 2017. [Online]. Disponible: <https://www.cui.com/product/resource/cp85.pdf> [Consultado: 15- Sep- 2018].
- [12] "MS5611-01BA03", Te.com, 2019. [Online]. Available: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FMS5611-01BA03%7FB3%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_MS5611-01BA03_B3.pdf%7FCAT-BLPS0036. [Accessed: 06- May- 2019].
- [13] "MAX-M8", U-blox.com, 2018. [Online]. Available: https://www.u-blox.com/sites/default/files/MAX-M8-FW3_DataSheet_%28UBX-15031506%29.pdf [Accessed: 15- Sep- 2018].

- [14] "SIM808", Cdn-shop.adafruit.com, 2014. [Online]. Available: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SIM808_Hardware+Design_V1.00.pdf [Accessed: 15- Sep- 2018].
- [15] L. Team, "Hardware Introduction - Documentation", Docs.lattepanda.com, 2019. [Online]. Available: http://docs.lattepanda.com/content/1st_edition/peripheral/ [Accessed: 06- May- 2019].
- [16] "Cjrslrba® Lm2596 Regulador De Voltaje - \$ 70.533", Artículo.mercadolibre.com.co, 2018. [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-470690948-cjrslrba-lm2596-regulador-de-voltaje-_JM?matt_tool=55144960&matt_word=&gclid=EAIaIQobChMIm5i10f643gIVrKOzCh3y9ArxEAQYAyABEgK1gPD_BwE. [Accessed: 03- Nov- 2018].
- [17] C. Lefteri and E. Alatorre, Plástico. México [etc.]: McGraw-Hill, 2002.
- [18] "Acero inoxidable 304 - Placa de acero - Lamina de acero - Solera de acero", Metalium.mx, 2018. [Online]. Available: <http://www.metalium.mx/aluminio/aluminio-1100/1100>. [Accessed: 03- Nov- 2018].
- [19] CIA General de Aceros S.A. Cga.com.co, 2018. [Online]. Available: <https://www.cga.com.co/images/document/ficha-304-304L.pdf>. [Accessed: 03- Nov- 2018].
- [20] "Gel de sílice azul (TSO)", Geldesilice.com, 2018. [Online]. Available: <https://www.geldesilice.com/es/productos/productos-de-gel-de-silicesilicagel/gel-de-silice-azul-tso/27/10/4>. [Accessed: 03- Nov- 2018].
- [21] L. Engineers, "SIM808", Lastminuteengineers.com, 2019. [Online]. Available: <https://lastminuteengineers.com/wp-content/uploads/2018/11/Connecting-SIM900-GSM-Shield-to-Arduino-For-Software-Control.png>. [Accessed: 01- May- 2019].
- [22] "ContrIO PID", Picuino.com, 2019. [Online]. Available: https://www.picuino.com/_images/img-0055.png. [Accessed: 03- May- 2019].
- [23] McManus. (2012). Un salto desde la estratosfera para hablar de la atmósfera. 04/03/2018, de Naturalmenteciencias Sitio web:

<https://naturalmenteciencias.wordpress.com/2012/10/14/un-salto-desde-la-estratosfera-para-hablar-de-la-atmosfera/>.

[24] L. Team, "Hardware Introduction - Documentation", Docs.lattepanda.com, 2019. [Online]. Available:

http://docs.lattepanda.com/content/1st_edition/hardware_introduction/ [Accessed: 06-May- 2019].

[25] "Exposure to Artificial UV Radiation and Skin Cancer", Cancer-environnement.fr, 2019. [Online]. Available:

<https://www.cancer-environnement.fr/LinkClick.aspx?fileticket=huIz0Gh6oyc%3D&tabid=268&mid=1520>.

[Accessed: 06- May- 2019].