



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DESARROLLO DEL SISTEMA DE MONITOREO
Y ADQUISICION DE DATOS
(HOUSEKEEPING) PARA LA PLATAFORMA
SUBORBITAL PIXQUI

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

(ÁREA: ELECTRÓNICA)

PRESENTAN:

Juan Carlos Sánchez Balanzar



DIRECTOR DE TESIS: M. I. LAURO SANTIAGO CRUZ

MÉXICO, D.F.

2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos:

A la UNAM por las enseñanzas que he ido encontrando durante mi formación académica y personal.

Al **M.I. Lauro Santiago Cruz** y al Instituto de Ingeniería por el apoyo en el desarrollo de este trabajo.

Al **Dr. Gustavo Medina Tanco** por la oportunidad de trabajar en el equipo del ICN, por su apoyo y confianza.

Al **Dr. Saúl de la Rosa Nieves** y al **Ing. Miguel Ángel Alvarado**. Gracias por su apoyo, confianza, y por lo enseñado. Mike gracias por tu amistad.

Al **Dr. Luis Olguín, I.Q. Aimee Torres** por permitirme trabajar en un proyecto con ustedes.

A mis compañer@s y amig@s de la UNAM, **Marlem, Arturo, Vilowsky...** gracias por las alegrías y por dejarme conocerlos estos años... a mis compañeros de los laboratorios del Instituto de Ingeniería e Instituto de Ciencias Nucleares: **Cuchillo, Preciado, Favio, Jesús, Miguel, Adrián, Cesar, Sócrates, Luis Javier, Javier**

Greta, Hector, gracias por su amistad y apoyo en este tiempo compartido.

Aglaé, gracias por tu amistad y por lo mostrado en el tiempo en que coincidimos.

Samuel, William y Ximena, por ser parte de un muy agradable grupo de trabajo, se les estima y quiere.

Yas, gracias por tu interés y apoyo en este trabajo, fue muy grata tu ayuda los últimos meses y más tu singular amistad.

A **Juan Efrain, Lorella, Regina, Nucha, Rosie, Iliana** por su apoyo, amistad y comprensión.

A mi familia: A **Efrén** por educarme y apoyarme, a **María Eugenia** por apoyarme en mi preparación profesional y en cada uno de los caminos que he tomado y decidido, a **Luis** por tu amistad, cuidados y apoyo, y a **Gerardo** por tu alegría.

A **Erik**, por escucharme, aguantarme y burlarte de mis historias y sin duda por tu apoyo y amistad.

Vale, por compartirme tu arte, por mostrarme que en la distancia se puede conocer a las personas. Gracias por leerme, por tu alegría, sensibilidad, sencillez y tu especial amistad.

Tania, GRACIAS por tu cariño.

Daph, muchas gracias por toda esa linda amistad que me has brindado.

Gracias por su trabajo e inspiración, por lo aprendido y desaprendido, sin ello este camino no tendría ritmo, sabor y color:

A **Aura, Coruco, Droops, Adrian, Paquito, Rubén “Pastor”, Yonki, Bruno, Andreadlocks, Ángel...** gracias por todo lo que me han enseñado, por dejarme conocerlos, son parte de lo importante para mi y un gran apoyo. Gracias por TODO y por el cotorreo musical. Se les quiere y estima.

¡Capo!...caminante del mundo, mestizo musical. ¡MAESTRO!, gracias **Cris** por tu amistad y enseñanzas.

Ofer Selektah muchas gracias por tu amistad y más que nada por tu confianza. ¡Seguimos caminando!

A cada una de las personas que forman parte de esa otra casa, el Hilvana, muchas historias y diversión que he pasado, gracias por su amistad. Gracias **Abel**, por el cotorreo.

A **Daniel, Arturo**, y la banda veracruzana... por su amistad y cotorreo.

A **Hugo Goycochea, Taniel Morales** y la banda del FARO de Oriente, gracias por lo enseñado.

A **Padma Di Tulio, Valeria, Perikles, Diego, Miguel, Marma, Ivan, Alexis, Daniel Paz, Manolo, Omar, Manuel, Hiram, Rodrigo**, al Realidub, Rastrillos, La Nelson, La Comuna y Los Aguas Aguas y a todas las bandas y músicos que he conocido y con los que he convivido, por todo lo regalado en cada uno de sus trabajos, por su música,, actuaciones, por esa inspiración y las ganas de seguir caminando de una manera diferente. ¡Gracias familia!

Dedicatoria

A mi familia, María Eugenia, Efrén, Luis y Gerardo.

A esas personas que son parte de mi vida y yo soy un poco de cada uno... mi familia de amig@s

“...sal a caminar la vida está aquí no pares el rumbo de ser feliz... regálale un poquito de tu corazón
a esa gente que cree un poquito más en ti...”

Contenido

| | |
|--|-----|
| Índice de figuras | iv |
| Índice de tablas | vii |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Antecedentes | 1 |
| 1.2. Proyecto PIXQUI | 2 |
| 1.3. Motivación | 2 |
| 1.4. Aportación de la tesis | 3 |
| 2. Planteamiento del problema | 4 |
| 2.1. Introducción | 4 |
| 2.2. Requisitos del sistema HK_Pixqui | 4 |
| 2.3. Cronograma de desarrollo | 6 |
| 3. Fundamentos teóricos | 8 |
| 3.1. Sistemas de monitoreo y adquisición de datos | 8 |
| 3.1.1. Sensores | 9 |
| Sensores digitales y sensores analógicos | 10 |
| Sensores de temperatura | 11 |
| Sensores inerciales | 14 |
| Sensores de presión | 16 |
| 3.1.2. Almacenamiento de datos | 17 |
| Memoria EEPROM | 18 |
| Tarjetas de memoria <i>SD</i> (Memoria <i>SecureDigital Card</i>) | 18 |
| Interfaz de la memoria <i>SD Card</i> | 20 |
| 3.2. Comunicación serie | 21 |
| Modo <i>Simplex</i> | 21 |
| Modo <i>Full-Duplex</i> | 21 |
| Modo <i>Half-Duplex</i> | 22 |
| 3.2.1. Comunicación serie asíncrona | 23 |
| 3.2.2. Comunicación serie síncrona | 23 |
| Estándar SPI | 23 |

| | |
|--|-----------|
| Estándar I2C | 25 |
| 4. Diseño y desarrollo del sistema HK_Pixqui | 29 |
| 4.1. Metodología empleada | 29 |
| 4.2. Filosofía de operación | 29 |
| 4.3. Requerimientos y especificaciones..... | 30 |
| 4.3.1. Requerimientos mecánicos | 30 |
| 4.3.2. Condiciones de operación | 31 |
| 4.3.3. Interfaces de comunicación digital y señales analógicas | 31 |
| 4.4. Propuesta y diseño del sistema de monitoreo..... | 33 |
| 4.4.1. Selección del dispositivo lógico de control | 33 |
| 4.5. Implementación y validación | 37 |
| 4.5.1. Interfaz de señales analógicas | 39 |
| Multiplexaje de canales analógicos..... | 39 |
| Monitoreo de sensores analógicos y comunicación serie | 41 |
| 4.5.2. Interfaz de señales digitales | 48 |
| Monitoreo de sensores digitales | 48 |
| Expansor de puertos | 54 |
| 4.6. Bancos de prueba | 55 |
| 4.6.1. Banco de pruebas LVPS | 55 |
| Diseño de interfaz..... | 56 |
| Lógica de funcionamiento..... | 57 |
| Implementación | 60 |
| 4.6.2. Banco de pruebas CPU | 60 |
| Lógica de funcionamiento..... | 61 |
| Implementación | 63 |
| Encendido/apagado de LVPS..... | 63 |
| Lectura de parámetro | 64 |
| Interfaz..... | 66 |
| 4.6.3. Banco de pruebas para el sistema de telemetría | 67 |
| Lógica de operación..... | 67 |
| Implementación | 69 |
| Arquitectura de la Interfaz Gráfica | 70 |

| | |
|--|-----|
| Pruebas de laboratorio | 72 |
| 4.7. Diseño y fabricación del circuito impreso | 72 |
| 5. Evaluación y resultados | 79 |
| 5.1. Validación del microcontrolador en condiciones de vacío | 79 |
| Resultados de la prueba a presión ambiente | 80 |
| Resultados de la prueba de vacío..... | 81 |
| 5.2. Integración de hardware | 84 |
| 5.3. Evaluación y caracterización del prototipo final | 85 |
| 5.3.1. Pruebas de interfaces externas..... | 85 |
| 5.3.2. Pruebas de vacío y ciclado térmico | 91 |
| 6. Conclusiones | 98 |
| 6.1. Resultados obtenidos | 98 |
| 6.2. Conclusiones..... | 98 |
| 6.3. Recomendaciones | 99 |
| Bibliografía | 101 |

Índice de figuras

Capítulo 1

| | |
|---|---|
| Figura 1.1. Góndola de la NASA en donde fue montado Pixqui..... | 2 |
|---|---|

Capítulo 2

| | |
|---|---|
| Figura 2.1. Arquitectura del sistema HK_Pixqui..... | 5 |
|---|---|

Capítulo 3

| | |
|---|---|
| Figura 3.1. Sistema de monitoreo y adquisición de datos | 9 |
|---|---|

| | |
|--|----|
| Figura 3.2. Relación temperatura- resistencia de los termistores PTC y NTC | 12 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura 3.3. Curvas características de termistores NTC..... | 13 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura 3.4. Arquitectura de acelerómetro | 15 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Figura 3.5. Arquitectura de giróscopo | 15 |
|---|----|

| | |
|-----------------------------------|----|
| Figura 3.6. Tipos de presión..... | 16 |
|-----------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| Figura 3.7. Construcción mecánica de sensores de presión | 17 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Figura 3.8. Memorias <i>SD Card</i> | 19 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Figura 3.9. Configuración de terminales en memoria | 20 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura 3.10. Modo <i>Simplex</i> | 21 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura 3.11. Modo <i>Full-Duplex</i> | 21 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura 3.12. Modo <i>Half-Duplex</i> | 22 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Figura 3.13. Topología Punto a Punto..... | 22 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Figura 3.14. Topología Multi-Drop | 22 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Figura 3.15. Topología Multi-Punto | 22 |
|--|----|

| | |
|---------------------------------|----|
| Figura 3.16. Estándar SPI | 24 |
|---------------------------------|----|

| | |
|---|----|
| Figura 3.17. Modos de operación del protocolo SPI | 24 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Figura 3.18. Conexión estándar de dispositivos en el bus I2C | 25 |
|--|----|

| | |
|----------------------------------|----|
| Figura 3.19. Protocolo I2C | 27 |
|----------------------------------|----|

Capítulo 4

| | |
|---|----|
| Figura 4.1. Gabinete para el sistema HK_Pixqui..... | 30 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Figura 4.2. Arquitectura del sistema HK_Pixqui | 32 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| Figura 4.3. Arquitectura del microcontrolador TM4C123GH6PZ | 34 |
|--|----|

| | |
|---|----|
| Figura 4.4. Nomenclatura de microcontroladores TIVA | 37 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Figura 4.5. <i>Launchpad</i> TIVA | 38 |
|---|----|

| | |
|--|----|
| Figura 4.6. Tarjeta electrónica | 38 |
| Figura 4.7. Diseño de tarjeta basada en TM4C123GH6PZ | 38 |
| Figura 4.8. Esquema de conexión..... | 40 |
| Figura 4.9. Implementación física del multiplexor | 40 |
| Figura 4.10. Resultado de lecturas | 40 |
| Figura 4.11. Arquitectura para la validación de interfaces y lecturas analógicas..... | 41 |
| Figura 4.12. Respuesta de salida en función de la orientación | 42 |
| Figura 4.13. Salida típica del sensor en relación a su posición | 42 |
| Figura 4.14. Modelo de la recta..... | 43 |
| Figura 4.15. Aplicación típica del sensor MM7361 | 44 |
| Figura 4.16. Esquemático de conexión del LM335 | 44 |
| Figura 4.17. Aplicación típica del sensor MP3H6115A | 45 |
| Figura 4.18. Factor de error por temperatura | 46 |
| Figura 4.19. Sistema para la validación de sensores | 47 |
| Figura 4.20. Vista de resultados obtenidos..... | 47 |
| Figura 4.21. Aplicación típica del sensor L3GD20..... | 48 |
| Figura 4.22. Oscilograma de la trama de configuración del giróscopo | 49 |
| Figura 4.23. Oscilograma de la lectura del eje X | 49 |
| Figura 4.24. Oscilograma de la lectura del eje Y | 49 |
| Figura 4.25. Oscilograma de la lectura del eje Z..... | 49 |
| Figura 4.26. Visualización de las lecturas del giróscopo..... | 50 |
| Figura 4.27. Precisión típica de la humedad relativa a diferentes temperaturas | 51 |
| Figura 4.28. Oscilograma de la comunicación en modo <i>Hold Master</i> | 52 |
| Figura 4.29. Comandos enviados por el microcontrolador hacia el sensor de humedad | 52 |
| Figura 4.30. Bytes enviados por el sensor de humedad hacia el microcontrolador..... | 53 |
| Figura 4.31. Lectura en terminal de la humedad relativa..... | 53 |
| Figura 4.32. Diagrama a bloques para la validación del expansor de puertos..... | 54 |
| Figura 4.33. Circuito de prueba para el expansor de puertos | 54 |
| Figura 4.34. Oscilograma de la comunicación entre microcontrolador y expansor de puertos.... | 55 |
| Figura 4.35. Circuito de prueba del expansor de puertos | 55 |
| Figura 4.36. Circuito <i>High Level Command</i> | 56 |
| Figura 4.37. Interfaz con los relevadores de las LVPS..... | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.38. Diagrama a bloques para la validación del banco de pruebas de las LVPS | 57 |
| Figura 4.39. Diagrama de flujo para la interacción con banco de pruebas de las LVPS..... | 58 |
| Figura 4.40. Diagrama de flujo de subrutina de atención a interrupción por UART 3 | 59 |
| Figura 4.41. Conexión del microcontrolador con el banco de pruebas de las LVPS..... | 60 |
| Figura 4.42. Composición de los comandos de una trama de lectura | 62 |
| Figura 4.43. Circuito de prueba para la validación del protocolo con CPU | 63 |
| Figura 4.44. Envío de la trama de encendido de LVPS..... | 64 |
| Figura 4.45. Simulación del encendido de la LVPS CPU_5V..... | 64 |
| Figura 4.46. Solicitud y respuesta a petición de lectura de voltaje de CPU_5V..... | 65 |
| Figura 4.47. Integración del sistema HK_Pixqui y el banco de pruebas de CPU..... | 65 |
| Figura 4.48. Interfaz de control para el banco de pruebas de CPU | 66 |
| Figura 4.49. GI para la simulación del sistema TS | 70 |
| Figura 4.50. Configuración de comunicación y monitoreo de variables atmosféricas e inerciales | 71 |
| Figura 4.51. Monitoreo de temperaturas | 71 |
| Figura 4.52. Monitoreo de LVPS..... | 71 |
| Figura 4.53. Prueba de laboratorio del simulador de TS..... | 72 |
| Figura 4.54. Esquema a bloques del sistema HK_Pixqui | 74 |
| Figura 4.55. Bloque de <i>High Level Command</i> | 73 |
| Figura 4.56. Bloque de Monitores V-C..... | 75 |
| Figura 4.57. Bloque de sensores..... | 75 |
| Figura 4.58. Bloque de interfaz diferencial SPI A y B..... | 76 |
| Figura 4.59. Bloque de interfaz diferencial UART..... | 76 |
| Figura 4.60. Bloque de puertos de propósito general | 76 |
| Figura 4.61. Bloque de multiplexor analógico | 77 |
| Figura 4.62. Bloque central | 77 |
| Figura 4.63. Modelo 3D de la tarjeta electrónica del HK_Pixqui | 78 |

Capítulo 5

| | |
|--|----|
| Figura 5.1. Sistema para la validación del microcontrolador en vacío | 79 |
| Figura 5.2. Conexión entre MCU y SoC dentro de cámara de vacío | 80 |
| Figura 5.3. Temperatura de la platina en prueba de vacío..... | 81 |
| Figura 5.4. Temperatura del microcontrolador durante prueba de vacío..... | 82 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.5. Tarjeta electrónica del sistema HK_Pixqui | 84 |
| Figura 5.6. Conexión de la interfaz JTAG..... | 85 |
| Figura 5.7. Conexión de programador con la tarjeta de HK_Pixqui para su configuración..... | 86 |
| Figura 5.8. Reconocimiento del microcontrolador mediante CCS | 86 |
| Figura 5.9. Esquema de prueba de interfaz SPI LVDS del HK_Pixqui..... | 87 |
| Figura 5.10. Trama enviada mediante la interfaz SPI diferencial | 87 |
| Figura 5.11. Esquema de prueba de interfaz UART del HK_Pixqui | 88 |
| Figura 5.12. Conexión entre GPS y HK_Pixqui para prueba de validación. | 88 |
| Figura 5.13. Esquema de prueba de la interfaz RS-422 del HK_Pixqui | 89 |
| Figura 5.14. Esquema de prueba para la validación de interfaces con CPU y HLC..... | 89 |
| Figura 5.15. Circuito de prueba para la validación de interfaces con CPU y HLC..... | 90 |
| Figura 5.16. Sistema HK_Pixqui | 91 |
| Figura 5.17. Cámara de vacío y sistema de adquisición de datos del ICN..... | 92 |
| Figura 5.18. Perfil de temperaturas durante la prueba de ciclado térmico..... | 94 |
| Figura 5.19. Perfil de temperatura de la platina..... | 94 |
| Figura 5.20. Perfil de temperatura del microcontrolador del HK_Pixqui | 95 |
| Figura 5.21. Perfil de temperatura de la CPU | 96 |

Índice de tablas

Capítulo 2

| | |
|---|---|
| Tabla 2.1 Subsistemas de la plataforma Pixqui | 5 |
| Tabla 2.2. Cronograma de desarrollo del sistema de monitoreo..... | 7 |

Capítulo 3

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1. Ventajas y desventajas de sensores termoelectricos..... | 11 |
|--|----|

Capítulo 4

| | |
|---|----|
| Tabla 4.1. Características del sensor L3GD20 | 50 |
| Tabla 4.2. Parámetros del sensor SHT21 | 51 |
| Tabla 4.3. Comando para el manejo del banco de pruebas de LVPS | 59 |
| Tabla 4.4. Tipo de tramas para la comunicación con CPU..... | 61 |
| Tabla 4.5. Trama para el encendido o apagado de LVPS..... | 61 |
| Tabla 4.6. Identificadores de LVPS | 61 |
| Tabla 4.7. Trama para la lectura de parámetros del HK_PIXQUI | 62 |
| Tabla 4.8. Tipo de tramas para la comunicación con TS..... | 67 |
| Tabla 4.9. Trama para el envío de variables atmosféricas e inerciales | 67 |
| Tabla 4.10. Trama para el envío de variables del monitoreo de LVPS | 68 |
| Tabla 4.11. Trama para el envío del monitoreo de termistores..... | 69 |

Capítulo 5

| | |
|--|----|
| Tabla 5.1. Mediciones realizadas a los termistores para su caracterización | 80 |
| Tabla 5.2. Mediciones realizadas a temperatura y presión ambiente | 81 |
| Tabla 5.3. Mediciones en vacío a temperatura ambiente | 83 |
| Tabla 5.4. Mediciones en vacío a temperatura de 80[°C] | 83 |
| Tabla 5.5. Mediciones en vacío a temperatura de -18[°C] | 84 |
| Tabla 5.6. Datos a enviar mediante protocolo SPI | 87 |

Capítulo I

Introducción

En este capítulo se mencionará el proyecto para el cual se desarrollará el sistema de monitoreo y adquisición de datos, así como el alcance que tendrá éste y las misiones en las que se empleará.

1.1. Antecedentes

Esta tesis se enfoca en el desarrollo de un sistema de monitoreo y adquisición de datos denominado HK_Pixqui, el cual se diseña para su funcionamiento en una plataforma suborbital. De tal forma que en este capítulo se mencionará la misión a la cual estará destinado dicho sistema.

El sistema que se ha de desarrollar forma parte de los desarrollos realizados en la UNAM en el campo aeroespacial, ya que anteriormente se ha comenzado a diseñar e implementar sistemas de monitoreo para dichos ambientes.

Uno de los antecedentes inmediatos al presente trabajo, es el sistema *Housekeeping* [1] realizado por el Instituto de Ingeniería y el Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM. Este sistema fue desarrollado para la misión EUSO-BALLOON (*Extreme Universe Space Observatory on Balloon*), el cual es un proyecto de colaboración internacional entre el consorcio JEM EUSO [2] y CNES (*Centre National d'Etudes Spatiales*), cuyos objetivos son: probar los sistemas desarrollados para el proyecto JEM-EUSO en condiciones extremas (estratósfera), medir la intensidad de la luminiscencia atmosférica con una resolución angular apropiada para el experimento y poner a prueba la capacidad del proyecto para detectar la lluvia de rayos cósmicos.

En EUSO-Balloon, México ha participado mediante los desarrollos realizados por los institutos antes mencionados y como parte de dicho proyecto, se logró un acuerdo mediante la AEM (Agencia Espacial Mexicana), para poder probar los prototipos realizados del sistema *Housekeeping* con la agencia espacial estadounidense NASA en una serie de vuelos con globos estratosféricos. Por lo que para estos vuelos México participará como carga útil dentro de una góndola provista por la NASA. A esta carga útil se le denominó AEMB-F1, siglas que significan: *AEM Balloon- Flight 1*, para posteriormente renombrarlo como “Pixqui”.

El primer vuelo de Pixqui se realizó en *Fort Sumner*, Nuevo México, el día 12 de agosto de 2013. El vuelo tuvo una duración de 9.5 horas, tiempo en el cual el *Housekeeping* estuvo operando y adquiriendo datos.

El sistema Pixqui fue montado en una góndola de la NASA, figura 1.1, la cual fue elevada por un globo estratosférico a una altura de aproximadamente 32 km.



Fig. 1.1. Góndola de la NASA en donde fue montado Pixqui.

1.2. Proyecto PIXQUI

Actualmente el proyecto PIXQUI es un desarrollo de la Facultad de Ingeniería, Instituto de Ingeniería y el Instituto de Ciencias Nucleares, el cual consiste en una plataforma suborbital nacional, la cual permitirá la validación de sistemas electrónicos así como la realización de experimentos en condiciones estratosféricas

PIXQUI, palabra derivada del náhuatl, cuyo significado es guardián, consiste en una estructura metálica en forma de caja, la cual estará equipada con sistemas de energía, un sistema de monitoreo, adquisición y almacenamiento de datos (HK_Pixqui), un sistema de comunicación por telemetría y una computadora a bordo, de tal forma que en conjunto permitan probar de manera rápida y a un bajo costo el comportamiento y funcionamiento de equipos y sistemas espaciales en vuelos suborbitales. Este tipo de vuelos se realizan a una altura de 30km a 40 km de altura, empleando globos estratosféricos, con el fin de someter los equipos de estudio a condiciones de vacío y temperatura similares a las del espacio exterior.

1.3. Motivación

El uso de plataformas suborbitales, en las cuales el uso de un globo estratosférico es el elemento principal, son herramientas de gran importancia en la investigación científica y sobre todo en el área aeroespacial-espacial. Esto se debe a que estas plataformas permiten colocar cargas de estudio por un tiempo prolongado en la estratósfera. Es así como estas herramientas son muy versátiles, abarcando estudios de rayos X, infrarrojos, ultravioleta, estudio de la atmósfera y rayos cósmicos.

Las plataformas suborbitales en el campo aeroespacial también permiten la validación de cargas tales como: hardware de comunicaciones, sistema de baterías, software a bordo, estaciones de

control, modelos de satélites, la validación de sistemas electrónicos para su uso en el espacio, etcétera.

Dado el reciente crecimiento en el país del desarrollo de tecnologías en el campo aeroespacial, resulta necesario contar con una plataforma que permita la validación de los sistemas desarrollados. Es así como surge la necesidad de la construcción de una plataforma suborbital que permita brindar un servicio a las diversas entidades del país para la validación de sus prototipos, además de posicionar al país dentro del espectro de países que cuentan con un programa científico, tales como los programas existentes en de Australia, Brasil, Estados Unidos o Francia.

1.4. Aportación de la tesis

El desarrollo de la plataforma suborbital permitirá participar activamente en el progreso aeroespacial del país. Mientras que el diseño e implementación del sistema de monitoreo de esta plataforma permitirá dar continuidad a los avances tecnológicos antes realizados en el área, de tal forma que con ello se busca:

- Desarrollar la primera versión de un sistema de monitoreo que sea capaz de funcionar para la plataforma suborbital.
- De manera personal, implementar los conocimientos adquiridos durante la participación activa desde hace dos años en los proyectos auxiliares de EUSO-BALLOON y PIXQUI v1.

Mientras que aunado a esto, para la UNAM significará:

- La generación en el país recursos humanos e infraestructura para la producción de tecnología de alto nivel en el campo aeroespacial.

Además de ello, el trabajo expuesto aquí permitirá sentar las bases para el diseño e implementación en futuros sistemas de monitoreo empleados en sistemas aeroespaciales.

Conociendo los antecedentes en cuanto a los proyectos desarrollados en torno a sistemas de monitoreo en el campo aeroespacial por parte de la UNAM, en el siguiente capítulo se abordará el planteamiento del problema al cual se le dará solución mediante el desarrollo de esta tesis así como el esquema de un cronograma de actividades a realizar.

Capítulo II

Planteamiento del problema

Este capítulo permitirá abordar el porqué del desarrollo del sistema HK_Pixqui, así como los requerimientos que se necesitan para su implementación. Esto con el fin de poder definir de manera introductoria las funciones principales que tendrá dicho sistema.

2.1. Introducción

Uno de los elementos principales de las plataformas suborbitales, es el sistema capaz de monitorear las variables físicas a las que ésta es sometida, las cuales pueden ser aceleración angular y lineal, temperatura, presión, consumo de energía (voltajes, corrientes), entre otros. Aunado a ello, una de las funciones primordiales de dicho sistema, es la capacidad de monitorear una carga útil, esta característica es el porqué del uso de plataformas, pues su validación implica saber el comportamiento de la carga durante el vuelo, las temperaturas que experimenta durante el viaje, así como el consumo de potencia. Es ante esto que surge la necesidad de diseñar un sistema electrónico que permita el monitoreo de las variables físicas antes descritas, además de proporcionar un control de activación/desactivación sobre los sistemas de alimentación de energía de la plataforma. También, es necesario que el sistema pueda interactuar y comunicarse con diversos dispositivos mediante diversos protocolos de comunicación.

Con base en lo descrito anteriormente se busca realizar el diseño, construcción, integración y validación del sistema HK_Pixqui para su uso en vuelos estratosféricos, el cual contará con la lógica para la lectura y procesamiento de los datos de los subsistemas que conforman el instrumento. Así como también el control inteligente y activo del encendido de subsistemas y la generación y administración de alarmas y comandos, para la interpretación y almacenamiento de datos durante el vuelo de PIXQUI.

2.2. Requisitos del sistema HK_Pixqui

El sistema HK_Pixqui tendrá las interfaces necesarias para poder establecer la comunicación con diversos sistemas, además de realizar el monitoreo de variables físicas. En el diagrama de la figura 2.1 se muestra la arquitectura e interacción que tendrá el sistema HK_Pixqui con los diversos subsistemas que conformarán la plataforma.

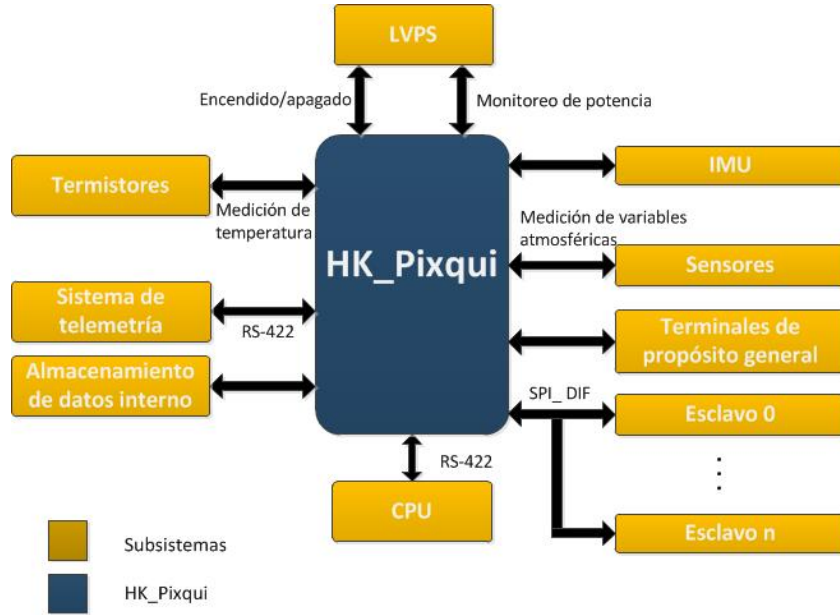


Fig. 2.1. Arquitectura del sistema HK_Pixqui

De tal forma que el HK_Pixqui deberá contener las interfaces mostradas en la tabla 2.1, los cuales son las conexiones con los sistemas mínimos para su funcionamiento dentro de la plataforma.

| Sistema | Nomenclatura |
|---|--------------|
| Unidad central de procesamiento | CPU |
| Sistema de geolocalización GPS | GPS |
| Fuentes de alimentación de bajo voltaje | LVPS |
| Sistema de telemetría | TS |

Tabla 2.1. Subsistemas de la plataforma PIXQUI.

Los subsistemas que integrarán a la plataforma PIXQUI tienen las siguientes funciones:

- La unidad central de procesamiento (CPU: *Central Processing Unit*), será un sistema autónomo que proveerá al HK_Pixqui de comandos en caso de alarmas detectadas durante el vuelo. Así también podrá solicitar información sobre el estado las variables físicas y de las fuentes de alimentación monitoreadas.
- El sistema de geolocalización (GPS: *Global Positioning System*), permitirá al HK_Pixqui conocer e informar su localización, tanto al sistema CPU y a la estación terrena mediante el sistema de telemetría.
- Fuentes de alimentación de bajo voltaje (LVPS: *Low Voltage Power Supply*), se trata del sistema de alimentación de toda la plataforma suborbital. La interacción de este conjunto de fuentes con el HK_Pixqui es esencialmente en el monitoreo de los voltajes y corrientes que suministra a la carga útil, así como su encendido y apagado en caso de ser necesario.

- Sistema de Telemetría (TS: *Telemetry System*), será el sistema de comunicación a tierra con el cual el HK_Pixqui podrá transmitir la información adquirida en las diferentes etapas de monitoreo, tanto de variables físicas como de procesos.

De manera general, el HK_Pixqui tiene la tarea de encender/apagar cada uno de las fuentes de alimentación de bajo voltaje (LVPS) con las que contará la plataforma, así como la verificación del estado de encendido/apagado de las mismas. Es responsable de la supervisión voltaje y corrientes en el sistema LVPS, además de contar con una etapa de adquisición de señales de sensores analógicos tales como termistores, sensores de presión, humedad y una unidad de medición inercial (IMU). Contará con conexiones de comunicación serie, para la transmisión y recepción de comandos con las siguientes interfaces: CPU, Telemetría (para la comunicación con tierra). Así también, se plantea implementar conexiones bajo los protocolos: RS-422, RS-232 y SPI, esto con la finalidad de proveer al HK_Pixqui de la capacidad de comunicarse con diversos sistemas bajo estos protocolos.

2.3. Cronograma de desarrollo

En la tabla 2.2 se muestra el cronograma de desarrollo del sistema HK_Pixqui. En ésta se presentan las diversas etapas que se han de efectuar para poder tener un prototipo validado capaz de ser puesto a prueba en un vuelo estratosférico, a saber:

- i. Se ha considerado una etapa de documentación acerca del estado actual del desarrollo de plataformas estratosféricas y de los sistemas de monitoreo empleado en ellas, esto con el fin de conocer las condiciones atmosféricas y las consideraciones que se deben tener en el diseño electrónico.
- ii. Una vez determinados los requerimientos y condiciones que deberá soportar la plataforma, y seleccionado los componentes a emplear, se plantea un periodo en el cual se desarrollarán pruebas con el microcontrolador a emplear y con ello tener un mejor manejo de éste.
- iii. También se ha contemplado el desarrollo de sistemas o bancos de prueba que permitan probar las diversas interfaces, ya que dado que la plataforma estará constituida por diversos sistemas, es necesario ir validando los diversos protocolos que se emplearán en está.
- iv. Finalmente desarrollar un prototipo y validarlo bajo diversas pruebas en laboratorio.

| | | Cronograma de desarrollo | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--|--------------------------|----|----|----|----|----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Desarrollo | | 2014 | | | | | | 2015 | | | | | | | | |
| | | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 |
| Documentación | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Requerimientos técnicos del prototipo | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Manejo del microcontrolador | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Definición de interfaces y hardware | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Diseño y validación de software | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pruebas de laboratorio en protoboard | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Diseño de bancos de prueba | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Interacción con bancos de prueba | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Diseño de PCB's del prototipo | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fabricación del prototipo | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ensamble del prototipo | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pruebas de vacío y ciclado térmico | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabla 2.2. Cronograma de desarrollo del sistema de monitoreo.

Una vez definido el proyecto al cual estará destinado el desarrollo del HK_Pixqui, en el siguiente capítulo se abordará de manera general el problema a resolver en el presente trabajo, así como los requisitos principales a los que tendrá que dar respuesta el sistema, para con ello poder realizar una propuesta y efectuar un diseño de éste.

Capítulo III

Fundamentos teóricos

En este capítulo se abordarán los conceptos fundamentales requeridos en el desarrollo del presente trabajo. Se tocarán temas referentes a sistemas de monitoreo y adquisición de datos, así como de dispositivos digitales, microcontroladores y protocolos de comunicación serie.

3.1. Sistemas de monitoreo y adquisición de datos

En primera instancia es necesario definir lo que es un sistema, entendiéndose a éste como el conjunto de elementos, en este caso eléctrico, electrónico y mecánico, para la realización de procesos y tareas determinadas. De tal forma que de manera general, un sistema de monitoreo y de adquisición de datos se puede definir como un conjunto de elementos electrónicos, mecánicos y dispositivos lógicos cuya función es la de adquirir y registrar una o varias señales físicas del entorno del sistema, así como información del o de los procesos en ejecución para posteriormente realizar un procesamiento de datos y efectuar tanto su representación gráfica como acciones de control de acuerdo a los requerimientos del proceso.

En la figura 3.1 se pueden observar los elementos generales con los que un sistema de monitoreo y adquisición de datos cuenta, los cuales se pueden englobar en:

- i. **Bloque de sensado o de entrada de señales (sensores digitales y/o analógicos):** Se trata de un bloque encargado de adquirir las señales de entorno, tanto analógicas como digitales, las cuales son medidas mediante sensores y cuyo procesamiento y proceso de tratamiento depende de su naturaleza.
- ii. **Acondicionamiento de señales:** Bloque encargado de adaptar la señal de tal forma que se pueda adquirir de la mejor manera posible.
- iii. **Multiplexaje de señal:** Este bloque permite incrementar la capacidad de entradas que puede poseer el sistema de monitoreo, dependiendo de las necesidades del proceso a estudiar.
- iv. **Convertidor analógico-digital:** Es el encargado de realizar la transformación de la señal adquirida de manera analógica en una señal digital, para su uso en un proceso digital por el sistema.
- v. **Adquisición, procesamiento y almacenamiento digital:** Bloque que realiza las operaciones pertinentes con la información recolectada para la toma de decisiones y acciones, así como del registro de comportamiento del sistema a lo largo del proceso.
- vi. **Transmisión y/o exposición:** Bloque encargado de mostrar el comportamiento del sistema monitoreado y de las variables de estudio.

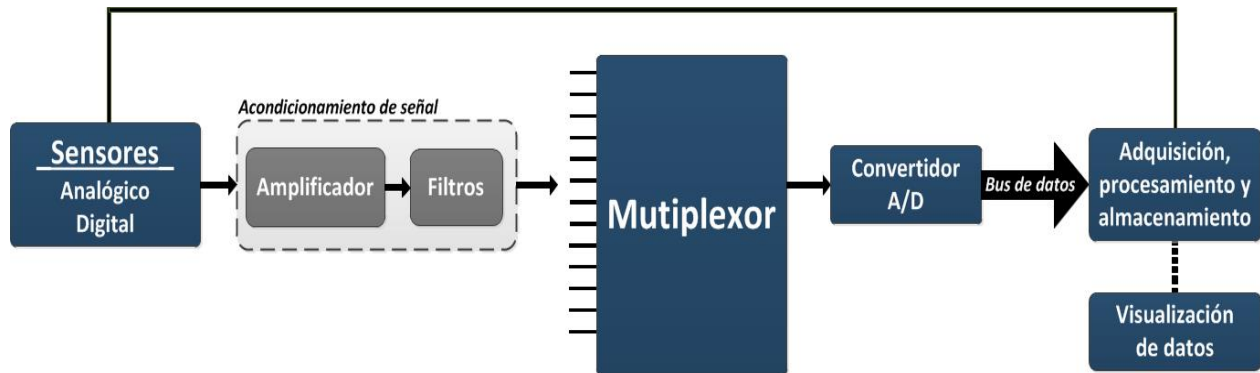


Fig. 3.1. Sistema de monitoreo y adquisición de datos.

3.1.1. Sensores

En un sistema de adquisición de datos uno de los elementos fundamentales es el dispositivo encargado de adquirir la señal de entrada, es así que el o los sensores son dispositivos que tienen como función la de convertir una señal de magnitud física, como lo es la temperatura, la presión, la humedad, en una señal de naturaleza eléctrica, óptica o digital [3].

En el diseño de sistemas de adquisición de datos es necesario el considerar diversos aspectos para la selección de sensores, entre los que se encuentran:

- i. **Tipo o naturaleza de la señal que el sensor va a adquirir.** Se refiere al tipo de señal física que ha de medirse en el entorno, esto con el fin de seleccionar de forma correcta el dispositivo y tener una medición óptima.
- ii. **Tipo o naturaleza de la señal que el sensor entregará.** Como se mencionó anteriormente, el sensor es un dispositivo que produce datos eléctricos, ópticos o digitales derivados de un evento físico. De tal forma que el tipo de salida es un aspecto importante ya que la señal entregada por el dispositivo debe ser acondicionada de forma correcta, por lo que el conocer el tipo de señal permitirá la selección del tipo de acondicionamiento, el método de conversión, así como el hardware auxiliar para su procesamiento.
- iii. **Resolución.** Es la magnitud de los cambios en escalón de la señal de salida al ir variando continuamente la medida en todo el campo, de tal forma que se puede decir que es el cambio más pequeño en la variable física que le es posible registrar.
- iv. **Calibración.** Proceso por el cual se realiza el ajuste de la salida de un instrumento (sensor) a valores deseados dentro de una tolerancia específica para valores particulares de la señal de entrada. Es así que este proceso permite definir las características estáticas y dinámicas del sensor. Lo anterior permite conocer su comportamiento, para con ello tener la respuesta de éste y saber si se tiene una respuesta lineal o no. Lo cual permitirá conocer la sensibilidad del sensor, pues este parámetro se observa en la curva de calibración, en donde si ésta es recta, es un indicativo que la sensibilidad es constante y el sensor responde de manera lineal.

- v. **Exactitud.** Se entiende como la cualidad del sensor de entregar lecturas próximas al valor verdadero de la magnitud medida, de tal forma que es la diferencia entre el valor medido y el valor real y suele expresarse de manera porcentual.
- vi. **Precisión.** Parámetro que define al grado de repetitividad que presenta el sensor, es decir, la cualidad de entregar lecturas muy próximas unas a otras.
- vii. **Tiempo de respuesta.** El cual es el periodo que transcurre desde que la variable sensada presenta un cambio y el sensor lo detecta.
- viii. **Histéresis.** En un sensor es la capacidad que tiene el sensor para seguir a la curva de salida ideal debido a la tendencia de los cambio de la variable física. También es posible entender esta característica como el desvío del valor de salida en un mismo punto cuando se realizan calibraciones en dirección opuestas.

Sensores digitales y sensores analógicos

Existen diversos tipos de sensores, sin embargo una clasificación general de estos se realiza mediante el tipo de señal de su salida, con lo cual se tienen sensores analógicos y sensores digitales.

Sensores analógicos

Un sensor analógico es un dispositivo que produce una señal de salida continua o tensión, la cual es generalmente proporcional a la magnitud de la variable medida.

Sensores digitales

Los sensores digitales o mejor dicho sensores inteligentes según la IEEE, están definidos en el estándar IEEE 1452.1 como aquel sensor que provee funciones más allá de las necesarias para genera una correcta representación de una cantidad sensada o controlada. Este tipo de sensores producen una salida de señal discreta ya sea digital o voltajes que son una representación digital de la magnitud de la variable medida.

El grado de integración que poseen este tipo de sensores está relacionado a los bloques de control que lo componen es así que la arquitectura de estos puede estar compuesta por:

- Acondicionadores de señal
- Correctores de ganancia, *offset* y linealidad
- Compensadores de temperatura
- Filtros paso-bajas, paso-altas o paso-banda
- Bloque de auto-diagnóstico
- Protocolos de comunicación digital

Sensores de temperatura

La temperatura es una variable que va asociada a la energía cinética de las partículas que posee un objeto, mientras más alta sea más caliente estará el objeto, es decir poseerá una temperatura mayor.

En los sistemas de adquisición de datos, el monitoreo de esta variable es importante, no sólo como una variable de entorno, sino también como una variable presente en el propio sistema, ya que los dispositivos que lo conforman producen calor y dado el caso es necesario conocer dicho parámetro para un correcto funcionamiento del propio sistema. De manera general, la medición de la temperatura se realiza empleando alguna de las propiedades físicas de los cuerpos, que cambian en relación a la temperatura. Entre dichas propiedades se encuentran:

- Variación en el estado de la materia
- Variación en la resistividad del material
- Radiación generada por el material

Teniendo así varios métodos e instrumentos con los cuales medir dichos fenómenos, de los cuales los de tipo termoelectricos son los de interés de estudio, ya que realizan la conversión de la variable física a un equivalente eléctrico, esto gracias al aprovechamiento de las propiedades eléctricas de los conductores y semiconductores de los que están hechos. Este tipo de dispositivos a su vez se dividen en termistores, termopares, bulbos de resistencia eléctrica, pirómetros, entre otros. En la tabla 3.1 se observa un comparativo general entre cada uno de éstos.

| Sensor | Ventajas | Desventajas |
|---|--|---|
| Termistor | Respuesta rápida Alta sensibilidad Fácil implementación | No presenta linealidad Requiere fuente de corriente externa Presenta auto calentamiento Rango relativo de temperatura |
| Termopar | Fácil implementación Bajo costo Amplio rango de temperaturas | No presenta linealidad Amplitud de señal de salida bajo Requiere de una referencia Estabilidad baja Sensitividad baja |
| RTD (<i>Resistance temperatura detector</i>) | Alta estabilidad Alta precisión Amplio rango de temperatura | Costo alto Respuesta lenta Requiere fuente de corriente Presenta baja variación de resistencia |
| Circuito integrado | Presenta una linealidad alta Amplitud de señal de salida alta Bajo costo | Requiere fuente de alimentación Respuesta lenta Presenta auto calentamiento Disposición mecánica complicada |

Tabla 3.1. Ventajas y desventajas de sensores termoelectricos.[4]

De los dispositivos antes descritos, el que resulta de sumo interés para su estudio y aplicación es el termistor aunque cuenta con un rango relativo de temperatura, éste se encuentra dentro de las condiciones esperadas, además de que también presenta fácil implementación en relación a costo y electrónica auxiliar igualmente de que cuenta con una respuesta rápida lo cual permitirá al sistema contar con una lectura y determinación de eventos de manera inmediata.

Termistor

El termistor es dispositivo, el cual el valor de su resistencia está en función de los cambios de temperatura que presenta el entorno. Su construcción está basada en materiales semiconductores tales el germanio o el silicio o bien de una mezcla de óxidos de cobalto, níquel o manganeso entre otros.

Existen dos tipos de termistores: termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*), en el cual el principio de funcionamiento consisten en que al aumentar la temperatura en el material semiconductor, se incrementan el número de portadores de carga reduciendo con ello la resistencia. Mientras que para el termistor PTC (*Positive Temperature Coefficient*), la resistencia aumenta conforme también se incrementa la temperatura, ya que el semiconductor adquiere propiedades metálicas.

En la figura 3.2 se observa el comportamiento de la resistencia de ambos termistores en función de la temperatura.

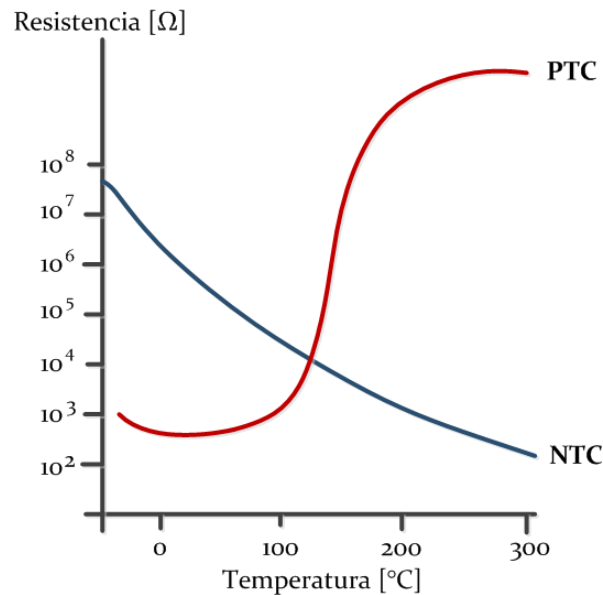


Fig. 3.2. Resistencia temperatura-resistencia de los termistores PTC Y NTC.

Con base en las curvas presentadas en la figura 3.2 se puede decir que los termistores no presentan un comportamiento lineal, es por ello que se hace uso de modelos matemáticos para interpretar su

comportamiento, los cuales permiten describir la curva característica de estos dispositivos y con ello determinar la temperatura sensada.

Basándose en la figura, se observa que el termistor PTC se puede emplear cuando se requiere un cambio drástico en la resistencia a una temperatura específica. Mientras que el termistor NTC permite tener un cambio continuo de resistencia para un rango de temperatura. De tal forma este último se adapta a los requerimientos del sistema.

En la figura 3.3 se observa con más detalle las curvas características de varios termistores NTC con diferente β , los cuales serán los dispositivos de estudio e implementación.

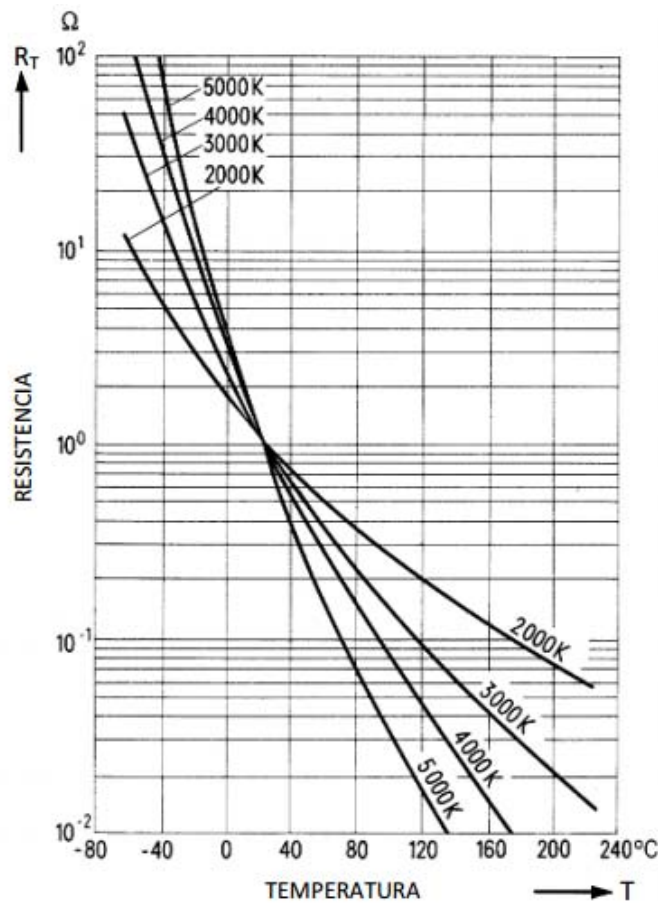


Fig. 3.3. Curvas características de termistores NTC.

Para los termistores de tipo NTC se pueden manejar dos ecuaciones, las cuales son:

- i. Ecuación beta, la cual es un modelo matemático en el que la relación entre temperatura y resistencia se considera de manera exponencial, ecuación 3.1

$$R_T = R_0 e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

En donde:

- R_T : Es la resistencia del termistor a la temperatura T en Kelvin.
 - T_0 : Es la temperatura de referencia en Kelvin, generalmente es 298 [K].
 - R_0 : Se trata de la resistencia relacionada a la temperatura de referencia T_0 .
 - β : Se trata del parámetro principal entregado por el fabricante. La cual está determinada por la composición y la estructura del material usado en el dispositivo y físicamente expresa una resistencia característica a una temperatura definida. Y su valor oscila entre 2000 [K] y 5000 [K].
- ii. Modelo *Steinhart-Hart*, se trata de una aproximación de tercer grado que permite tener mediciones de temperatura más exactas, ya que describe con mayor detalle la curva característica del termistor. En la ecuación 3.2 se observa la ecuación de *Steinhart-Hart*, la cual es usada ampliamente en mediciones.

$$\frac{1}{T} = a + b \ln R_T + c (\ln R_T)^3 \quad \text{Ecuacion 3.2}$$

En donde:

- a, b, c : Son coeficientes característicos obtenidos mediante la resolución de un sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas, generado a partir de la ecuación 3.2, en el cual R_T es medido para tres temperaturas diferentes espaciadas a un mínimo de 10° C.

Sensores inerciales

El sensor inercial es un dispositivo de medir el movimiento experimentado por éste, de tal forma capaz de registrar la aceleración lineal mediante un dispositivo llamado acelerómetro y el movimiento o aceleración angular a lo largo de uno o varios ejes mediante un dispositivo llamado giróscopo.

Acelerómetro

Se trata de un sensor que puede ser empleado de modo estático para determinar la inclinación y vibración que experimenta un objeto, mientras que en modo dinámico permite determinar la aceleración lineal o traslaciones del objeto.

Estos sensores están basados en transductores piezoresistivos, piezoeléctricos o capacitivos, de tal forma que sin importar el tipo de transductor empleado, la respuesta a la salida del sensor será de tipo lineal. En la figura 3.4 se muestra la arquitectura base de este tipo de sensores, en cuyo principio físico en el cual está basado es en emplear una masa móvil, la cual al presentarse una aceleración en el entorno, ésta se desplaza de manera proporcional al cociente entre la fuerza aplicada y la rigidez del cuerpo.

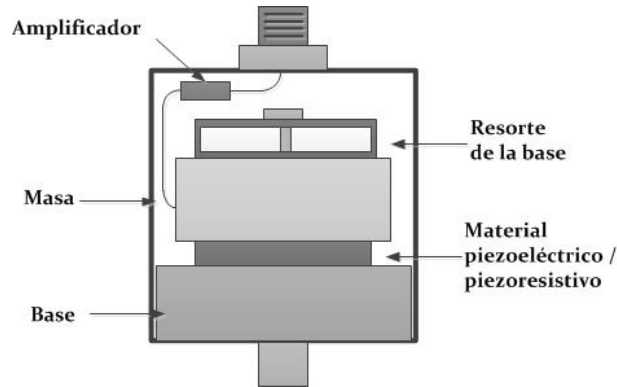


Fig. 3.4. Arquitectura de acelerómetro.

Los sensores a emplear para el proyecto son de tipo capacitivo. En estos microsistemas, la masa móvil es un electrodo, mientras que el otro electrodo del capacitor se mantiene fijo, de tal forma que al presentarse una vibración en el exterior, el movimiento de la masa móvil produce un cambio en la capacitancia, la cual es transformada internamente para poder contar con una señal de fácil medición, generalmente se trata de volts.

La unidad física que miden estos dispositivos se denomina g, la cual es una variable adimensional que representa cuantas veces ha sido aplicada la aceleración de la gravedad ($9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$).

Giróscopo

Este sensor permite realizar la relación entre la rotación que experimenta un cuerpo y una señal eléctrica. Un giróscopo de estado sólido está formado por un cuerpo que presenta una simetría en su rotación, de tal forma que suponiendo que una masa se desplaza dentro del chip a una velocidad, cuando al chip se le aplica un momento de fuerza, este girará a una velocidad angular. Esta combinación de movimientos rotacional y lineal genera la llamada fuerza de Coriolis, que será perpendicular al eje de movimiento lineal inicial.

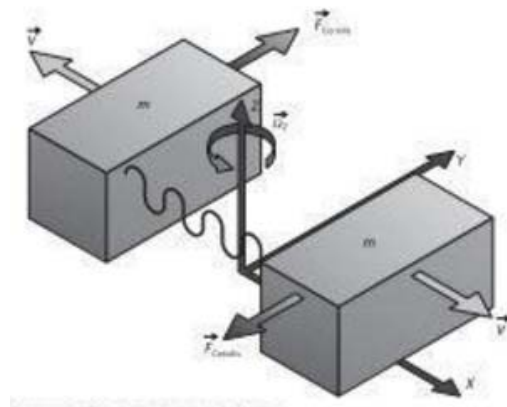


Fig. 3.5. Arquitectura de giróscopo.

La arquitectura más empleada, figura 3.5, para este tipo de sensores es un par de masas con movimiento de vaivén, teniendo así que por ejemplo, para los sensores con principio de transducción de capacitancia variable, las masas móviles constituyen los electrodos de los capacitores, la variación de desplazamiento y de capacitancia, se logra debido a la fuerza de Coriolis presente en cada masa.

Sensores de presión

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmosferas, mientras que para el Sistema Internacional está normalizada en pascales.

En el mercado se pueden encontrar diversos tipos de sensores de presión de acuerdo a su arquitectura, tales como los constituidos únicamente por elementos mecánicos, así como los que están constituidos por elementos electromecánicos, de tal forma que el presente trabajo se emplearan estos últimos debido a sus dimensiones. Es así que el sensor que se busca emplear es un dispositivo que transforma la fuerza aplicada en un área determinada a una señal eléctrica, esto mediante un diafragma interno.

En la figura 3.6 se muestran las diferentes clases de presión que los sensores miden comúnmente en la industria.

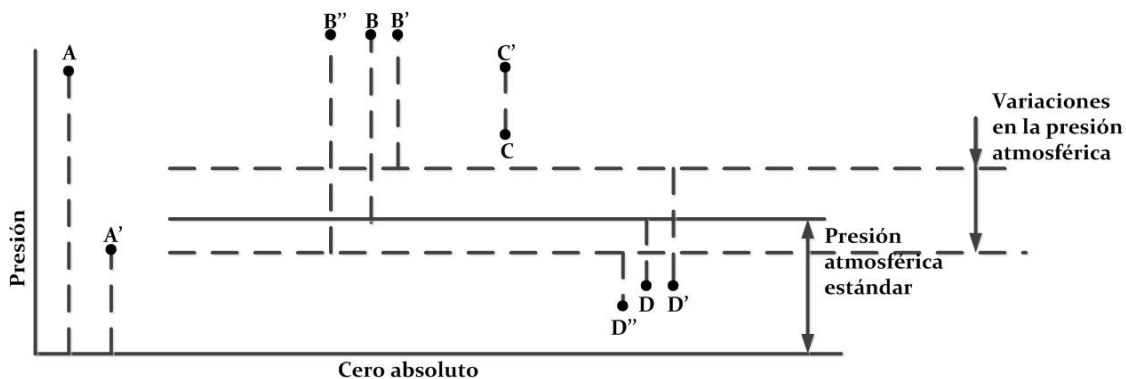


Fig. 3.6. Tipos de presiones.

- La presión absoluta es la presión que es medida con relación al cero absoluto de presión (A y A').
- La presión atmosférica es la presión ejercida por la atmósfera terrestre. Esta presión cambia con la altitud, a mayor altitud menos presión. A nivel del mar, esta presión es próxima a 100kPa y estos valores definen la presión ejercida por la atmósfera estándar.
- La presión relativa es la determinada por un elemento que mide la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica del lugar donde se efectúa la medición (B). Cabe señalar que al aumentar o disminuir la presión atmosférica, disminuye o aumenta respectivamente la presión leída (B' y B'').

- La presión diferencial es la presión que mide la diferencia entre dos presiones, puntos C y C'.
- En relación al vacío, se puede definir dependiendo de su alcance:
 - i. Vacío relativo, también conocida como presión negativa o vacío negativo. Presión menor a la presión atmosférica local, medida con respecto a la presión atmosférica.
 - ii. Cero absoluto, el cual es la presión nula que se obtendría en el caso ideal de la ausencia de moléculas.
 - iii. Vacío absoluto, el cual es el vacío médico con respecto al cero absoluto, como una presión absoluta, menor a la presión atmosférica.
 - iv. Bajo vacío, presión absoluta de gas en el alcance de 100kPa a 100Pa.
 - v. Medio vacío, presión absoluta de gas en el alcance de 100Pa a 0.1Pa.
 - vi. Alto vacío, presión de gas en el alcance de 0.1Pa a 10uPa.

De tal forma que para el proyecto se empleará un sensor que mida presión absoluta, el cual está constituido como se muestra en la figura 3.7.

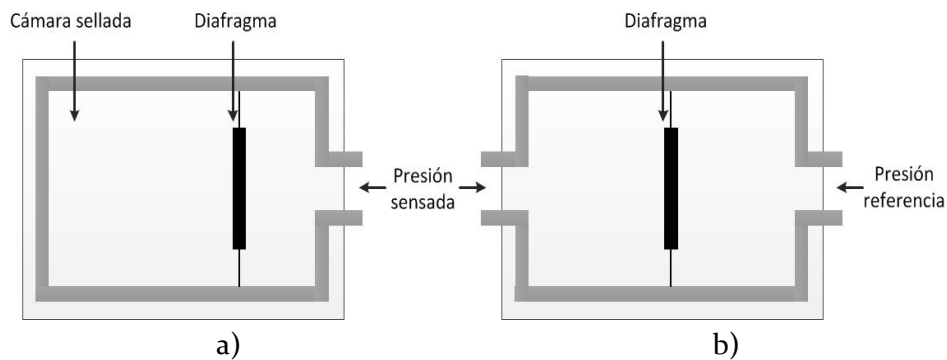


Fig. 3.7. Construcción mecánica de sensores de presión: a) absoluta b) diferencial.

La construcción de este sensor se basa en una cámara sellada, en la cual se presenta una presión de referencia, la que por general es la presión de vacío, esto con el fin evitar compensaciones por la variación de temperatura en la cámara de referencia debido a los cambios de temperatura.

3.1.2. Almacenamiento de datos

El almacenamiento de datos, aunque no es un elemento obligatorio en el esquema de un sistema de adquisición, resulta muy útil para tener una base de datos, la cual pueda ser consultada para poder analizar el comportamiento del proceso.

Existen diversos dispositivos que permiten realizar un soporte de la información adquirida, tales como memorias RAM(*Random Access Memory*), ROM (*Read-Only Memory*), FLASH, discos

duros, tarjetas de memoria SD (*Secure Digital*), entre otros. De este grupo de dispositivos, los que son de interés para el presente trabajo son las memorias ROM y la tarjetas de memoria SD.

Para el presente proyecto, solo se cuenta con el requerimiento de tener un sistema capaz de almacenar datos para su posterior análisis. De tal forma que se cuenta con una amplia gama de dispositivos para poder realizar esta función. Sin embargo, para la selección de un dispositivo a implementar, se ha decidido utilizar una memoria SD, ya que presenta la posibilidad de transferir los archivos del sistema de monitoreo a una computadora portátil de una manera sencilla.

Memoria EEPROM

Es un tipo de memoria reprogramable cuya información puede ser modificada mediante medios eléctricos, es decir, mediante el propio circuito de lectura y escritura es posible alterar su contenido, sin necesidad de extraerla del sistema. Presenta tiempo de acceso largos para el proceso de escritura y lectura, ya que en la modificación o revisión de un valor se hace de localidad en localidad.

Tarjetas de memoria SD (Memoria *Secure Digital Card*)

Las tarjetas de memoria o *memory card*, son dispositivos de almacenamiento electrónico de datos de estado sólido. Esto se debe a que se trata de una memoria *flash*, la cual está basada en dos tecnologías:

- Tecnología NOR: Esta tecnología provee capacidades de acceso aleatorio rápido para datos de tamaño pequeño, como un *byte* individual para su recuperación.
- Tecnología NAND: Desarrollada después de la tecnología NOR. En esta tecnología se tienen acceso secuencial para escritura y lectura de datos en páginas individuales, sin embargo, no se puede recuperar un *byte* individual como con la anterior tecnología.

En el mercado es posible encontrar distintos tipos de memorias *SD Card*, los más comunes que se tienen son:

- *Smart Media (SM) Card*
- *Memory Stick (MS) Card*
- *Secure digital (SD) Card*

Actualmente las memorias *SD Card* son las más empleadas en los diversos equipos tecnológicos de entretenimiento, de cómputo y equipo portátil. Su capacidad de almacenamiento en un inicio era de 4 MB a 4 GB, sin embargo, el desarrollo tecnológico hace posible encontrar actualmente memorias con capacidad de 32 GB e inclusive 2 TB.

Dentro de las memorias *SD Card* es posible clasificarlas en dos categorías, basados en la capacidad de almacenamiento de datos: *Standard SD Card* y *High-Capacity SD Card*.

i. Standard SD Card

Se trata de un grupo de memorias cuya capacidad está dentro del rango de 4 MB a 4 GB, en la figura 3.8 se puede observar los tres formatos físicos que se puede encontrar en el mercado:

- a. Normal SD: Memoria que cuenta con un interruptor físico de seguridad para proteger la escritura y la eliminación de datos de manera accidental. Su tasa de transferencia oscila entre 15 a 20 MB/s. El voltaje de operación es de 2.7 a 3.6 V y una capacidad de almacenamiento de datos de 16 MB a 4 GB.
- b. MiniSD: A diferencia de la memoria anterior, no cuenta con un interruptor de seguridad. Su tamaño es menor pero eso no es sinónimo de que su capacidad disminuya, ya que su capacidad de almacenamiento está entre 16 MB y 8 GB. Su tasa de transferencia es de 15 MB/s y de igual manera opera con un voltaje de 2.7 a 3.6 V.
- c. MicroSD: Es similar a la memoria miniSD, es decir, posee una tasa de transferencia de 15 MB/s, su voltaje de operación es de 2.7 a 3.6 V. Sin embargo, difiere en las dimensiones físicas, ya que es más pequeña además de que las capacidades son de 16 MB a 32GB.

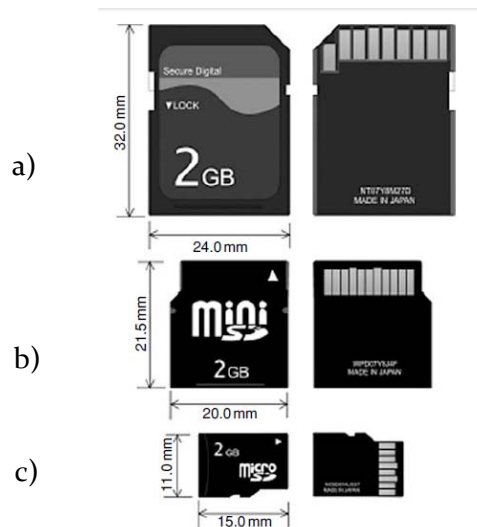


Fig. 3.8. Memorias SD Card. a) Normal SD b) Mini SD c) MicroSD.

ii. High-Capacity SD Card

Las memorias *High-Capacity SD Card* (SDHC) son una ampliación del formato *Standard SD Card*. Éste tipo de memorias posee una capacidad ampliada, con lo cual se pueden encontrar tarjetas de 2 GB hasta 32 GB.

En relación al tamaño físico que poseen este tipo de memorias, se tiene de igual forma tres tipos, los cuales son los mismos formatos mostrados para las memorias *Standard SD Card*.

Dentro de las características que poseen las memorias SDHC se tienen:

- Gran capacidad de almacenaje de datos
- Tasa de transferencia de datos alta
- Compatibilidad en aspecto físico con el *Standard SD Card*

Además se cuenta con una clasificación basada en la tasa de transferencia, las cuales se definen como *Speed Class Ratings*. Dichas clases son:

- Clase 2: Tasa de transferencia de 2 MB/s
- Clase 4: Tasa de transferencia de 4 MB/s
- Clase 6: Tasa de transferencia de 6 MB/s

Interfaz de la memoria *SD Card*

En la figura 3.9 se observa la configuración de terminales de las memorias *SD Card*.

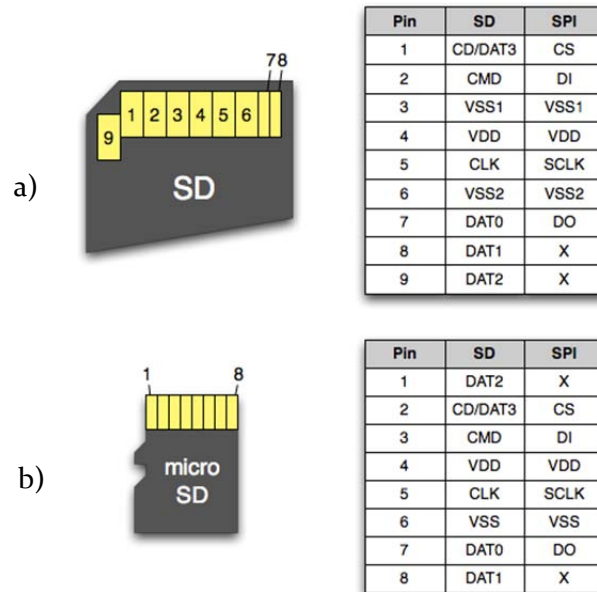


Fig. 3.9. Configuración de terminales en memoria a) *Normal SD* b) *microSD*.

Para la memoria *microSD* se tienen 8 terminales mientras que para la memoria *Normal SD* se cuenta con 9 terminales. Estas terminales están asociadas a los modos de comunicación, por lo que dependiendo del modo seleccionado, cada una adquirirá una función determinada como se observa en la figura anterior. Este tipo de memorias puede trabajar bajo dos modos, uno el *SD Bus mode* y el *SPI Bus mode*.

De manera general los modos de comunicación con las memorias *SD Card*, consisten en:

- *SD Bus mode*: Se trata del modo de operación nativo en el cual se usa la totalidad de las terminales de la memoria. En dicho modo la transmisión de datos se hace empleando las

terminales (DAT0- DAT3), una terminal de reloj (CLK) y una terminal para comandos (CMD).

- *SPI Bus mode*: Es el modo más usado comúnmente, en el cual la transferencia de datos se realiza mediante dos terminales, siendo la terminal DO la línea de salida de datos mientras que la terminal DI es la línea de entrada, además es necesario una línea de reloj (CLK) y una terminal de selección de dispositivo (CS).

3.2. Comunicación serie

En un sistema de adquisición datos resulta de suma importancia el contar con protocolos de comunicación que permitan la interacción con otros. Uno de estos protocolos es la comunicación serie, que es un método que permite la transferencia de información secuencial entre dos o más sistemas. En este protocolo es necesario el establecimiento de un dispositivo como maestro, el cual será el encargado de enviar y coordinar la comunicación y transferencia de información a los dispositivos esclavos, los cuales serán los receptores de dichos datos.

En la comunicación serie existen diversos tipos de conexión para el intercambio de información, entre los que se encuentran:

- *Modo simplex*
- *Modo Full-Duplex*
- *Modo Half-Duplex*

Modo Simplex

En la figura 3.10 se observa el modo de comunicación simplex, en el cual la transferencia de información es un único sentido, del maestro al receptor.

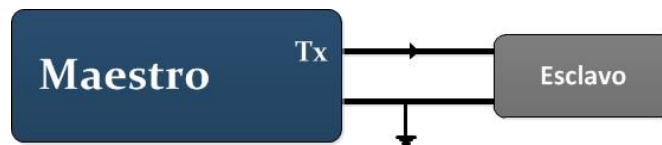


Fig. 3.10. Modo *Simplex*.

Modo Full-Duplex

El modo *Full-Duplex*, el cual se observa en la figura 3.11, corresponde a un tipo de conexión en el cual la comunicación fluye de tal manera que hay un intercambio de información entre maestro y esclavo.

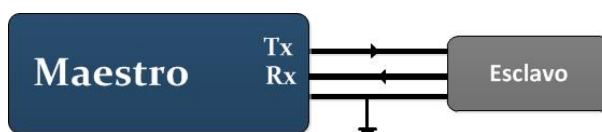


Fig. 3.11. Modo *Full-Duplex*.

Modo Half-Duplex

En la figura 3.12 se muestra la conexión en modo *Half-Duplex*, en la que la transmisión de datos se hace de manera alternada, es decir, mientras el maestro transmite datos el esclavo no puede realizar transmisión y de forma inversa.

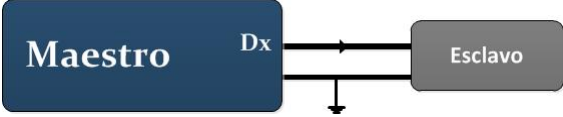


Fig. 3.12. Modo Half-Duplex.

De igual forma se tienen topologías para realizar la interfaz entre los dispositivos, las cuales corresponden al modo en el que las líneas de conexión se conectarán entre maestro(s) y esclavo(s). Estas topologías se muestran en las figuras 3.13 a 3.15. En la figura 3.13 se representa la topología punto a punto, en la cual únicamente se cuenta con un maestro y un esclavo; en la figura 3.14 se tiene la topología *Multi-Drop*, la cual corresponde a una configuración entre un maestro y varios esclavos y finalmente en la figura 3.15 se tiene la topología Multi-punto, en la cual se cuenta con un *bus* por el cual pueden ser conectados diversos maestros y varios esclavo.

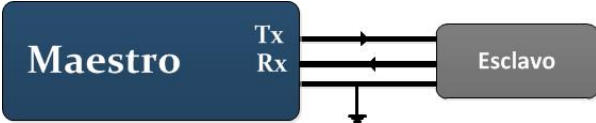


Fig. 3.13. Topología Punto a Punto.

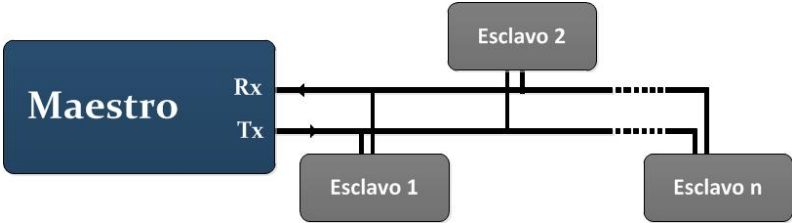


Fig. 3.14. Topología Multi-Drop.

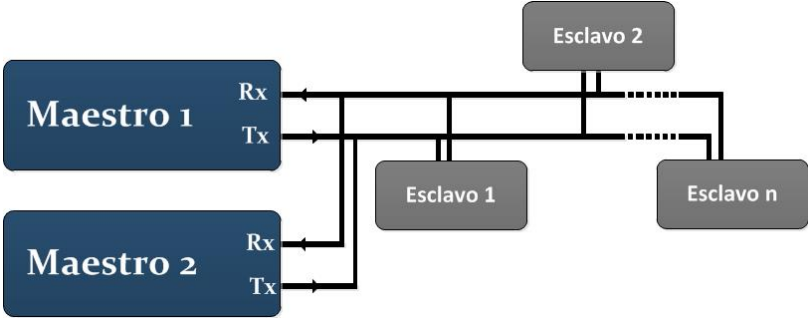


Fig. 3.15. Topología Multi-punto.

3.2.1. Comunicación serie asíncrona

La comunicación serie asíncrona se trata de un proceso en el cual la transmisión de información entre el emisor y el receptor se realiza sin contar con una línea dedicada de reloj, esto para la sincronización de datos, ya que dicha sincronización se efectúa mediante *bits* contenidos en el paquete de información transmitido entre los dispositivos, los cuales permiten identificar el inicio y fin de los datos.

Para establecer una comunicación serie asíncrona es necesario establecer ciertos parámetros; los cuales son requerimientos entre los sistemas para poder efectuar un intercambio correcto de datos. Estos parámetros son:

- Velocidad de transmisión: parámetro que indica el número de bits por segundo que han de transmitirse, se denomina generalmente *baudrate*.
- Número de bits de datos: Indica el número de bits que contendrá el paquete que se ha de enviar en cada proceso de transmisión, por lo generalmente se envían 8 bits.
- Bit de inicio: Bit que provee al receptor un indicativo de que el proceso de transmisión se iniciará.
- Bits de parada: Bits que indica el fin de transmisión y que permiten la sincronía en el proceso de comunicación.
- Paridad. Se refiere a la posibilidad de comprobar si existe un error en la transmisión. Entre los tipos de paridad que se encuentran son: par, impar, marcada y espaciada, además de nula, la cual en esencia es no usar dicho bit.

3.2.2 Comunicación serie síncrona

En la comunicación serie síncrona el transmisor y receptor sincronizan el envío de información de acuerdo a una señal de reloj, este tipo de comunicación no requiere los bits de inicio y parada. Además, en este protocolo se tiene la capacidad de enviar paquetes de información más grandes. En este tipo de comunicación se tiene los estándares SPI (*Serial Peripheral Interface*) y el I²C (*Inter-Integrated Circuit*).

Estándar SPI

El estándar SPI (*Serial Peripheral Interface*) es un protocolo de comunicación serie de tipo *Full-Duplex* y topología *Multi-Drop*, en el cual la interfaz entre maestro y esclavo está definida por cuatro líneas, que son:

- i. Línea MOSI (*Master Output Slave Input*): Línea en la cual el maestro transmitirá los datos hacia el esclavo.
- ii. Línea MISO (*Master Input Slave Output*): Línea por la cual el maestro recibirá la información proveniente del esclavo

- iii. Línea SCK (*Serial Clock*): Es la línea que permite la sincronía en la transmisión de datos, ya que es la frecuencia de referencia para el maestro y el esclavo.
- iv. Línea de selección CS (*Chip Select*): Esta línea permite controlar el destino de la información que ha de enviar el maestro, ya que selecciona al esclavo con el cual se establecerá la comunicación.

En la figura 3.16 se observa la arquitectura básica de este estándar, en el cual el número de líneas incrementará a razón del número de esclavos que se deseen conectar, por lo que el número de dispositivos con lo que se puede comunicar el maestro, dependerá de su capacidad de contar con las suficientes líneas de selección CS.

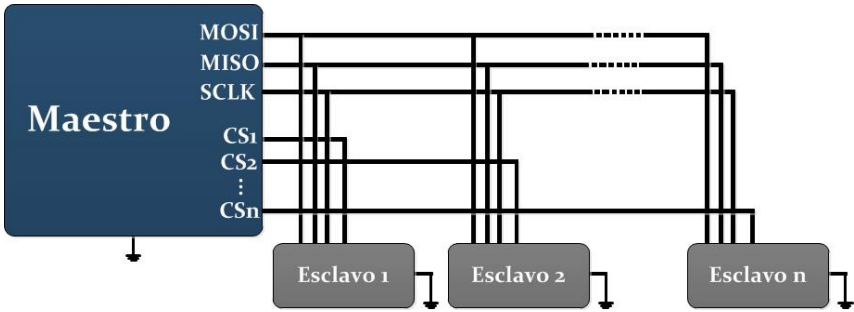


Fig. 3.16. Estándar SPI.

El procedimiento para establecer una comunicación, bajo el protocolo SPI, consiste en primero definir el modo en que operará. Existen cuatro modos de operación, los cuales básicamente definen los momentos en los cuales la línea MOSI cambiará de estado en relación con la línea SCLK, además de determinar en qué momento se realizará la muestra del dato en la línea MISO en relación con la línea SCLK. En la figura 3.17 se observan los oscilogramas de los modos de operación del protocolo SPI:

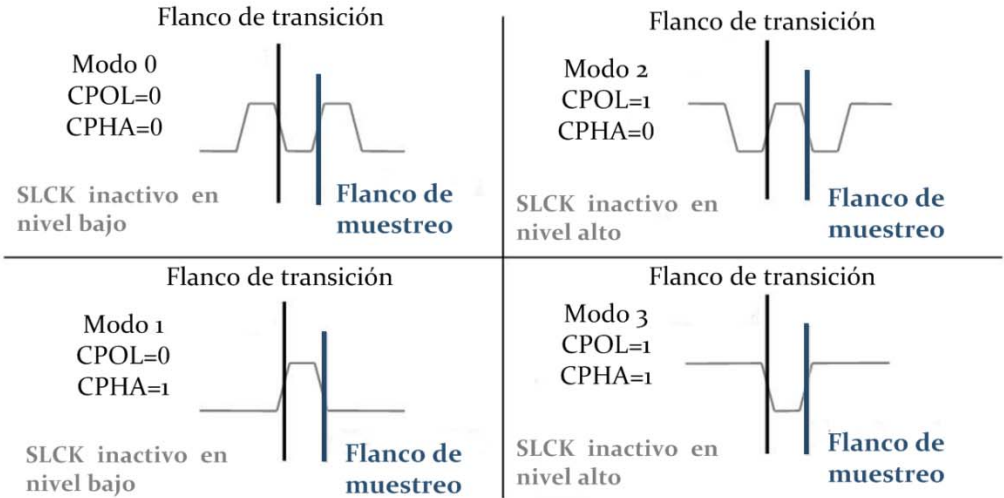


Fig. 3.17. Modos de operación del protocolo SPI.

- i. **Modo 0:** En este modo el reloj se encuentra en nivel bajo, de tal forma que el dato es muestreado en el flanco de subida del reloj.
- ii. **Modo 1:** Modo en el cual el reloj se encuentra en nivel bajo y la muestra se realiza en el flanco de bajada del reloj.
- iii. **Modo 2:** Modo en el cual el reloj está en nivel alto y la muestra se realiza en el flanco de bajada del reloj.
- iv. **Modo 3:** Para este modo el reloj se encuentra en nivel alto y la muestra del dato se efectúa en el flanco de subida del reloj.

Estándar I2C

El estándar I2C (*Inter-Integrated Circuit*) es un protocolo de comunicación serie, el cual es de tipo *Half Duplex* y a su vez utiliza la topología *Multi-Drop*. Este estándar fue desarrollado por *Philips*, sin embargo, gran número de compañías ya cuentan con diversos dispositivos electrónicos que lo utilizan.

La comunicación entre los dispositivos en este estándar es de tipo maestro-esclavo. Para lo cual se emplean dos líneas bidireccionales: SDA y SCL, además de una línea de referencia GND, cuyas funciones son:

- i. Línea de datos SDA (*Serial Data*): Por esta línea se efectúa la transferencia bidireccional de datos del maestro al esclavo y viceversa.
- ii. Línea de reloj SCL (*Serial Clock*): Esta línea es la encargada de la sincronización entre esclavo y maestro para la transmisión de datos
- iii. Línea de referencia GND: Línea de referencia para los niveles lógicos manejados en la transmisión de datos.

En la figura 3.18 se observa la conexión del *bus* I2C. A diferencia del estándar SPI, se observa que el número de esclavos no afecta el número de líneas necesarias para la comunicación, sin embargo, esto no es sinónimo de poder colocar un número indeterminado de esclavos, ya que las especificaciones del protocolo I2C [5] establece que la capacitancia máxima del *bus* no supere los 400pF, ésta se calcula mediante la suma de la capacitancia aportada por cada uno de los esclavos, valor que viene especificado en la hoja técnica de éstos.

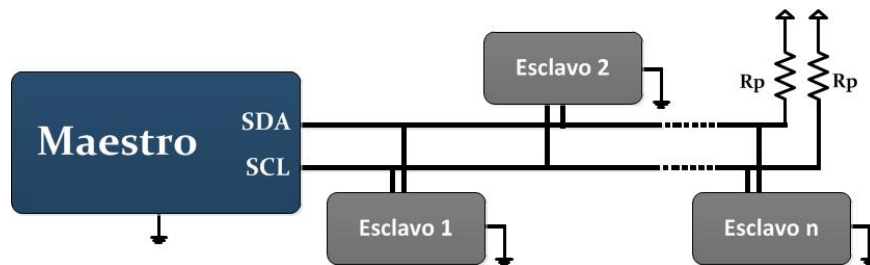


Fig. 3.18. Conexión estándar de dispositivos en el *bus* I2C

Los dispositivos que trabajan bajo el protocolo I2C, son circuitos integrados cuyas terminales de comunicación son de tipo de drenaje abierto, lo cual implica que sea necesario polarizarlas en un estado alto, esto mediante los resistores de *pull up* (R_p). De acuerdo al estándar el valor de los resistores R_p es un parámetro importante a considerar en el diseño, ya que un valor pequeño mejora la sensibilidad al ruido, además de disminuir el tiempo de flancos de subida y bajada de las señales, permitiendo con ello incrementar la velocidad de transmisión. Sin embargo, un valor demasiado pequeño implica un aumento en el consumo de potencia.[5]

Para el cálculo de los valores de los resistores de pull-up se deben considerar dos factores:

- i. Voltaje de polarización
- ii. Capacitancia del bus

En las especificaciones del estándar I2C, se establece que el estado lógico bajo (“0” lógico) está definido por un voltaje; el cual se define V_{IL} , menor a 30% del voltaje de polarización, mientras que el estado lógico alto (“1” lógico) es un voltaje V_{IH} por encima del 70% del voltaje de polarización.

El voltaje de polarización limita el valor mínimo de R_p para el cual los dispositivos en el bus pueden hacer caer el voltaje a un estado “0” lógico. Un valor alto de R_p impedirá que los dispositivos sean capaces de generar un estado bajo, esto debido al divisor generado entre el resistor de pull-up y la resistencia del MOSFET. Este último dato no se proporciona típicamente, en su lugar los fabricantes de dispositivos proporcionan la máxima corriente de salida (I_{OL}) que puede drenar la terminal del transistor, esto para tener un voltaje máximo de salida (V_{OL}) en estado bajo.

De tal forma que la ecuación 3.3 permite determinar el valor de resistor considerando dichos parámetros:

$$R_p(\text{mín}) = \frac{(V_{CC} - V_{OL}(\text{máx}))}{I_{OL}} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

En donde:

- R_p (mín): es el valor mínimo que podrá tener la resistencia *pull-up*
- V_{CC} : es el voltaje de alimentación al cual se conectarán las resistencias de *pull-up*.
- V_{OL} (máx): es el nivel máximo de tensión para el cual el dispositivo reconocerá la señal como un estado lógico bajo.
- I_{OL} : es la corriente de salida para la señal de estado lógico bajo.

Para múltiples dispositivos en el bus, el R_p mínimo es determinado por el dispositivo con la corriente I_{OL} más baja.

El valor máximo que pueden tener los resistores R_p está limitado por la capacitancia del *bus* de comunicación (C_b) y por la máxima velocidad a la cual se transmitirá la información. Ya que el resistor R_p y la capacitancia C_b tienen una constante de tiempo RC , lo cual limita el tiempo de subida de las señales. Por lo que el valor estará determinado por la ecuación 3.4.

$$R_p(\text{máx}) = \frac{t_r}{(0.8473 \times C_b)} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

En donde:

- R_p (máx): es el valor máximo que podrá tener la resistencia *pull-up*.
- C_b : es la capacitancia en el bus
- t_r : es el tiempo de rizado de las señales en las líneas SDA y SCL.

Donde C_b será la capacitancia acumulada por los esclavos, sin embargo, para un cálculo más riguroso es necesario considerar factores como las pistas de PCB entre otros conectores, para lo cual es necesario sondas de capacitancia.

Mientras que estará definido por:

$$t_r = t_2 - t_1 \quad \text{Ecuación 3.5}$$

De donde:

$$t_1 = V_{IL} \times RC = 0.3V_{cc} \times RC \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$t_2 = V_{IH} \times RC = 0.3V_{cc} \times RC \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Por lo que el valor de los resistores R_p , deberán cumplir con el rango establecido para los dos casos expuestos.

Modos de comunicación

En la figura 3.19 se puede observar la forma de las señales para enviar y recibir información a través del *bus* I2C, así como las condiciones de inicio y paro de transmisión de datos.

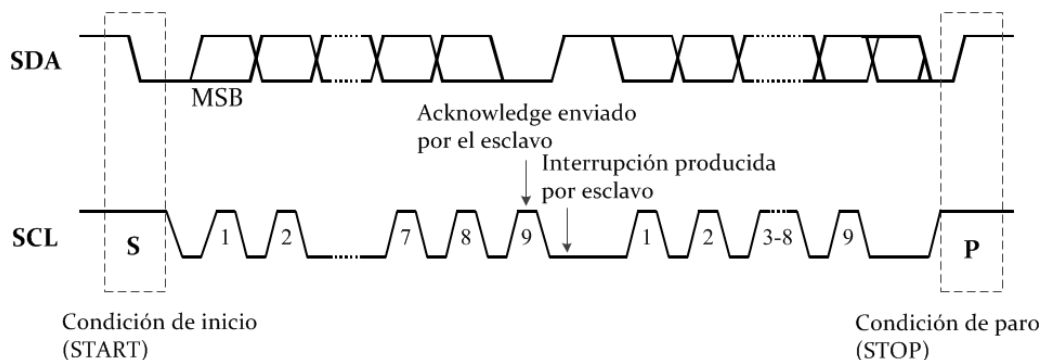


Fig. 3.19. Protocolo I2C.

Las consideraciones necesarias para el manejo del protocolo I2C son esencialmente el modo en el cual se va a operar:

- Modo Estándar: Se tiene una tasa de transmisión de 100 kbit/s.
- Modo rápido: Su tasa de transmisión es de 400 kbit/s.
- Modo de alta velocidad: Se puede transmitir con una velocidad de 3.4 Mbit/s.

Los pasos para establecer la transmisión de datos entre el maestro y el esclavo son los siguientes:

1.- Generación en el bus de la condición de Inicio de transmisión (*START*), la cual consiste en hacer que el maestro realice una transición de un nivel alto a bajo en la línea de SDA, mientras que el nivel de la línea SCL está en alto.

2.- Se envía un byte, el cual corresponde a la dirección de esclavo, la cual es un indicador único en el bus de cada uno de los dispositivos conectados. Seguido de ello se envía un bit de escritura o lectura, según sea la acción a realizar en el esclavo. Este bit cuando tiene un valor de “0” lógico indica una escritura, mientras que un “1” lógico indicará que se realizará una lectura del esclavo.

3.- A continuación, se envían los bytes que se deseen transmitir, cada uno de ellos precedidos por un bit de reconocimiento (*acknowledge*), el cual es enviado por el esclavo y leído por el maestro, esto para confirmar que el dato ha sido recibido.

4.- Una vez que se han transmitido todos los datos, el maestro genera una condición de fin (*STOP*) de transmisión, la cual consiste en realizar una transición de un estado bajo a un estado alto en la línea SDA, mientras el nivel de la línea SCL se encuentra en alto.

Al finalizar este capítulo se tienen los conceptos básicos que se han de emplear en el desarrollo del proyecto de esta tesis. En el siguiente capítulo se abordarán los requisitos del sistema de monitoreo, también se desarrollara la arquitectura de diseño propuesta, *hardware* y *software* necesario para su implementación.

Capítulo IV

Desarrollo y diseño del sistema

HK_Pixqui

En este capítulo abordaremos los requerimientos de diseño del sistema HK_Pixqui para la plataforma suborbital PIXQUI. Además se tratarán y expondrán las pruebas de validación de las diversas interfaces y periféricos usados, las cuales se realizaron en el laboratorio, así como de prototipos y bancos de prueba desarrollados.

La plataforma suborbital PIXQUI estará constituida por una góndola que contendrá tanto el sistema HK_Pixqui desarrollado, las baterías, el sistema de potencia, la computadora central y el sistema de telemetría. Aunado a esto tendrá destinado un espacio para la carga útil, el cual es el porqué de desarrollar el sistema.

4.1. Metodología empleada

En el desarrollo del proyecto se empleará la siguiente metodología:

- i. Análisis de requerimientos mecánicos, eléctricos y electrónicos del sistema.
- ii. Selección de componentes con base en los requerimientos, con disponibilidad en el mercado y bajo costo.
- iii. Desarrollo de interfaces digitales y analógicas, así como de prototipos y tarjetas electrónicas para realizar pruebas de componentes electrónicos a usar en el modelo final.
- iv. Desarrollo de bancos de prueba para la validación de las interfaces de comunicación con los sistemas CPU y TS.
- v. Desarrollo de la lógica de funcionamiento.
- vi. Diseño y fabricación del prototipo final.
- vii. Ensamble del prototipo final y pruebas de laboratorio para su validación.
- viii. Depuración del código de operación y entrega de un software final para el prototipo.

4.2. Filosofía de operación

El sistema HK_Pixqui tendrá como principales funciones: el encendido y apagado de las fuentes de alimentación de bajo voltaje (LVPS) y por ende, tendrá el control de encender o apagar los sistemas con los que interactúan dichas fuentes. Sumado a esto, contará con terminales para la adquisición de señales analógicas, las cuales estarán destinadas al monitoreo de voltajes y

corriente de las fuentes de alimentación, así como de termistores, dispuestos a lo largo tanto del gabinete del HK_Pixqui, como de la góndola. Dichos termistores estarán colocados de tal manera que pueda supervisarse el estado térmico de los dispositivos críticos y de estudio (en el caso de la carga útil) durante el vuelo de la plataforma.

En relación a interfaces entre el sistema de monitoreo y otros dispositivos, es necesaria la disposición de dos puertos de comunicación serie, los cuales estarán destinados para los siguientes sistemas: CPU (*Central Processing Unit*) y TS (*Telemetry System*).

4.3. Requerimientos y especificaciones

El HK_Pixqui junto con el sistema CPU y TS, forman la parte central de procesamiento de información y toma de decisiones dentro de la plataforma, de tal forma que el HK_Pixqui permitirá:

- Registrar condiciones de entorno y posición de la plataforma durante vuelo
- Sincronizar los diversos sistemas que interactúan en la plataforma
- Supervisar y garantizar la integridad de los sistemas y carga útil
- Gestionar el almacenamiento de datos de la plataforma
- Informar de eventos de funcionamiento propios del vuelo

4.3.1. Requisitos mecánicos

En cuanto a la parte mecánica, el módulo gabinete es un estándar denominado *eurorack*, figura 4.1, el cual ha sido seleccionado debido a que estos gabinetes han sido empleados en anterioridad en el proyecto *EUSO-BALLOON*, es por eso que ya sabiendo su comportamiento y desempeño en misiones como ésta, se ha decidido seguir empleando dicha estructura mecánica para el almacenamiento del HK_Pixqui.

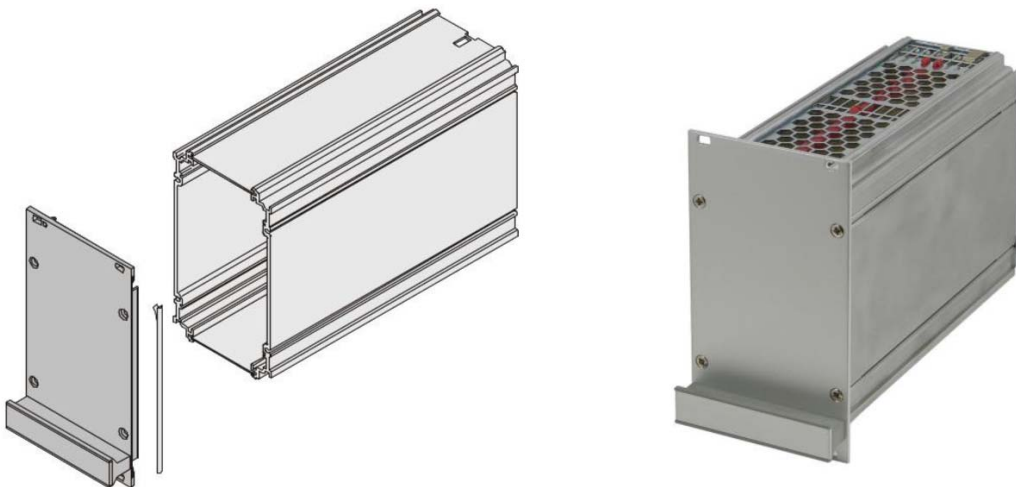


Fig. 4.1. Gabinete para el sistema HK_Pixqui.

El gabinete cuenta con las siguientes dimensiones:

- Panel frontal:
 - a. Alto: 128.4 mm (3U)
 - b. Ancho: 141.9 mm (28HP)
- Profundidad: 227 mm
- Volumen efectivo:
 - a. Alto: 120 mm
 - b. Ancho: 135 mm
 - c. Profundidad: 220 mm

4.3.2. Condiciones de operación

Dado que se está desarrollando una plataforma suborbital que empleará globos estratosféricos para su operación, el instrumento funcionará en la troposfera y estratosfera a lo largo del vuelo. De tal forma que el HK_Pixqui deberá operar bajo las siguientes condiciones:

- Altitud: 0 a 40 km.
- Rango de temperaturas: De acuerdo al perfil estandarizado de temperatura de la atmosfera se espera operar dentro -30°C a 50°C . [4].
- Presión: 1013 a ≈ 3 mbar.

De tal forma que todos los dispositivos electrónicos tendrán que cumplir con el rango de temperaturas establecido, además de que tendrán que ser validados en condiciones de presión en una cámara de vacío para garantizar su correcto funcionamiento durante vuelo.

4.3.2. Interfaces de comunicación digital y señales analógicas

En el diagrama de la figura 4.2 se muestra la arquitectura e interacción que tendrá el *Housekeeping* con los diversos sistemas que conformarán la plataforma suborbital PIXQUI, a saber:

- Comunicación SPI (*Serial Peripheral Interface*), se ha propuesto una interfaz SPI para que el sistema sea capaz de comunicarse con dispositivos seriales. Para esta interfaz se han contemplado el manejo de 6 esclavos conectados al procesador,
- Comunicación UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), se implementará tres módulos de comunicación UART, cuyas funciones serán las siguientes:
 - i. UART 0: Este módulo se destinará para establecer la comunicación con el sistema CPU. De manera general, la información que se ha de transmitir en esta interfaz es la relacionada a las lecturas analógicas de los sensores con los que cuenta el sistema HK, sí como las lecturas de los estados de las fuentes de alimentación con las que contará PIXQUI.

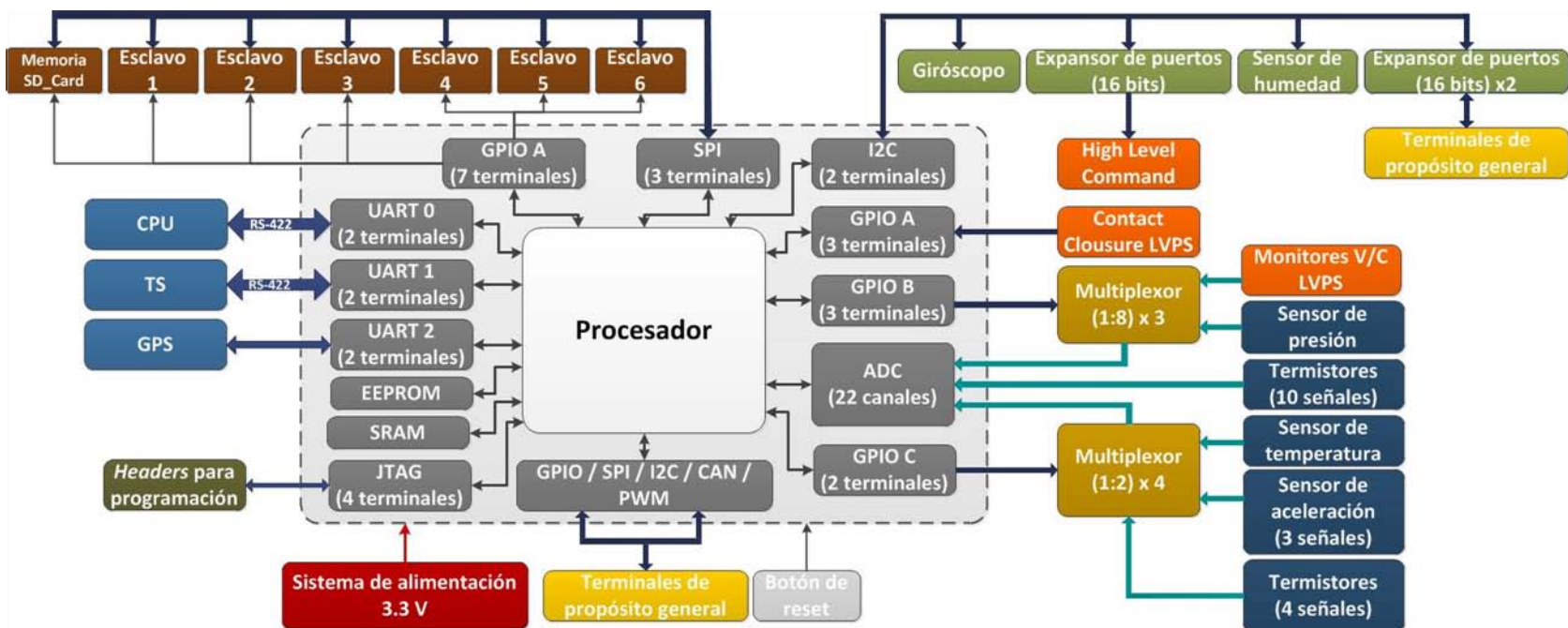


Figura 4.2. Arquitectura del sistema HK_Pixqui.

- ii. UART 1: Para la comunicación con el sistema de telemetría, se implementará un segundo módulo de comunicación UART, el cual permitirá establecer comunicación vía remota con el HK_Pixqui y conocer su estado de operación en la estación terrena.
 - iii. UART 2: Es el módulo que será el encargado de la comunicación serial con el GPS a emplear en la misión. Este protocolo es el que se ha decidido a usar, ya que es el tipo de comunicación típico que emplea un GPS.
-
- Terminales de programación, se trata de un conjunto de 4 terminales, con los cuales se tiene acceso al JTAG (*Joint Test Action Group*) y con ello la posibilidad de programar el microcontrolador.
 - Botón de restablecimiento, es una implementación física mediante un interruptor de contacto momentáneo, para la generación de la señal de restablecimiento (*reset*) del microcontrolador.
 - Terminales de propósito general, se trata de terminales de propósito general disponibles. Esto con el fin de dar versatilidad a la plataforma, pues permite contar con terminales en caso de ser necesarias.
 - ADC (*Analog to Digital Converter*), es un periférico interno dentro del microcontrolador, el cual posee 22 canales, con una resolución de 12 bits. Sin embargo, la cantidad de señales a monitorear estimadas exceden la capacidad del convertidor, es por ello que se plantea la utilización de multiplexores para incrementar los canales para las posibles mediciones analógicas a realizar.
 - Comunicación I2C (*Inter-Integrated Circuit*), se implementará el protocolo I2C y con ello poder posteriormente incorporar un giroscopio y un sensor de humedad. Además de contar con expansores de puertos para el encendido y apagado de las fuentes de bajo voltaje (LVPS).

4.4. Propuesta y diseño del sistema de monitoreo

El diseño del sistema de monitoreo, y la propuesta de componentes a emplear, se abordará con base en los requerimientos técnicos ya mencionados, además de describir el desarrollo y funcionamiento de los prototipos y bancos de prueba para la validación de la lógica del HK_Pixqui.

4.4.1. Selección del dispositivo lógico de control

Para la selección del dispositivo de procesamiento y control se han considerado diversos microcontroladores para uso, tomando en cuenta para ello las consideraciones de interfaces y el tipo de condiciones atmosféricas a las cuales se someterá el dispositivo, así como los periféricos,

capacidad en memoria RAM y la velocidad a la que puede operar. Es así que hecho la selección del microcontrolador TM4C123GH6P de la empresa Texas Instruments, el cual pertenece a la familia TIVA, ya que en este primer prototipo se busca implementar microcontroladores ARM, con el fin de validar su desempeño en este tipo de misión. Aunque la empresa cuenta con una línea de microcontroladores de calificación aeroespacial, se ha decidido usar la familia TIVA como primer aproximación en el uso de este tipo de microcontroladores ya que cumple con los requerimientos técnicos tanto en rangos de operación, así como de periféricos necesarios. Además, esta familia de microcontroladores está pensada para su uso en aplicaciones de monitoreo y control a un bajo costo.

El microcontrolador (MCU) seleccionado cuenta con un procesador ARM Cortex M4, en la figura 4.3 se observa la arquitectura del procesador además de los periféricos con los que cuenta.

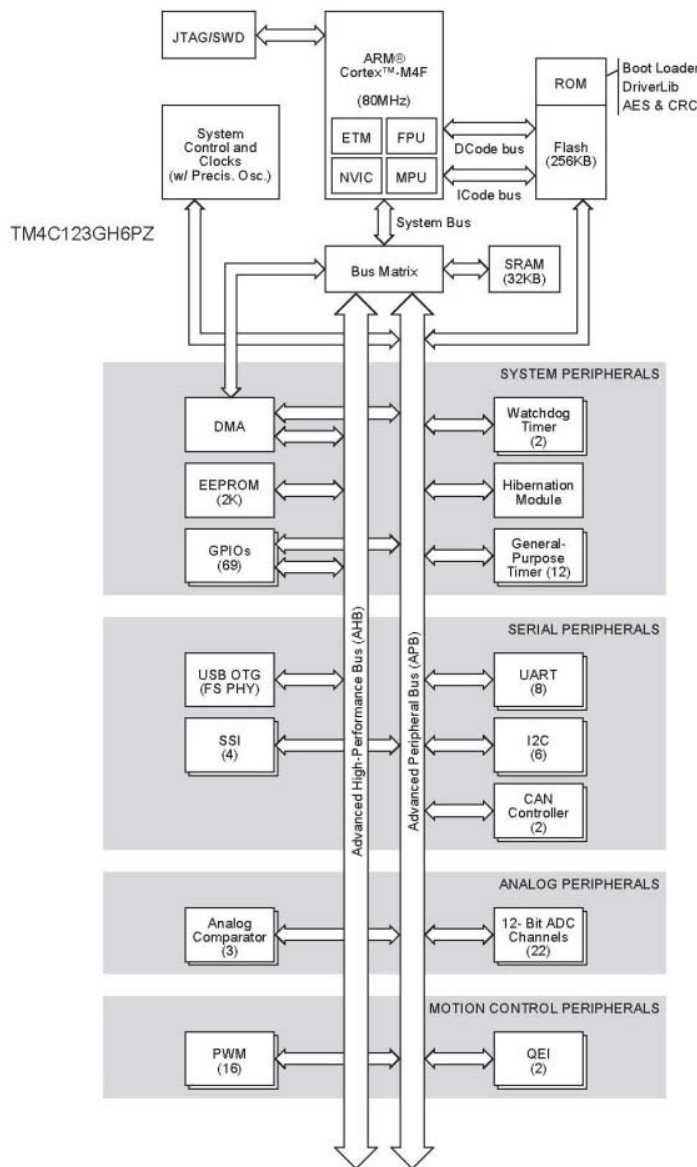


Fig. 4.3. Arquitectura del microcontrolador TM4C123GH6PZ.[4]

Como primer punto a detallar, es el definir el significado de una arquitectura ARM. En una arquitectura ARM (*Advanced RISC Machine*) se tiene un dispositivo programable con un conjunto reducido de instrucciones de 32 bits. Este tipo de microcontroladores, y en el caso especial de la familia *Cortex*, permite un amplio rango de soluciones dado que cuenta con tres subfamilias que se adaptan a las necesidades que uno requiera:

- i. Serie *ARM Cortex-A*: Familia de procesadores de aplicaciones para sistemas operativos complejos
- ii. Serie *ARM Cortex R*: Familia de procesadores embebidos para sistemas de tiempo real
- iii. Serie *ARM Cortex M*: Familia de procesadores embebidos que son óptimos para aplicaciones de procesamiento rápido y bajo consumo de energía

Para el desarrollo del proyecto se empleará un MCU de la Serie *ARM Cortex M4*, el cual está especialmente diseñado para satisfacer las necesidades en diseños de automatización. Otra de las ventajas con las que cuenta esta familia, es su diseño, ya que se trata de una plataforma de bajo costo que satisface las necesidades de reducir el uso de memoria, mientras que presenta un desempeño computacional rápido en el manejo y respuesta de interrupciones.

Entorno al procesador con el que cuenta el MCU, dentro de la misma arquitectura *ARM Cortex*, se cuenta con los siguientes periféricos:

- **ETM (*Embedded Trace Macrocell*)**

Se trata de un módulo que se encarga de generar mensajes que reporta el detalle de la ejecución de instrucciones en tiempo real, de tal forma que esta información se obtiene mediante el hardware conectado al procesador, el cual almacena el evento y lo reporta a la herramienta de desarrollo en la computadora para su análisis.

- **FPU (*Floating Point Unit*)**

Se trata de una unidad que permite el manejo de operaciones matemáticas, la cual posee las siguientes características:

- i. Instrucciones de 32 bits para el procesamiento de operaciones
- ii. Hardware capaz de soportar: adición, sustracción, multiplicación y raíz cuadrada
- iii. 32 registros dedicados, de 32 bits, para el manejo y almacenamiento de datos durante operaciones

- **NVIC (*Nested Vectored Interrupt Controller*)**

Se trata de un controlador que permite el manejo de interrupciones anidadas. En este controlador el procesador apila automáticamente su estado en la entrada de excepción, lo cual permite retomarla sin una sobrecarga de la instrucción. Entre las características del controlador se encuentran:

- i. 78 Interrupciones
 - ii. Prioridad programable en niveles que van del 0 al 7, donde el nivel más alto corresponde a la prioridad más baja; por ejemplo, el asignar una interrupción con nivel “0” la convierte en una interrupción de alta prioridad.
 - iii. Re-priorización dinámica de las interrupciones
 - iv. Baja latencia en interrupciones
- **MPU (*Memory Protection Unit*)**

Se trata de una unidad que, como su nombre lo indica, protege a la memoria. Consiste en un bloque de hardware, que permite dividir el mapa de memoria en un número de regiones, configurando su ubicación, tamaño, permisos de acceso y atributos. Este periférico permite asignar a cierto bloque de memoria ciertos atributos, para que durante la ejecución de un proceso, la MPU analice los buses y el estado del procesador, y determinar si el acceso a dicho bloque es posible, y en caso de no ser posible, generar una excepción que responda a la irregularidad.

Finalmente, uno de los periféricos con el que cuenta el TM4C123GH6PZ que resulta de gran interés, dada la utilidad en relación a la transferencia de datos, es el DMA (*Direct Memory Access*).

- **DMA (*Direct Memory Access*)**

Mediante la memoria de acceso directo con la que cuenta el microcontrolador, es posible transferir directamente datos del ARM Cortex a diversos periféricos, lo cual significa un uso más eficiente del procesador y del ancho de banda con el que cuentan sus buses; esto es debido a que cuenta con un canal de comunicación para cada módulo.

Las características con las que cuenta este módulo son:

- i. Soporte para una transferencia entre: memoria-memoria, memoria-periférico, periférico-memoria
- ii. Controlador de 32 canales configurables.
- iii. Tamaños de paquete de datos de 8, 16 y 32 bits
- iv. Interrupción de finalización de transferencia, con una interrupción independiente por canal

4.5. Implementación y validación

Para la implementación de los diversos bloques que conforman e interactúan con el sistema HK_Pixqui, se ha hecho uso de la plataforma comercial *Launchpad Tiva* de *Texas Instruments*, figura 4.5; dicha tarjeta está basada en el microcontrolador TM4C123GH6PM. Además de esto, también se ha hecho uso de una tarjeta propia, diseñada de tal forma que se tiene acceso a la totalidad de todas las terminales del microcontrolador TM4C123GH6PZ.

La diferencia entre ambos microcontroladores reside únicamente en la cantidad de pines ya que internamente cuentan con la misma estructura y base, el cual se trata de un Cortex M4. La figura 4.4 permitirá entender la nomenclatura empleada por *Texas Instruments* y conocer de manera general los detalles del microcontrolador.

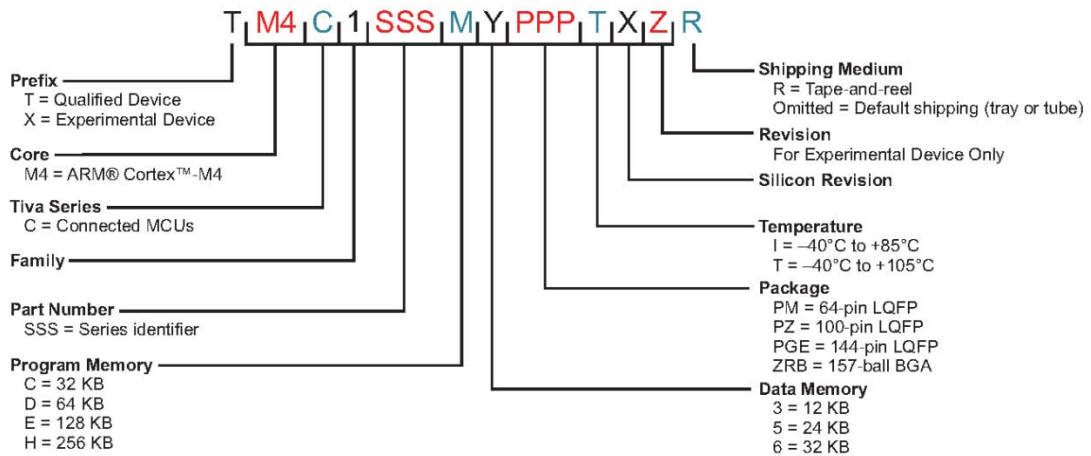


Fig. 4.4. Nomenclatura de microcontroladores TIVA.

En la figura 4.4, se observa cada uno de las siglas y números que componen la matrícula de los microcontroladores a emplear en el desarrollo de la tesis, de tal forma que el parámetro que diverge entre los dos microcontroladores es el relacionado al encapsulado del dispositivo, siendo PM el encapsulado de 64 terminales, mientras que PZ hace referencia a un dispositivo de 100 terminales, lo cual se traduce en más canales de comunicación tanto analógica como digital para el sistema a desarrollar. Es así que, el microcontrolador final a utilizar cuenta con las siguientes características:

- i. Núcleo ARM Cortex M4
- ii. Memoria de programa de 256 kB
- iii. Memoria de datos de 32 kB
- iv. Encapsulado LQFP de 100 pines
- v. Rango de temperatura de -40°C a 85°C

De tal forma que para el uso y programación del microcontrolador TM4C123GH6PZ se ha diseñado una tarjeta electrónica (PCB) para que se tenga la posibilidad de trabajar con todas las

terminales con las que cuenta el microcontrolador. En la figura 4.6 y 4.7 se visualiza la tarjeta diseñada en Altium Design, además del modelo físico desarrollado para pruebas.

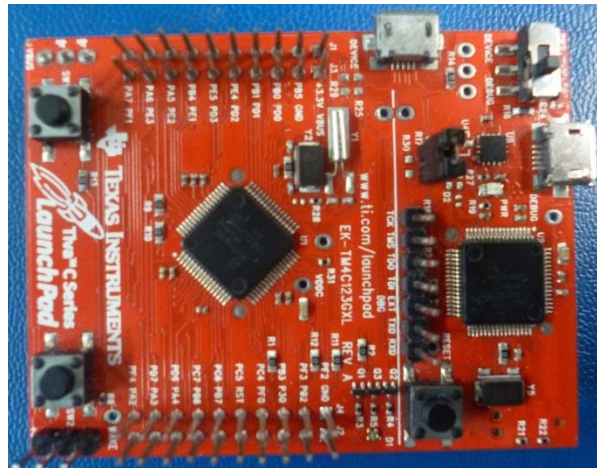


Fig. 4.5. Launchpad Tiva.

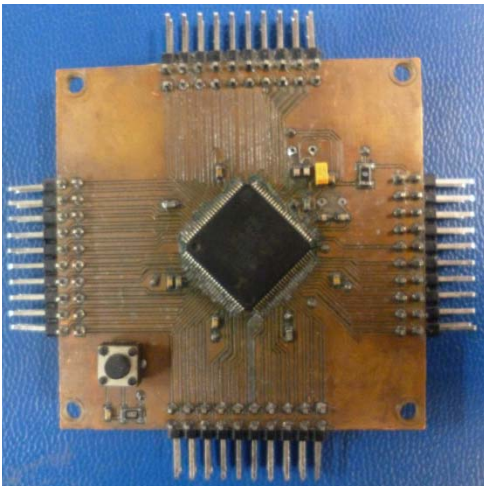


Fig. 4.6. Tarjeta electrónica

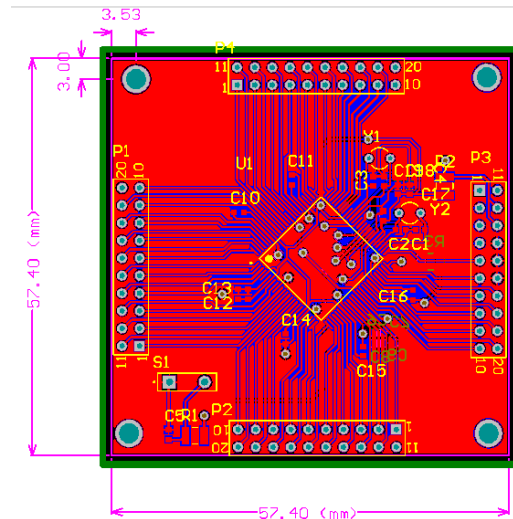


Fig. 4.7. Diseño de tarjeta basada en TM4C123GH6PZ.

Es con esto, que se han realizado la validación de las diversas etapas obteniendo los resultados que a continuación se explican.

4.5.1. Interfaz de señales analógicas

Uno de las tareas principales que ha de realizar el HK_Pixqui, es la adquisición de señales analógicas, las cuales serán las correspondientes a las temperaturas, voltajes y corrientes que manejan el instrumento, las cuales corresponden a 10 señales analógicas destinadas a los termistores, mientras que para el monitoreo de potencia son necesarias 12 señales analógicas. Además de éstas, el sistema monitoreará variables atmosféricas e inerciales, teniendo así un total de 25 señales analógicas a medir, número que rebasa la capacidad de canales del microcontrolador seleccionado.

Debido a que el número de canales del convertidor analógico propio del microcontrolador es insuficiente, y a que el sistema manejará tanto señales diferenciales como referenciadas, es necesario dividir el proceso de adquisición de datos.

Multiplexaje de canales analógicos

Como se mencionó anteriormente, el número de canales con los que cuenta el microcontrolador seleccionado es insuficiente por lo que para cumplir con el requisito de canales con los que contará el HK_Pixqui se ha determinado emplear un multiplexor analógico para poder medir las señales definidas (termistores y sensores del sistema), además de señales analógicas que se deseen cuantificar.

Es así que para expandir el número de señales analógicas, se ha seleccionado el circuito integrado (CI) TS3A5018, de *Texas Instruments*. Este CI contiene un conjunto de cuatro interruptores un polo- dos tiros (SPDT), los cuales presentan una resistencia típica de 10 *Ohms* en estado activado (ON), y cuyo rango de operación es de -0.5 a 4.6 V. Se ha seleccionado dicho dispositivo ya que permite duplicar el número de canales de manera tal que sólo es necesario una señal de control para seleccionar el canal a leer.

En la figura 4.8 se muestra el esquema de diseño que se ha de implementar para la validación del multiplexor empleado, la cual consistirá en verificar la conmutación de los interruptores internos ante el cambio en la terminal de habilitación de éste. En este diagrama a bloques se han conectado las terminales normalmente abiertas (NO [0-3]) de cada interruptor electrónico a la señal de tierra, mientras que las terminales normalmente cerradas del interruptor (NC [0-3]) se conectarán a una diferencia de potencial de 3.3V, para finalmente conectar las terminales centrales (COM [0-3]) directamente a los canales analógicos con los que cuenta el microcontrolador, esto con el fin de que mientras el interruptor se encuentra abierto se tenga una lectura de 0V, caso contrario se espera una lectura de 3.3V.

Mediante una computadora de escritorio (PC) se implementará un puerto de comunicación serie la cual permitirá visualizar las mediciones realizadas por el microcontrolador, así como el envío de la instrucción de conmutación hacia el MCU, el cual al recibir la orden pondrá en estado alto o en estado bajo la terminal de habilitación con la que cuenta el microcontrolador.

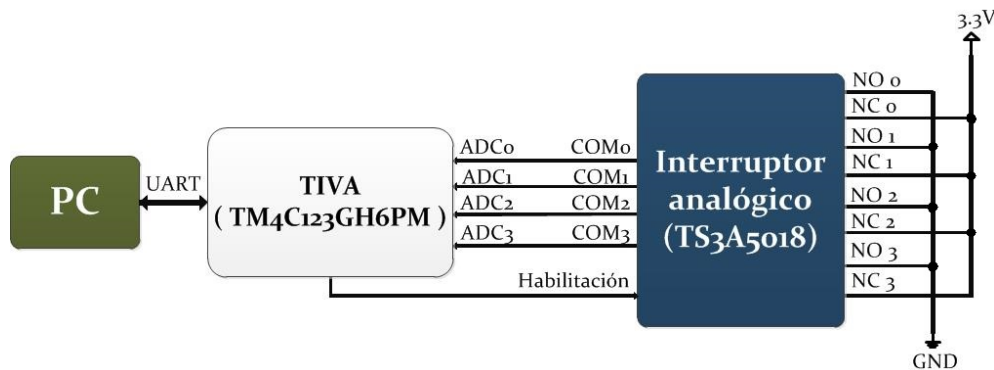


Fig. 4.8. Esquema de conexión.

En la figura 4.9 se muestra la implementación del circuito empleado, mientras que en la figura 4.9 se aprecian los resultados de las lecturas analógicas efectuadas por el microcontrolador.

Los resultados observados en la figura 4.10 muestran las lecturas realizadas por el microcontrolador en los dos estados en los que puede estar el multiplexor. El primer bloque de lecturas corresponde al estado cerrado de los interruptores (NC-COM), el segundo bloque corresponde al estado abierto de los interruptores (NO-COM). De las mediciones realizadas se observa que cuando el interruptor se encuentra en estado cerrado se tiene una lectura de 3.299V, siendo una lectura esperada, ya que el voltaje de entrada es de 3.3V.

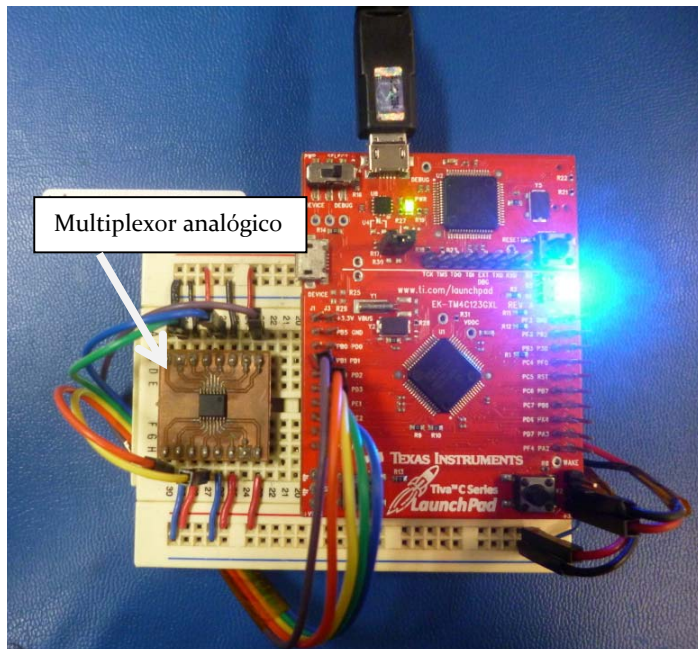


Fig. 4.9. Implementación física del multiplexor.

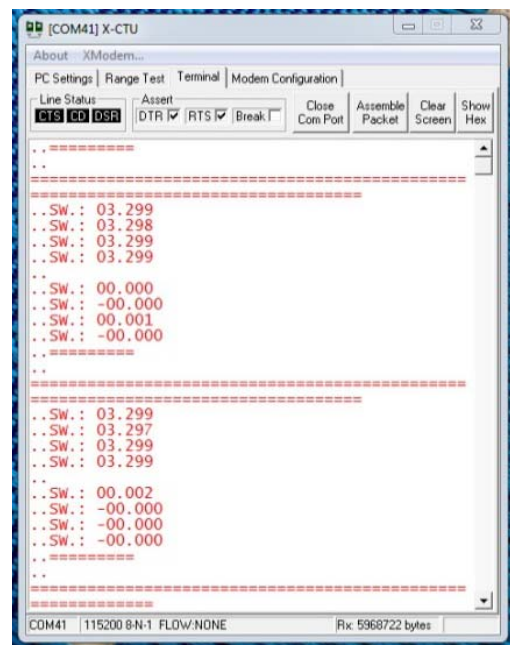


Fig. 4.10. Resultado de lecturas.

Es así, que realizada esta prueba se ha validado el bloque destinado al multiplexor de los canales analógicos con los que contará el sistema de monitoreo.

Monitoreo de sensores analógicos y comunicación serie

Una vez que se ha comprobado el correcto funcionamiento del convertidor analógico-digital que posee el microcontrolador, se implementará un sistema mínimo el cual contará con la lectura de los sensores básicos (sensor de presión, sensor de temperatura, acelerómetro) que contendrá el sistema HK_Pixqui, además de ello se implementarán tres puertos de comunicación serie, esto con el fin de validar que el microcontrolador pueda realizar la lectura analógica de los sensores y sea realice el envío de dicha información hacia los dispositivos conectados a él.

En la figura 4.11 se muestra sistema mínimo diseñado para la validación de la comunicación serie y la lectura de diversos sensores analógicos.

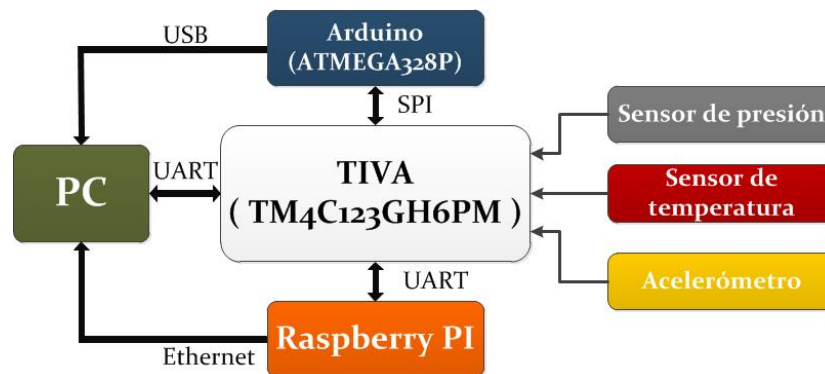


Fig. 4.11. Arquitectura para la validación de interfaces y lecturas analógicas.

Los sensores presentados en la figura 4.10 corresponden a las señales de aceleración, temperatura y presión.

Acelerómetro

Como se describió en el capítulo anterior, el acelerómetro es un dispositivo que permite la medición de las aceleraciones lineales que experimenta un cuerpo y por tanto permitirá medir estas fuerzas a lo largo del vuelo de la plataforma Pixqui.

Para la elección del acelerómetro se consideró la máxima aceleración que se estima tendrá la plataforma, la cual se estableció de 16G. Con este requerimiento se han considerado las siguientes características para la selección del sensor:

- Rango
- Número de ejes de medición
- Consumo

De tal forma que se han seleccionado el dispositivo MM7361 de la empresa *Analog Device*, el cual es un acelerómetro que permite medir tres ejes: X, Y y Z, cada uno con un rango de medición de $\pm 16G$. La salida de este sensor es analógica para cada eje, por lo que en su salida se espera un voltaje proporcional a la aceleración experimentada. Para su manejo se han hecho pruebas de calibración y caracterización, las cuales consistieron en la colocación del sensor en las posiciones mostradas en la figura 4.12 y medir los voltajes de salida en las terminales asociadas a los tres ejes.

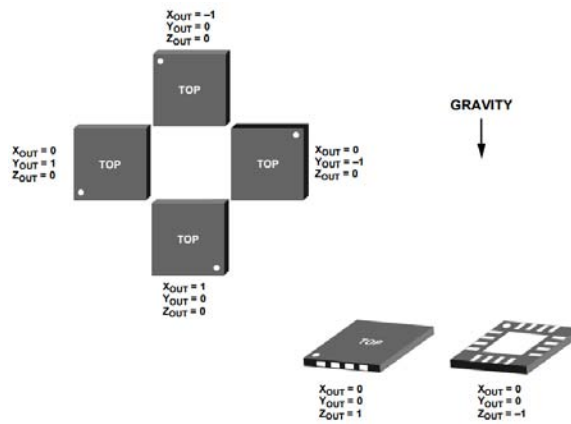


Fig. 4.12. Respuesta de salida en función de la orientación.

Para el proceso de caracterización, se tomaron las respuestas que presenta el sensor en cada una de sus salidas. Basándose en la hoja técnica del dispositivo, se tiene la figura 4.13, en la cual se muestra una de los voltajes típicos para una de las orientaciones que puede tener el sensor.

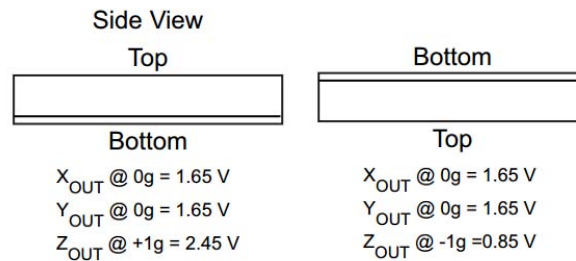


Fig. 4.13. Salida típica del sensor en relación a su posición. [5]

Dato que el voltaje de salida tiene una relación lineal respecto a la variación de la fuerza de gravedad, se ha considerado el modelo de la recta mostrado en la figura 4.14, además de emplear la ecuación 4.1 la cual es la ecuación de la recta con base en dos puntos conocidos. Se obtuvieron los siguientes valores para el eje Z: $1g = 2.205V$ y $-1g = 0.639V$. Es así que se considera para la Ciudad de México $1g = 0.996841896 [m/s^2]$.

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad \text{Ecuación 4.1}$$

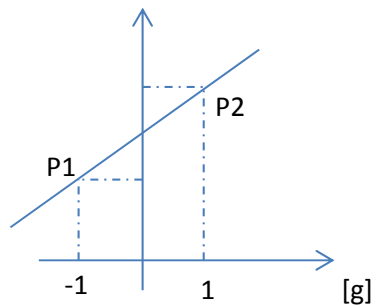


Fig. 4.14. Modelo de la recta.

Teniendo los dos puntos para el eje Z, se tiene que:

P1(-0.996941896, 0.639)

P2(0.996841896, 2.205)

$$y - 0.639 = \frac{0.639 - 2.205}{-0.996941896 - 0.996841896}(x - (-0.996941896))$$

$$y - 0.639 = 0.7854018405(x + 0.996941896)$$

$$x = \frac{y - 1.422}{0.7854018405}$$

Realizando un cambio de variable, finalmente se tiene que:

$$Z = \frac{c - 1.422}{0.7854018405} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde Z representa la fuerza de gravedad medida y c representa el voltaje de salida del sensor.

De tal forma que se obtuvieron los puntos necesarios para poder obtener la recta característica que relaciona el voltaje de salida con la aceleración experimentada para los ejes X y Y, obteniendo con ello las ecuaciones 4.3, 4.4; las cuales permitirán convertir el voltaje medido por el convertidor analógico digital del microcontrolador en una señal física con significado, la cual estará expresada en [G].

$$X = \frac{a - 1.736}{0.7944294479} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

$$Y = \frac{b - 1.621}{0.795435154} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde a, b son las lecturas analógicas realizadas por el microcontrolador cuyas unidades estarán en volts.

En la figura 4.15 se muestra la conexión típica del sensor. Para efectos de esta prueba se empleará una tarjeta comercial la cual contiene ya el sensor por lo que la conexión hacia el microcontrolador solo será hacia las terminales de los canales analógicos.

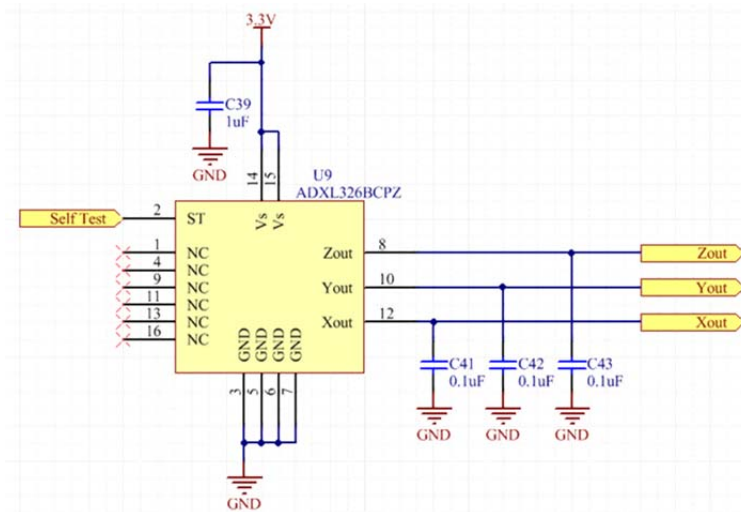


Fig. 4.15. Aplicación típica del sensor MM7361.

Sensor de temperatura

En el mercado mexicano existen diversos sensores que pueden implementarse para la prueba, sin embargo se ha seleccionado el LM335 de Texas Instruments. Aunque propiamente no es el sensor a emplear en el vuelo de la plataforma, se ha implementado para visualizar el correcto funcionamiento de la lógica de monitoreo de diversas señales analógicas. Sus características técnicas son:

- Calibración directamente en grados Kelvin
- Rango de operación: -40°C a 100°C
- Relación de $+10\text{mV}/^{\circ}\text{K}$

A pesar de que el voltaje de salida de este sensor está en función de grados Kelvin, se ha elegido por encima del LM35DZ, debido a su precio, ya que un posible daño en el sensor era un menor costo a la hora de remplazarlo. Para la utilización de este sensor, el fabricante propone diversos circuitos típicos para su aplicación, del cual se ha empleado la configuración mostrada en la figura 4.16, por lo que es necesario calcular la resistencia R_1 , la cual estará en función de la alimentación que se seleccione para el sensor; en este caso V_+ será igual a 3.3V. Uno de los datos importante que proporciona el fabricante es el intervalo de valores de corriente para el cual el sensor puede trabajar, el cual es de 400uA a 5mA.

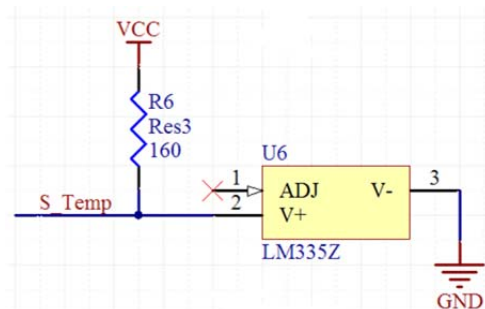


Fig. 4.16. Esquemático de conexión del LM335.

Dado que la temperatura máxima a medir propuesta por para la prueba será de $50^{\circ}\text{C} = 323.15^{\circ}\text{K}$, el voltaje de salida del sensor será igual a 3.23V , siendo este el voltaje máximo, mientras que el voltaje mínimo es 2.63V , ya que se ha seleccionado una temperatura mínima de -10°C .

Por lo tanto se tiene que:

$$R1 = \frac{VCC - Vmax}{imin} = \frac{3.3 - 3.23}{400} = 175 [\Omega]$$

El valor más cercano es de 160Ω , por lo que se tiene que calcular la corriente máxima y asegurar que está dentro del intervalo de operación

$$i_{max} = \frac{VCC - Vmax}{R1} = \frac{3.3 - 2.63}{160} = 4.187 [\mu\text{A}]$$

Es así que se tiene configurada la conexión del circuito a conectar con el microcontrolador para su lectura.

Sensor de presión

Para la selección del dispositivo a emplear se ha considerado dos características en el dispositivo: rango de medición y consumo, por lo que se ha seleccionado el sensor MP3H6115A de *Freescale*: Este sensor de presión tiene un rango de medición de 15 a 115kPa , mientras que su sensibilidad es de 27mV/kPa . La conexión típica del sensor se observa en la figura 4.17.

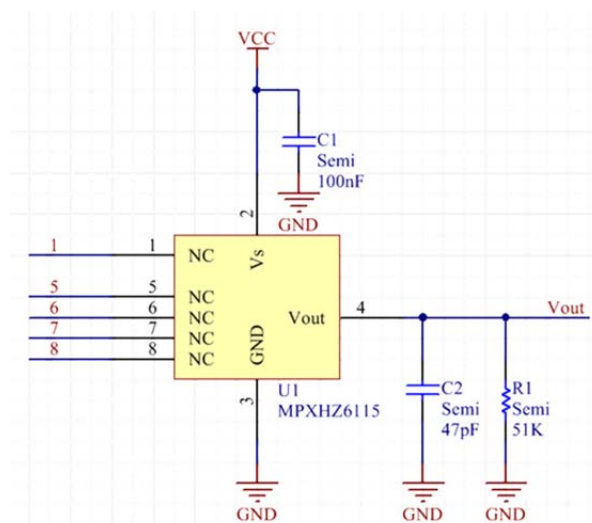


Fig. 4.17. Aplicación típica del sensor MP3H6115A.

El voltaje de salida está definido por la siguiente expresión:

$$V_{out} = V_s \times (0.009 \times P - 0.095) \pm (\text{Err. presión} \times \text{Err. temp} \times V_s) \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Donde:

- Vs: Es el voltaje de alimentación con el cual es energizado el sensor
- P: Es la presión sensada por el sensor
- Err. Presión: Se le denomina error de presión y por datos del fabricante es igual a $\pm 1.5\text{kPa}$
- Err. Temp: Es el error de temperatura el cual está en función de la curva mostrada en la figura 4.18:

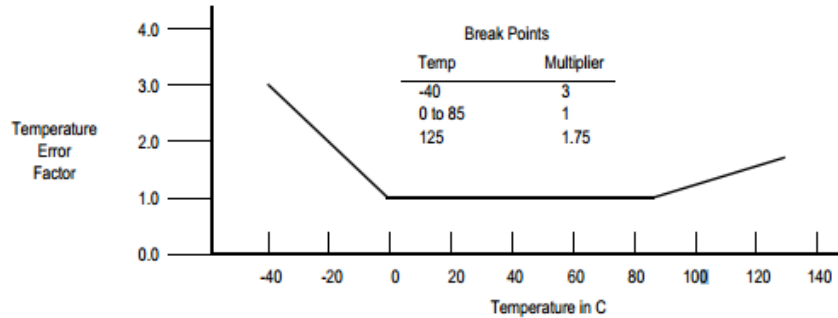


Fig. 4.18. Factor de error por temperatura.

Para la validación de la comunicación mediante los protocolos implementados en el microcontrolador, se han realizado las siguientes interfaces:

- **UART0:** Se ha realizado la configuración del puerto mediante la programación del periférico encargado de la comunicación serial entre el microcontrolador y la computadora portátil, con ello tendremos una plataforma que permitirá la visualización de los datos obtenidos de las lecturas analógicas realizadas. La configuración se ha realizado con los siguientes parámetros: paridad nula, tamaño de dato de 8 bits, baudrate de 115,200.
- **UART1:** Este puerto ha servido para comprobar que el microcontrolador TIVA es capaz de realizar la comunicación de forma simultánea con otro dispositivo. Nuevamente la configuración se ha realizado con los siguientes parámetros: paridad nula, tamaño de dato de 8 bits, baudrate de 115,200. En esta conexión se envían nuevamente los datos obtenidos y procesados de las lecturas analógicas realizadas.
- **SSI:** Para el caso concreto de esta aplicación, se ha empleado la comunicación SPI para establecer la conexión entre el microcontrolador TIVA y el microcontrolador Atmega328, en la plataforma de Arduino, en donde éste último será el esclavo. En esta conexión únicamente se envían bytes para desplegar el texto “SPI TIVA” en la terminal que posee Arduino.

En la figura 4.19 se observa el sistema de prueba conectado:

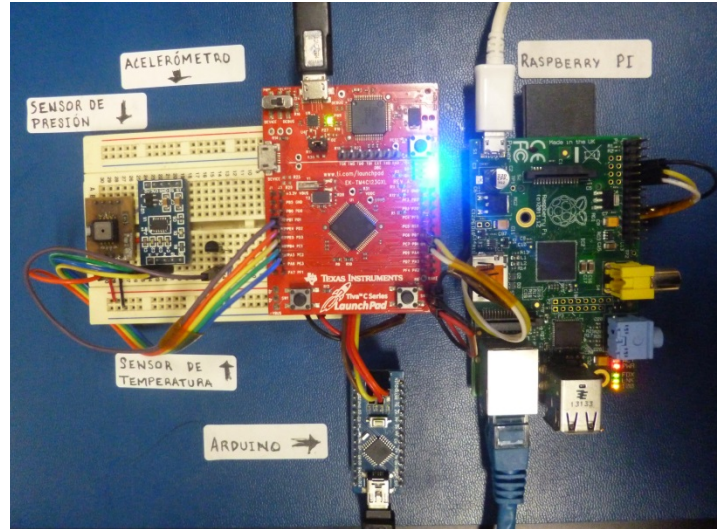


Fig. 4.19. Sistema para la validación de sensores.

Mientras que en la figura 4.20 se observan los resultados obtenidos en cada una de las terminales implementadas:

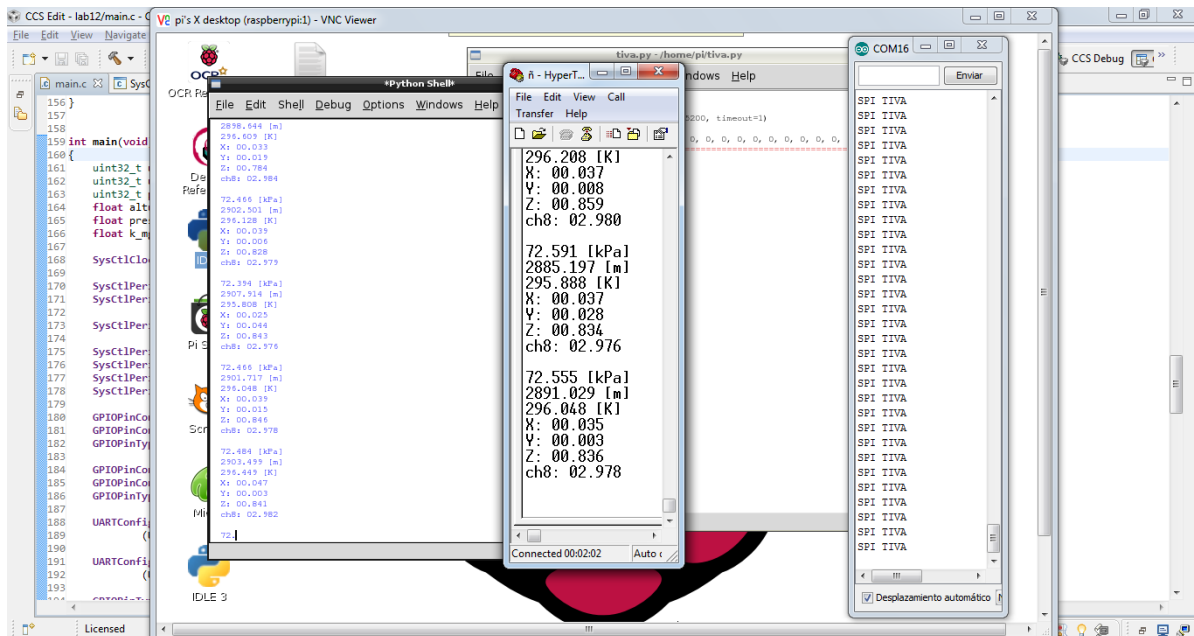


Fig. 4.20. Vista de resultados obtenidos.

En la figura 4.20 se observa que se tiene una presión de 72.555kPa y una altura de 2891.029 m, sin embargo esos datos aunque son cercanos, poseen un error considerable, ya que la presión absoluta en la Ciudad de México es de 77 a 78 kPa, mientras que la altura es de aproximadamente 2200 m. Este error es debido a que en la programación no se ha considerado los factores de error de temperatura y presión, además de implementar un algoritmo para disminuir las variaciones que resultan de las lecturas analógicas. Esto permite establecer mecanismos de procesamiento a implementar ya que dichas lecturas muestran variaciones significativas con el valor esperado,

4.5.2. Interfaz de señales digitales

Monitoreo de sensores digitales

Como se mencionó en capítulos anteriores, se les denomina sensores digitales dado que la medición realizada por éstos se obtiene mediante la implementación de protocolos de comunicación como SPI o I2C, siendo este último el empleado en los sensores propuesto de humedad y giróscopo, propuestos para la plataforma.

Giróscopo

En el diseño del sistema HK_Pixqui, se ha contemplado el monitoreo de la aceleración angular que experimenta tanto el sistema como la plataforma en sí, por lo que se ha propuesto el uso de un giróscopo para su medición

Se trata de un sensor capaz de medir la velocidad angular (grados/s) que experimenta el dispositivo en los ejes X, Y y Z. Para la selección del componente se han contemplado las siguientes características:

- Rango
- Número de ejes de medición
- Consumo

De la gama de dispositivos se ha seleccionado el giróscopo L3GD20 del fabricante *ST Microelectronics* ya que cuenta con un amplio rango de medición que va de ± 2000 grados/s además de que se tiene experiencia en la conexión y lectura de este dispositivo. En la figura 4.21 se tiene que la conexión básica para el sensor.

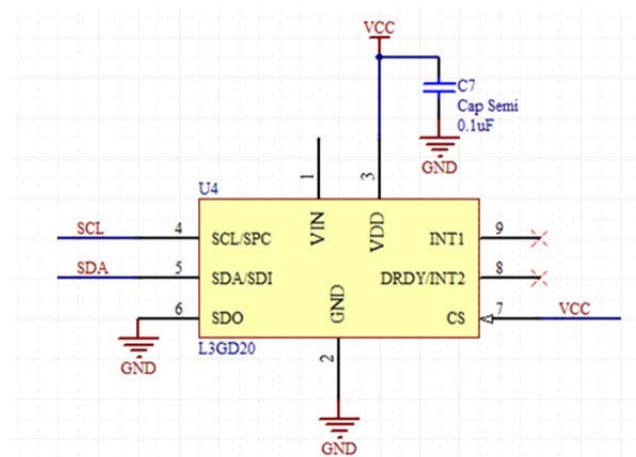


Fig. 4.21. Conexión del sensor L3GD20

Se realizó el código mediante la plataforma de *Code Composer Studio* y empleando el osciloscopio se comprobó el correcto envío de la trama de configuración hacia el sensor, tal y como se muestra

en la figura 4.22, en donde se observa la dirección de esclavo (0x6Ah), el bit de escritura, el byte de registro (0x20h) y el byte de dato a escribir (0x0Fh).

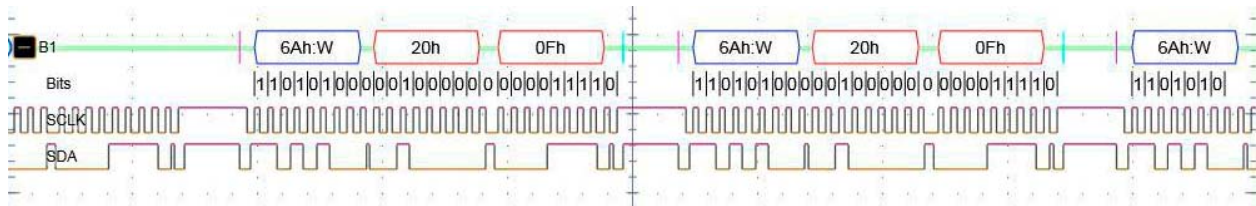


Fig. 4.22. Oscilograma de la trama de configuración del giroscopio.

Una vez comprobado la respuesta del sensor ante la instrucción de configuración, se ha establecido las rutinas de lectura de los registros los cuales van desde la dirección 0x28 hasta la dirección 0x2A, todas estas direcciones internas del sensor en las cuales se almacenan las mediciones de los ejes del dispositivo; es así que se tienen los siguientes los siguientes oscilogramas, mostrados en las figuras 4.23 4.24 y 4.25, de las mediciones realizadas a cada eje.

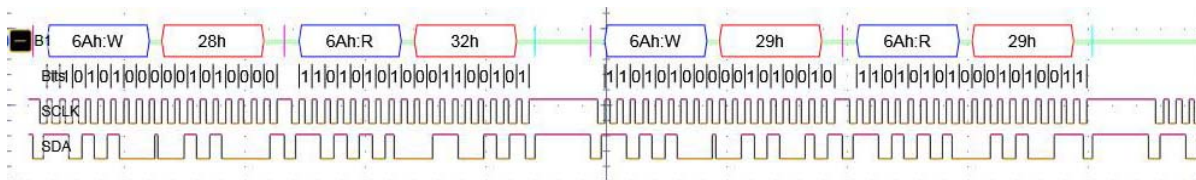


Fig. 4.23. Oscilograma de la lectura del eje X.

En la figura 4.23 se realiza la rutina de lectura de los registros 0x28 y 0x29 los cuales son los registros asociados a la lectura de la aceleración angular del eje X, estas mediciones y datos mostrados aún están sin procesar, procedimiento que posteriormente se detallará.

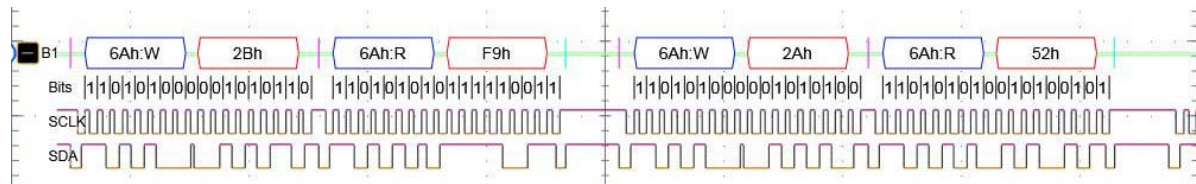


Fig. 4.24. Oscilograma de la lectura del eje Y.

Asimismo en la figura 4.24 se realizar la rutina para la adquisición de los datos almacenados en los registros 0x2A y 0x2B los cuales son los registros asociados al eje Y del giróscopo.

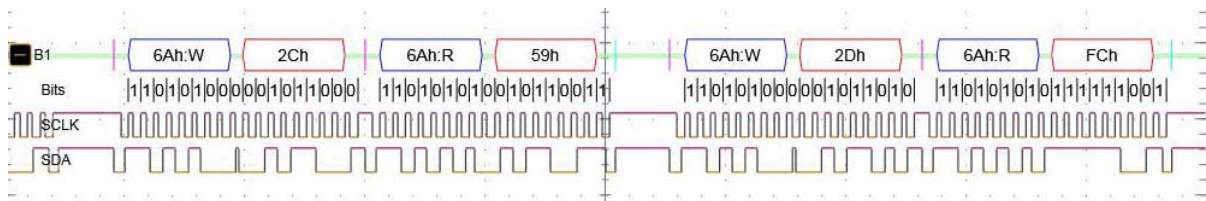


Fig. 4.25. Oscilograma de la lectura del eje Z.

Finalmente en la figura 4.25 se hace la adquisición de los datos asociados al eje Z para su posterior procesamiento.

Una vez efectuada la adquisición de los bytes correspondientes a cada eje del sensor, es necesario realizar su conversión a unidades físicas que nos permitan entender el comportamiento que está presentando el dispositivo, es por ello que de la tabla 4.1 se obtendrán los parámetros necesarios para realizar el procesamiento de los datos, los cuales son el rango de medición o escala completa y el factor de conversión.

| Símbolo | Parámetro | Condición | Mín | Típico | Máx | Unidad |
|---------|-------------------|---|-----|-----------------------|-----|-------------|
| FS | Rango de medición | Seleccionado por el usuario | | ±250 ±500 ±2000 | | dps |
| So | Sensibilidad | FS = 250 dps FS = 500 dps FS = 2000 dps | | 8.75 17.50 70 | | mdps/digito |

Tabla 4.1. Características del sensor L3GD20.

En la tabla anterior se observa que para cada una de las escalas (FS, *Full Scale*) con las que puede operar el sensor, se tiene un factor de conversión (So), en el cual la unidad está establecida por *mdps/digit* (*milli Degrees Per Second /digit*), lo que significa que cada digito equivaldrá a un mili grado sobre segundo. Con esto se tiene el factor por el cual se ha de multiplicar la lectura obtenida y con ello tener la representación física de dicho dato. Sin embargo, en el Sistema Internacional la unidad empleada para la velocidad angular es el radián por segundo (rad/s), por lo que el factor de conversión estará dado por:

$$\left(FS \left[\left(\frac{mdeg}{sec} / digito \right) \right] \right) \left(\frac{1}{1000} \left[\frac{deg}{mdeg} \right] \right) \left(\frac{\pi}{180} \left[\frac{rad}{deg} \right] \right) = factor \left[\left(\frac{rad}{sec} / digito \right) \right] \quad Ecuación 4.6$$

En la figura 4.26 se hace la visualización de los datos una vez realizada la conversión los cuales se observan en una terminal. Dado que no se le efectuó ningún movimiento al dispositivo, las lecturas fueron entorno a un valor cercano a cero, mientras que las pequeñas variaciones se debieron a posibles bytes erróneos en la lectura del sensor

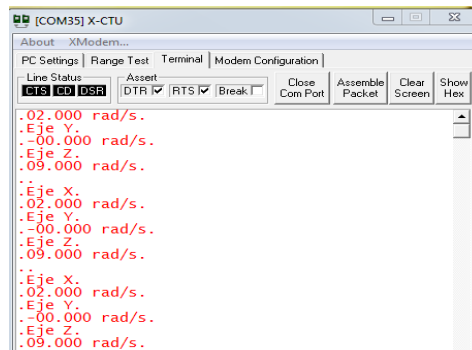


Fig. 4.26. Visualización de las lecturas del giroscopio.

Sensor de humedad

De manera similar, el sistema HK_Pixqui, requiere de un sistema capaz de medir la humedad que experimenta durante el vuelo, por lo que para ello se ha planteado el uso de un sensor de humedad. El sensor se ha seleccionado teniendo en cuenta los siguientes requerimientos:

- Rango de operación
- Resolución
- Rango de temperatura

Es así, que se seleccionó el sensor SHT21 de la empresa Sensirion, el cual tiene una interfaz bajo el protocolo I2C, y las siguientes características:

| Parámetro | Condicion | Valor | Unidad |
|-------------------------|-----------|-----------|--------|
| Resolucion | 12 bit | 0.04 | %RH |
| | 8 bit | 0.7 | %RH |
| Tolerancia de precision | Tipica | ±2 | %RH |
| Repetibilidad | | ±0.1 | %RH |
| Rango de operación | | 0 a 100 | %RH |
| Rango de temperatura | | -40 a 125 | °C |

Tabla 4.2. Parámetros del sensor SHT21

En la figura 4.27 se presentan las variaciones de la presión en la medición de la humedad en función de la temperatura, datos que son proporcionados por el fabricante.

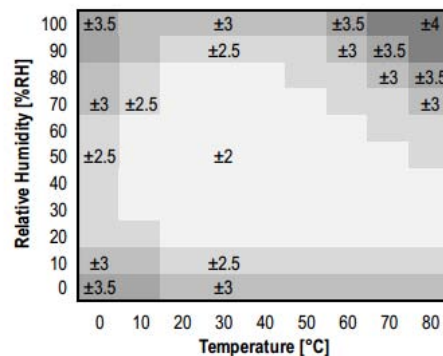


Fig. 4.27. Precisión típica de la humedad relativa a diferentes temperaturas. [6]

Como lo especifica el fabricante en la hoja técnica del dispositivo, éste tiene dos modos de trabajo: *No Hold Master Mode* y *Hold Master Mode*. Ambos modos emplean la comunicación mediante el protocolo I2C, con la diferencia de que el *No Hold Master Mode* permite tener libre el bus de comunicación libre mientras el sensor realiza la medición, en cambio en el modo *Hold Master Mode* la línea de reloj SCL se mantiene bloqueada lo cual no permite la comunicación con ningún dispositivo. Para el proyecto se ha trabajado bajo el esquema de la comunicación con el sensor en

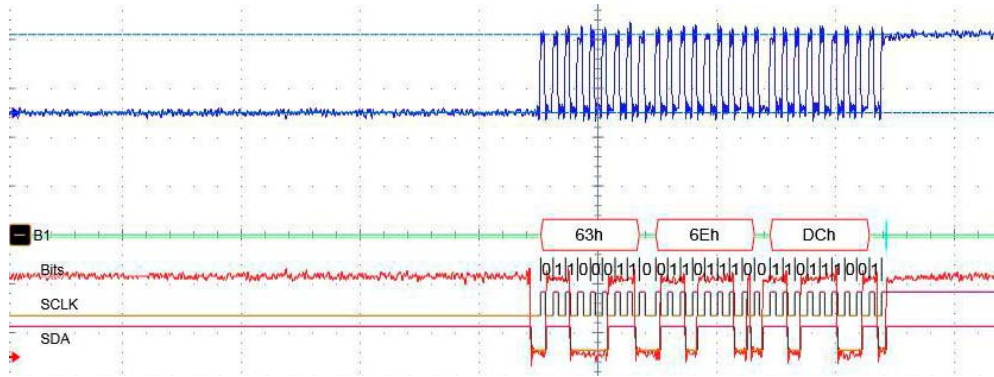


Fig. 4.30. Byte enviados por el sensor de humedad.

El dato correspondiente a la medición de la humedad relativa se obtiene utilizando la siguiente ecuación:

$$RH = -6 + 125 \left(\frac{S_{RH}}{2^{16}} \right) \quad \text{Ecuación 4.7}$$

En donde RH es la humedad relativa expresada en %RH, mientras que S_{RH} es el dato de 12 bits de longitud. A manera de ejemplo, y utilizando para ello la figura 4.29, se tiene que la medición realizada tiene un valor de $0110001101110100b = 25452_{10}$, teniendo así que la humedad relativa es:

$$RH = -6 + 125 \left(\frac{25452}{2^{16}} \right) = 42.54 \%RH$$

Dicho dato es enviado a la terminal UART en la computadora portátil tal como se muestra en la figura 4.31:

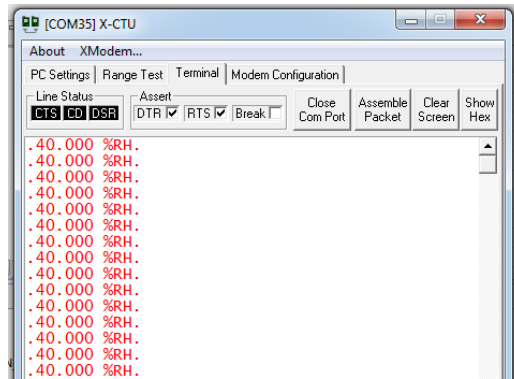


Fig. 4.31. Lectura en terminal de la humedad relativa.

La diferencia del valor mostrado en la terminal y el calculado, es debido a las variaciones que se presentan en el ambiente y en el tiempo transcurrido entre la captura de pantalla entre el osciloscopio y la terminal. Sin embargo, en un primer momento si se observó un valor de 42%Rh para la humedad relativa.

Expansor de puertos

Una de las consideraciones que se deben tener en el diseño de sistemas electrónicos es, la de contar con el número de terminales suficientes para las diversas interfaces que han de desarrollarse, ya sean de tipo analógico o digital. Sin embargo, la disponibilidad de microcontroladores con un amplio número de terminales es reducido, es así que para el proyecto desarrollado en el presente trabajo se ha de emplear un expansor de puertos externo, esto con el fin de cumplir con los requerimientos técnicos del HK_Pixqui.

Dentro de la gama de circuitos que cumplen con la función requerida se ha seleccionado y empleado en este proyecto es el expansor PCF8575 de la empresa *Texas Instruments*. Este integrado permite agregar 2 puertos de 8 bits cada uno, teniendo así un total de 16 terminales externas extras, además de poder garantizar que en el momento en que es energizado el circuito, sus terminales presentan un estado de alta impedancia, característica importante ya que asegura que no habrá estados lógicos no deseados al iniciar operaciones. La comunicación con el microcontrolador para su configuración y operación se realiza a través del protocolo de comunicación I2C.

Se ha diseñado el diagrama bloques para la validación del expansor empleado, figura 4.32, en el cual el microcontrolador empleado se comunica por el protocolo I2C hacia el expansor, el cual identificará los datos configurados y el modo en el que trabajará, es decir, si sus terminales serán empleadas como terminales de entrada o de salida.

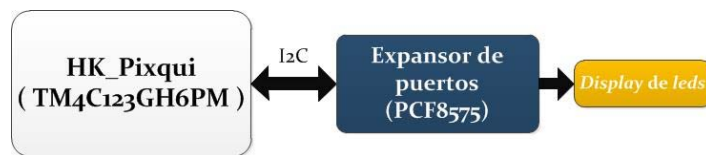


Fig. 4.32. Diagrama a bloques para la validación del expansor de puertos.

En la figura 4.33 se muestra el circuito propuesto para la validación del funcionamiento del expansor de puertos.

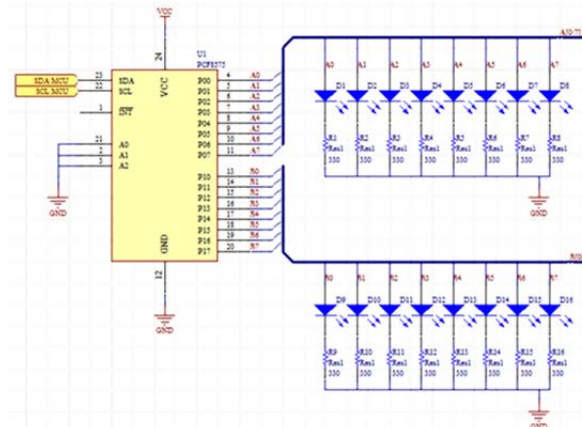


Fig. 4.33. Circuito de prueba para el expansor de puertos.

En este circuito sólo se configurará las terminales del expensor como líneas de salida, ya que es la función que tendrán dentro del HK_Pixqui. Por lo que los datos enviados para un puerto serán 0x0Fh y para el segundo puerto 0xAAh. Es así, que en la figura 4.34 se observa el oscilograma obtenido de la comunicación entre el expensor de puertos y el microcontrolador, en el cual se ven los datos antes mencionados.

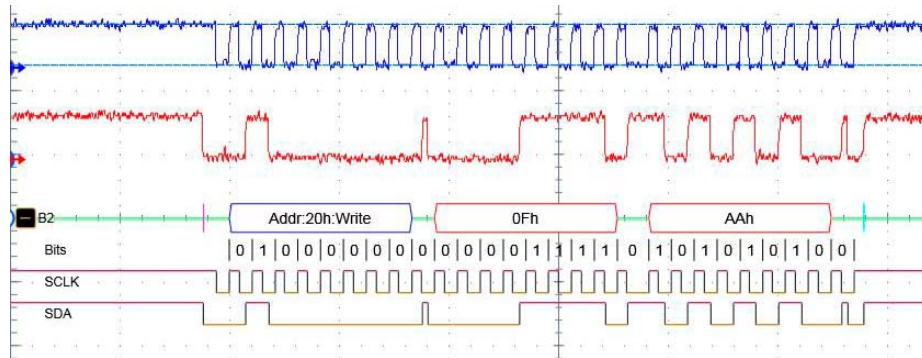


Fig. 4.34. Oscilograma de la comunicación entre microcontrolador y expensor de puertos.

El circuito implementado para comprobar el funcionamiento del expensor de puertos se muestra en la figura 4.35, se observan los datos configurados en las barra de leds con lo que se comprueba el correcto funcionamiento del expensor y de la comunicación implementada entre el microcontrolador y el expensor.

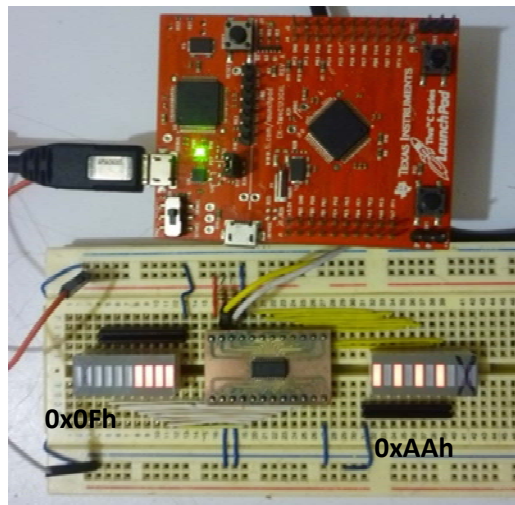


Fig. 4.35. Circuito de prueba del expensor de puertos.

4.6. Bancos de pruebas

4.6.1 Banco de pruebas LVPS

El banco de pruebas del subsistema LVPS (*Low Voltage Power Supply*) consiste en un conjunto de módulos que simulan señales de voltaje y corriente en un rango de 0 a 3.3V, además de emular

los relevadores con los que cuentan el sistema de potencia de la plataforma Pixqui. Este banco de pruebas aunque fue diseñado para la validación de la lógica del *Housekeeping* del *EUSO Balloon*, permite la validación de la lógica del HK_Pixqui, diseñado para la plataforma suborbital Pixqui, dado que la filosofía de funcionamiento es similar en ambos casos.

Las pruebas se diseñaron considerando que por cada subsistema, las unidades LVPS proporcionan un conector para la alimentación y otro destinado para el HK_Pixqui, donde se incluyen:

- i. 14 señales para activar y desactivar relevadores (*HL_CMD set y reset*).
- ii. 7 señales para la comprobación del estado *ON/OFF* de los relevadores (*Contact Closure*).
- iii. 18 señales de monitoreo de voltajes y corrientes.

Diseño de interfaz

Como ya se mencionó, tanto el banco de pruebas LVPS, como el sistema de potencia de la plataforma Pixqui, ambos cuentan con relevadores para el control encendido/apagado de subsistemas, es por ello necesario el implementar un sistema electrónico que garantice una señal de control con el nivel de tensión necesaria para la activación del relevador, además de proveer de protección al microcontrolador, y esto ante posibles retorno de corriente producidos por el relevador. Es así que se implementará el circuito mostrado en la figura 4.36, el cual se denominará *High Level Command* (HL_CMD).

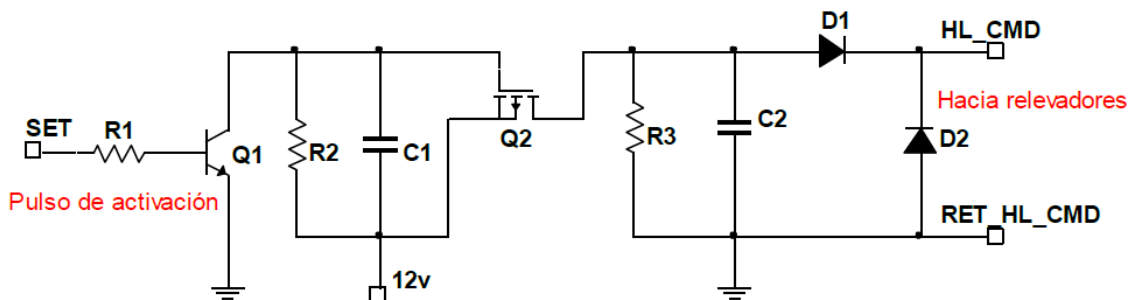


Fig. 4.36. Circuito *High Level Command*.

Una vez que un sistema es encendido o apagado por el HK_Pixqui, es necesario comprobar que dicha acción se ha llevado a cabo correctamente, de tal forma que para ello se implementará la configuración mostrada en la figura 4.37. Como comprobación de la acción se monitoreará la señal denominada *Contact Closure* (CC).

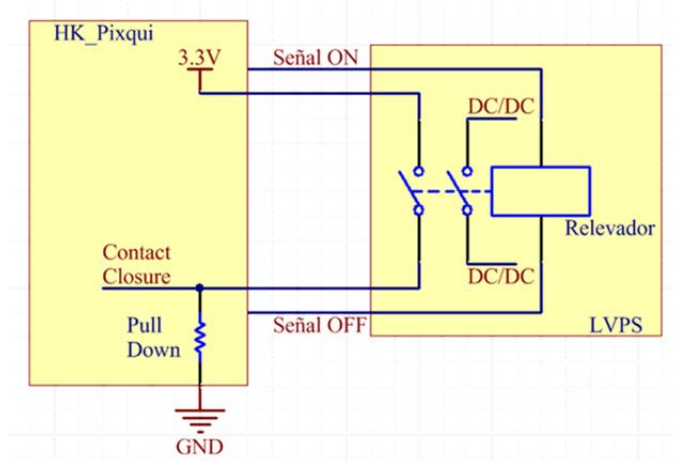


Fig. 4.37. Interfaz con relevadores de las LVPS.

El *Contact Closure*, es una señal que consiste en un nivel de tensión de 3.3V, producido por la LVPS, la cual estará conectada a una terminal de uno de los interruptores del relevador, de tal forma que la otra terminal regresa al HK_Pixqui, esto con el fin de poder leer un estado en alto en caso de ser activado el relevador. En caso de no estar activado el relevador, el interruptor se encuentra abierto y por tanto el HK_Pixqui leerá un estado bajo, garantizado por la resistencia *pull-down* mostrada en la figura.

En la figura 4.38, se muestra el diagrama a bloques del sistema de prueba a emplear para la validación de la lógica para el control de encendido/apagado de las LVPS.

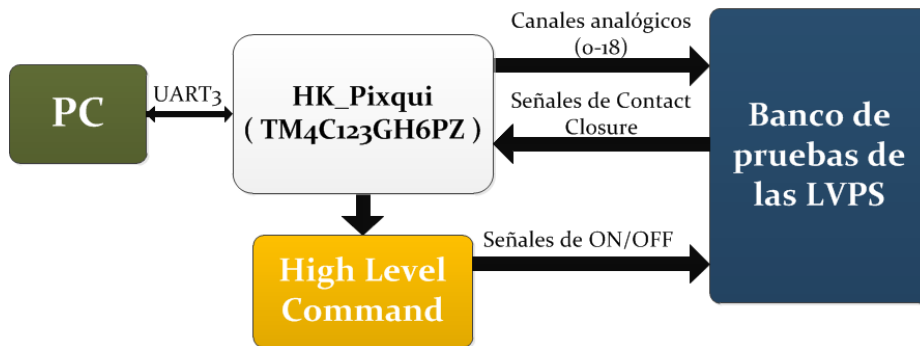


Fig. 4.38. Diagrama a bloques para la validación del banco de pruebas de las LVPS.

Lógica de funcionamiento

La lógica implementada en el HK_Pixqui, es la mostrada en la figura 4.39, en la cual se observa que como primer tarea a realizar es el encendido de los 7 subsistemas simulados, esto con el fin de comprobar el correcto envío del pulso de encendido a las terminales *Set* de los relevadores empleados, además de comprobar que estos son accionados. Una vez realizada esta tarea se pasa al apagado de los subsistemas, esto nuevamente para la comprobación del correcto envío del pulso de apagado a las terminales *Reset* de los relevadores, y comprobar con ello que éstos actúen

de forma adecuada. Al finalizar estas tareas, el HK_Pixqui realiza la lectura de las 18 señales analógicas, las cuales corresponden a los voltajes y corrientes simulados de los subsistemas: GPS, CLKB, CCB, DST, EC, PDM, 3.3HK y 12HK (estos nomenclaturas corresponde a las simulación de sistemas para el proyecto *EUSO Balloon*, sin embargo, para fines prácticos se emplean como sistemas en general a los cuales se desea activar o desactivar). Esta rutina de monitoreo será la acción principal y la única que realizará el HK_Pixqui de forma continua hasta que ocurra una interrupción.

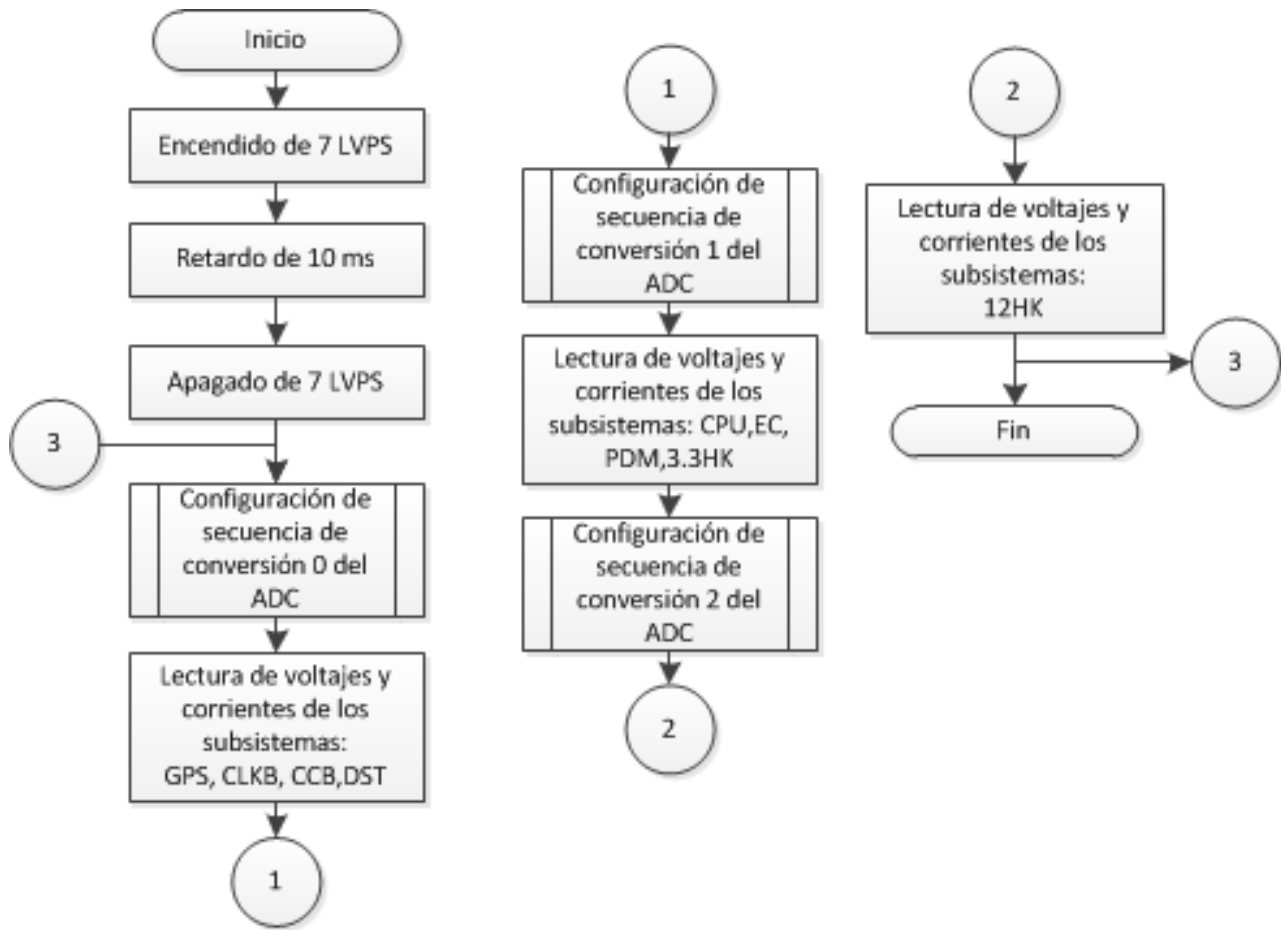


Fig. 4.39. Diagrama de flujo para la interacción con banco de pruebas de las LVPS.

Cabe mencionar que el sistema cuenta con detección de interrupciones mediante comunicación serie, la cual está habilitada únicamente para la UART 3, la cual realiza la comunicación con el subsistema CPU de la plataforma. El subsistema CPU enviará comandos para el encendido o apagado del relevador deseado dentro del banco de pruebas de las LVPS. La selección de que sistema se ha de apagar se realiza mediante una terminal de puerto serie ejecutada en una computadora portátil (*Laptop*).

En la tabla 4.3 se tienen los comandos asociados a las tareas antes descritas.

| CPU Comando para ejecutar acción | Descripción | HEX |
|--|---------------|------|
| | Enciende CLKB | 0x65 |
| | Enciende CCB | 0x71 |
| | Enciende GPS | 0x74 |
| | Enciende PDM | 0x7A |
| | Enciende EC | 0x63 |
| | Enciende DST | 0x64 |
| | Enciende CPU | 0x6C |
| | Apaga CLKB | 0x72 |
| | Apaga CCB | 0x77 |
| | Apaga GPS | 0x79 |
| | Apaga PDM | 0x78 |
| | Apaga EC | 0x76 |
| | Apaga DST | 0x66 |
| | Apaga CPU | 0x73 |

Tabla 4.3. Comando para el manejo del baco de pruebas de LVPS.

En la figura 4.40 se muestra la rutina de atención a la interrupción asociada a la comunicación serie, la cual realiza una comparación del comando recibido para saber cuál es la acción a tomar.

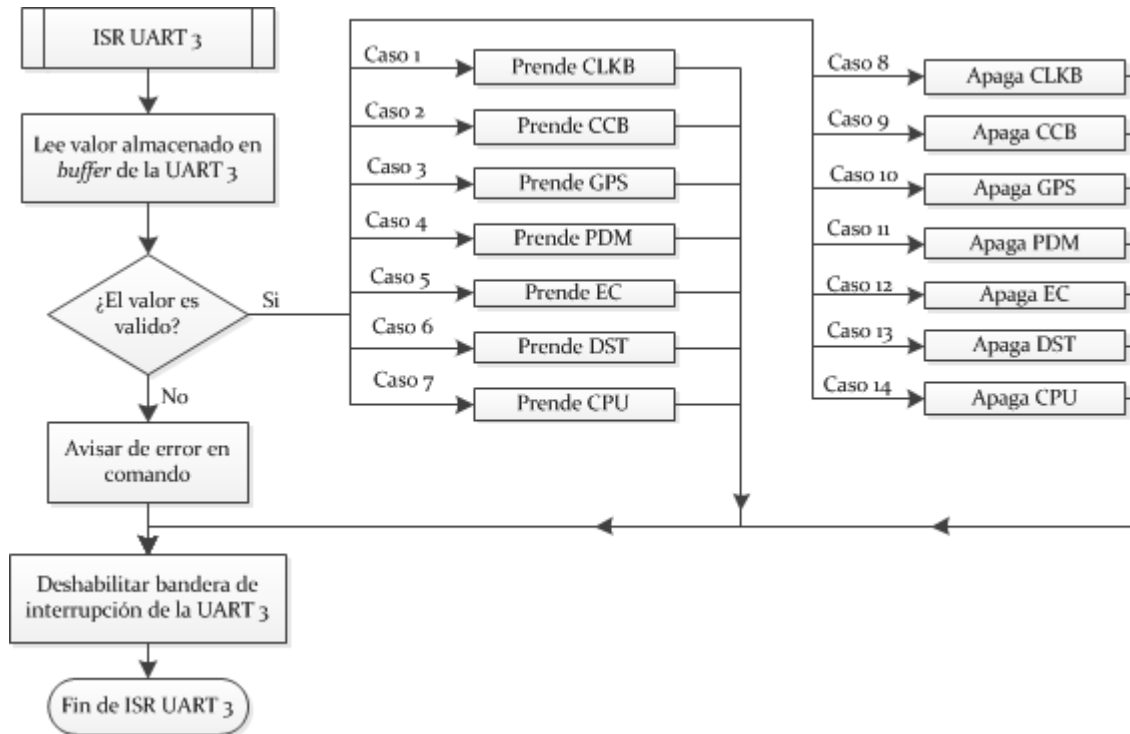


Fig. 4.40. Diagrama de flujo de subrutina de atención a interrupción.

Implementación

En la figura 4.41 se muestra el sistema conectado al banco de pruebas LVDS. Para esta prueba se ha empleado el microcontrolador TM4C123GH6PZ y la tarjeta desarrollada como prototipo, ya que el número de terminales requeridas para la interfaz con el banco de pruebas utilizado es mayor al proporcionado por la tarjeta *Launchpad* de *Texas Instruments*. Es así que se ha configurado el ADC del HK_Pixqui para realizar el muestreo de 18 canales, esto con el fin verificar los voltajes y corrientes del banco de pruebas. Para el control de relevadores y la lectura de las señales CC, se configuraron puertos de propósito de general en modo de salida y entrada respectivamente.

En esta integración se obtuvo como resultado el manejo de interrupciones para la activación y desactivación de cualquiera de los subsistemas simulados por el banco, además de la lectura de la totalidad de los voltajes y corrientes de cada subsistema. La integración permitirá validar la lógica diseñada para la identificación de los sistemas que se quieren activar.

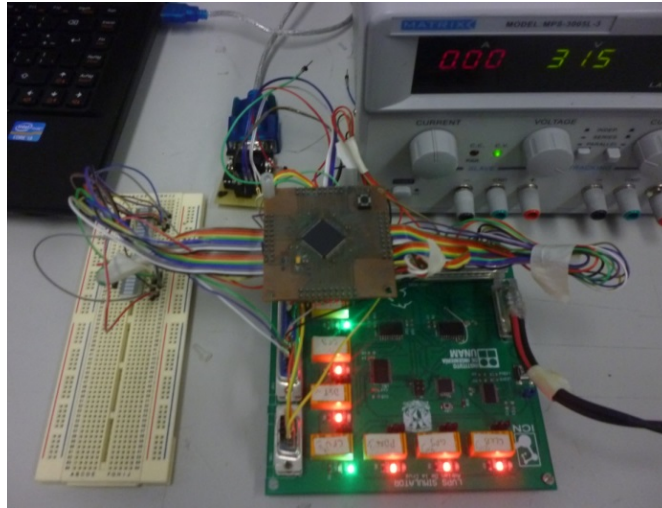


Fig. 4.41. Conexión sistema HK con Banco de pruebas LVDS.

4.6.2 Banco de pruebas CPU

La importancia de la comunicación entre CPU y HK_Pixqui, radica en el hecho de que el HK_Pixqui debe ser controlado en su totalidad por el sistema CPU. Entre las tareas a las que el sistema debe responder son:

- Encendido o apagado de una fuente de bajo voltaje (LVPS) a la vez
- Lectura de cualquier variable atmosférica o inercial
- Lectura de cualquier parámetro; voltaje o corriente, de las fuentes de bajo voltaje
- Lectura de termistores
- Configuración de umbrales de comparación en parámetros críticos en el monitoreo del HK_Pixqui para la generación de alarmas

4.6.2 Lógica de funcionamiento

El protocolo propuesto para la interacción de los sistemas CPU-HK_Pixqui, tabla 4.4, se ha conformado de 3 tramas, en las cuales se emplean cabeceras, las cuales permiten identificar la clasificación de los datos enviados, así como el inicio de transmisión de los mismos. De la misma forma se cuenta con un *byte* de fin de trama, cuyo valor es 0x17h.

| | Cabecera | Descripción | Fin |
|---|----------|------------------------------|------|
| 1 | 0x31 | Encendido/ apagado de LVPS | 0x17 |
| 2 | 0x32 | Lectura de parámetros del HK | 0x17 |
| 3 | 0x33 | Configuración de umbrales | 0x17 |

Tabla 4.4. Tipo de tramas para la comunicación con CPU.

- Cabecera: Byte que indica el proceso a realizar, se implementa para este protocolo 3 opciones: encendido/ apagado de LVPS, Lectura de parámetros de HK_Pixqui y configuración de umbrales.
- Fin: *Byte* que indica el fin de la transmisión.

i. Encendido y apagado de fuente de bajo voltaje (LVPS)

El encendido o apagado de una LVPS es una instrucción que determina CPU y que es efectuada por el HK_Pixqui, ver tabla 4.5. Ante una alarma que implique a dichas fuentes su apagado estará decretado por CPU.

| Cabecera | LVPS | ON/OFF | FIN | CRC H | CRC L |
|----------|------|--------|------|--------|--------|
| 0x31 | Byte | Byte | 0x17 | Byte H | Byte L |

Tabla 4.5.- Trama para el encendido o apagado de LVPS.

- Cabecera: *Byte* con valor de 0x31, el cual indica que se activará o desactivará una LVPS.
- LVPS: Se trata de un byte, el cual indica la fuente de bajo voltaje a la cual el HK_Pixqui operará. En la tabla 4.6, se observan los valores asignados para cada una de las fuentes.
- ON/OFF: Es el byte que indica la acción a realizar: un valor 0x00 corresponde al apagado de la fuente, mientras que un valor 0xFF representa el encendido de ésta.
- Fin de bloque: *Byte* que indica el fin de la transmisión.
- Comprobación de redundancia cíclica: Constituida por 2 *bytes*, los cuales son el resultado del CRC.

En la tabla 4.6 se muestran los valores que se han definido para las 6 fuentes de alimentación.

| LVPS | Comando | LVPS | Comando |
|---------|---------|---------|---------|
| CPU_5V | 0x0Ah | HK_12V | 0x0Dh |
| HK5_5V | 0x0Bh | HK_3.3V | 0x0Eh |
| HK5_12V | 0x0Ch | HK_5V | 0x0Fh |

Tabla 4.6.- Identificadores de LVPS

ii. Lectura de parámetros del HK

Dado que se deben realizar la lectura de diversas variables de diferentes sistemas, para ello se ha propuesto una sola trama, en la cual a través de varios comandos se selecciona cuál de éstas es la deseada a monitorear. En la tabla 4.7 se muestra la estructura de la trama propuesta.

| Cabecera | Sistema | Índice | Parámetro | Fin | CRC H | CRC L |
|----------|---------|--------|-----------|------|--------|--------|
| 0x32 | Byte | Byte | Byte | 0x17 | Byte H | Byte L |

Tabla 4.7. Trama para la lectura de parámetros del HK.

- Cabecera: *Byte* con valor de 0x32h, el cual indica la lectura de una variable.
- Sistema: Este *byte* indica el sistema a monitorear. Se han seleccionado 3 valores: 0x71h para el sistema de LVPS, 0x72h para el sistema HK y 0x73h para el sistema de termistores.
- Índice: En este byte se indica el subsistema a monitorear.
- Parámetro: Representa la variable a monitorear, entre las cuales se puede encontrar temperaturas, voltajes, corrientes, variables atmosféricas o inerciales.
- Fin de bloque: *Byte* que indica el fin de la transmisión.
- Comprobación de redundancia cíclica: Constituida por 2 *bytes* los cuales son el resultado del CRC.

En la figura 4.42 se puede observar un desglose de los valores y comandos para la petición de lectura por parte de CPU.

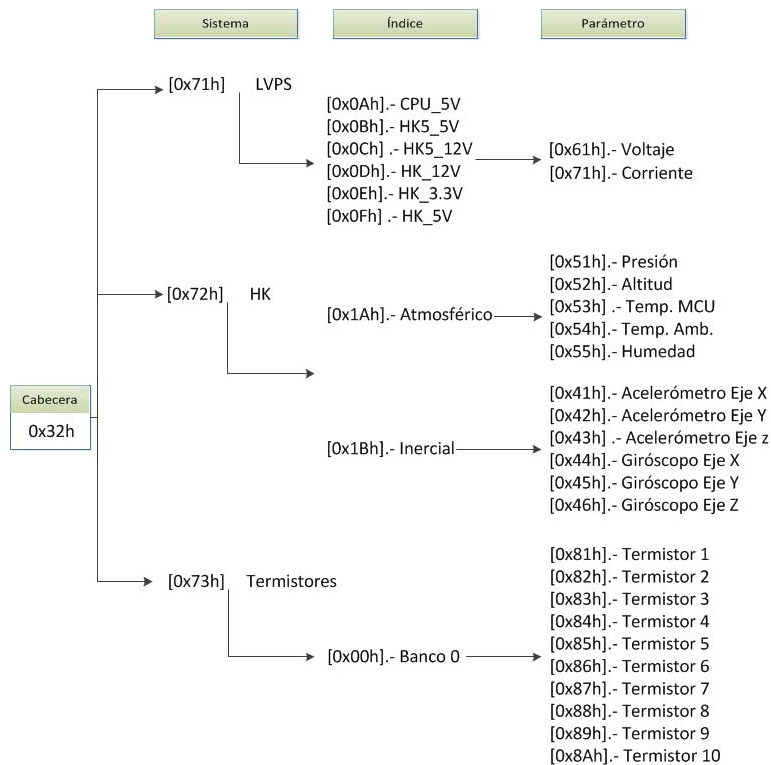


Fig. 4.42 Composición de los comandos de una trama de lectura

iii. Configuración de umbrales

Para esta tarea no se ha definido la estructura de la trama, sin embargo, se ha establecido el valor de 0x33 como cabecera para su identificación. Siendo así que para las posteriores versiones de software se implementarán los valores de los umbrales para los diversos parámetros críticos dentro de la misión.

Implementación

Para la implementación y validación del banco de pruebas de CPU, como primer paso se empleará una computadora portátil (laptop), para la validación del protocolo mediante una terminal de comunicación serie, además de que se ha elaborado un circuito de prueba que se muestra en la figura 4.43.

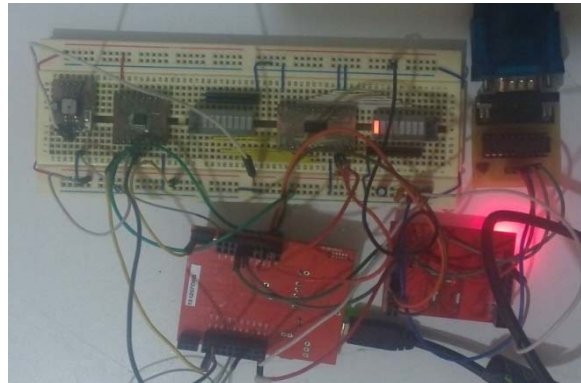


Fig. 4.43. Circuito de prueba para la validación de protocolo con CPU.

El circuito mostrado en la figura anterior está constituido de un expansor de puertos y dos barras de leds, esto con el fin de simular el encendido y apagado de las LVPS.

Encendido/apagado de LVPS

En el proceso de encendido/apaga de LVPS se ha realizado el envío de la trama para el encendido de la LVPS correspondiente a CPU_5V, cuya estructura estaría compuesta por la cabecera (0x31), el identificador de la LVPS (0x0A) y el byte de ON/OFF indicando el encendido del sistema (0xFF). Dicha trama es enviada mediante la terminal de comunicación serial mostrada en la figura 4.44. En ésta se observa, del lado derecho, los bytes antes descritos, mientras que del lado izquierdo se van observando los datos enviados por el HK_Pixqui.

Al enviar los datos por la terminal el HK_Pixqui ha de enviar un pulso en alto al relevador que actúa sobre dicha fuente. Es así que mediante la barra de leds se observará el envío de este pulso y por ende la activación del led correspondiente, mientras tanto el HK_Pixqui también informará del evento al desplegar un letrero de la acción realizada, el cual dirá “Activacion en LVPS” En la figura 4.44 se muestra el envío de la trama, mientras que en la figura 4.44 se tiene el resultado en el circuito físico.

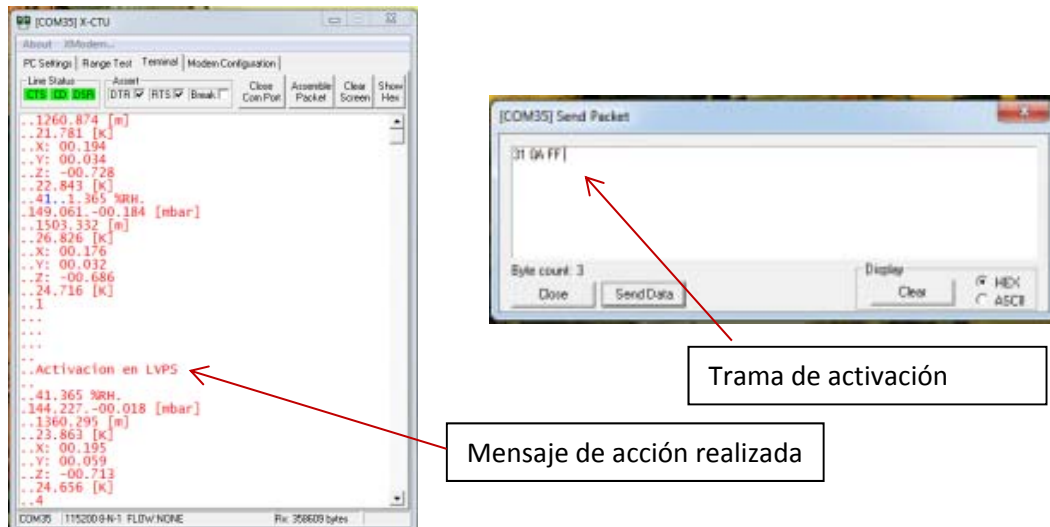


Fig. 4.44. Envío de la trama de encendido de LVPS.

En la figura 4.45 se observa el led correspondiente al encendido de la fuente de CPU_5V, cabe aclarar que en el sistema real, la duración del pulso en alto para la activación del relevador es de solo unos cuantos milisegundos, para fines prácticos se ha dejado encendido para poder comparar que la acción se ha realizado correctamente.

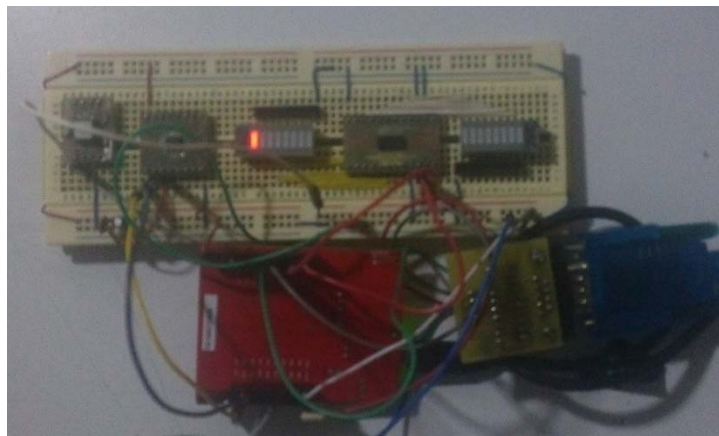


Fig. 4.45. Simulación del encendido de LVPS CPU_5V

Lectura de parámetro

Para la validación del reconocimiento de la trama de lecturas, se efectuó el envío de tramas distintas, siguiendo unas de las posibles configuraciones mostradas anteriormente en la figura 4.42. En la figura 4.46 se observa la petición por parte de CPU, del valor del voltaje de la LVPS CPU_5V, cuya trama está constituida por la cabecera 0x32, la cual corresponde a petición de parámetro, el byte 0x71 el cual es identificador del sistema a monitorear, en este caso las LVPS, el byte 0x0A que corresponde a la LVPS CPU_5V, y finalmente el byte 0x61 que indica que la variable

a monitorear es el voltaje. Una vez enviados estos bytes el microcontrolador atiende la interrupción y realiza la acción solicitada.

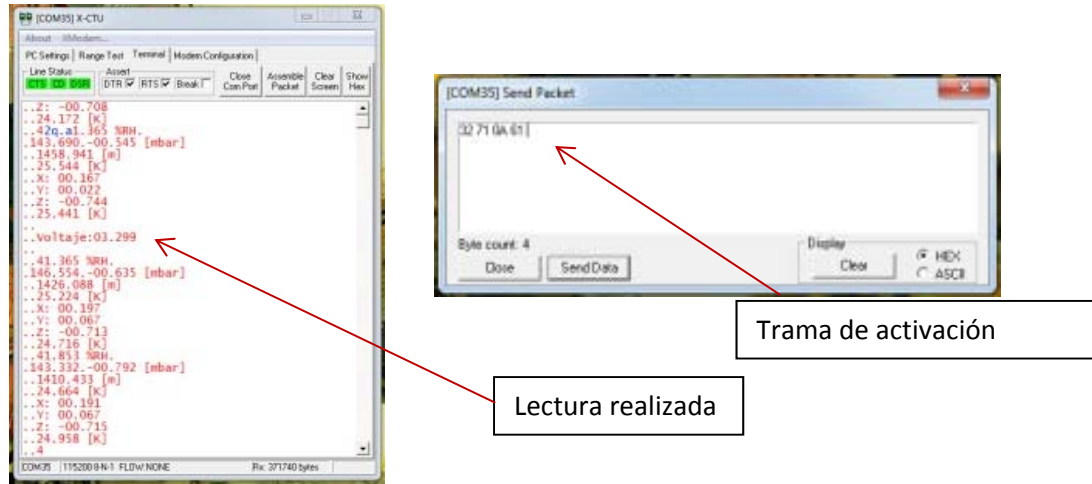


Fig. 4.46. Solicitud y respuesta a petición de lectura del voltaje de CPU_5V.

Una vez validado el protocolo, ante la necesidad de contar con un sistema autónomo, que sea capaz de proporcionar los comandos necesarios para el encendido de las LVPS, la lectura de los diversos parámetros dentro del sistema de HK_Pixqui y la toma de decisiones ante la presencia de una alarma en este último sistema, se ha diseñado el software con dichas características, el cual estará implementado en una *Raspberry Pi*. Se procedió a realizar la programación del sistema CPU empleando la tarjeta antes mencionada. En la figura 4.47 se observa el circuito de prueba empleado para la validación de la comunicación entre los sistemas HK_Pixqui y CPU.

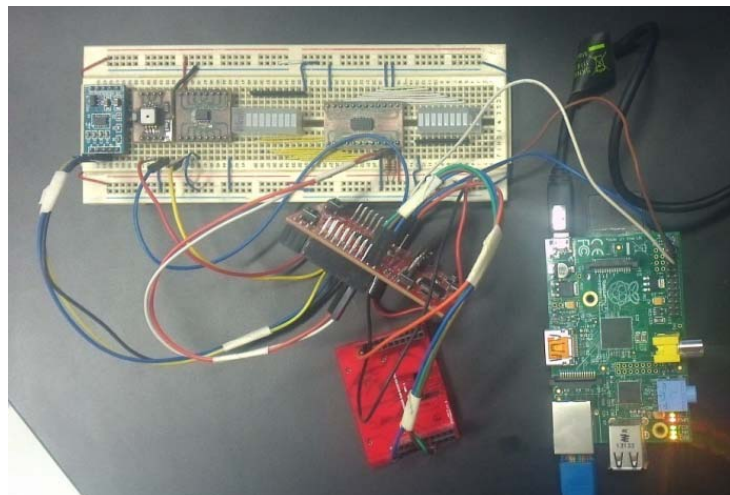


Fig. 4.47. Integración del sistema HK_Pixqui y el banco de pruebas CPU.

Interfaz

Para tener acceso y control sobre el funcionamiento de La CPU se empleó un escritorio remoto. Logrando así poder ejecutar el primer programa desarrollado para esta plataforma, el cual consta de un menú de opciones, las cuales corresponden a las tareas que ha de realizar el HK_Pixqui. En la figura 4.48 se observa dicho programa y la ejecución de la tarea de lectura de la presión, además de la respuesta del HK_Pixqui en código hexadecimal.

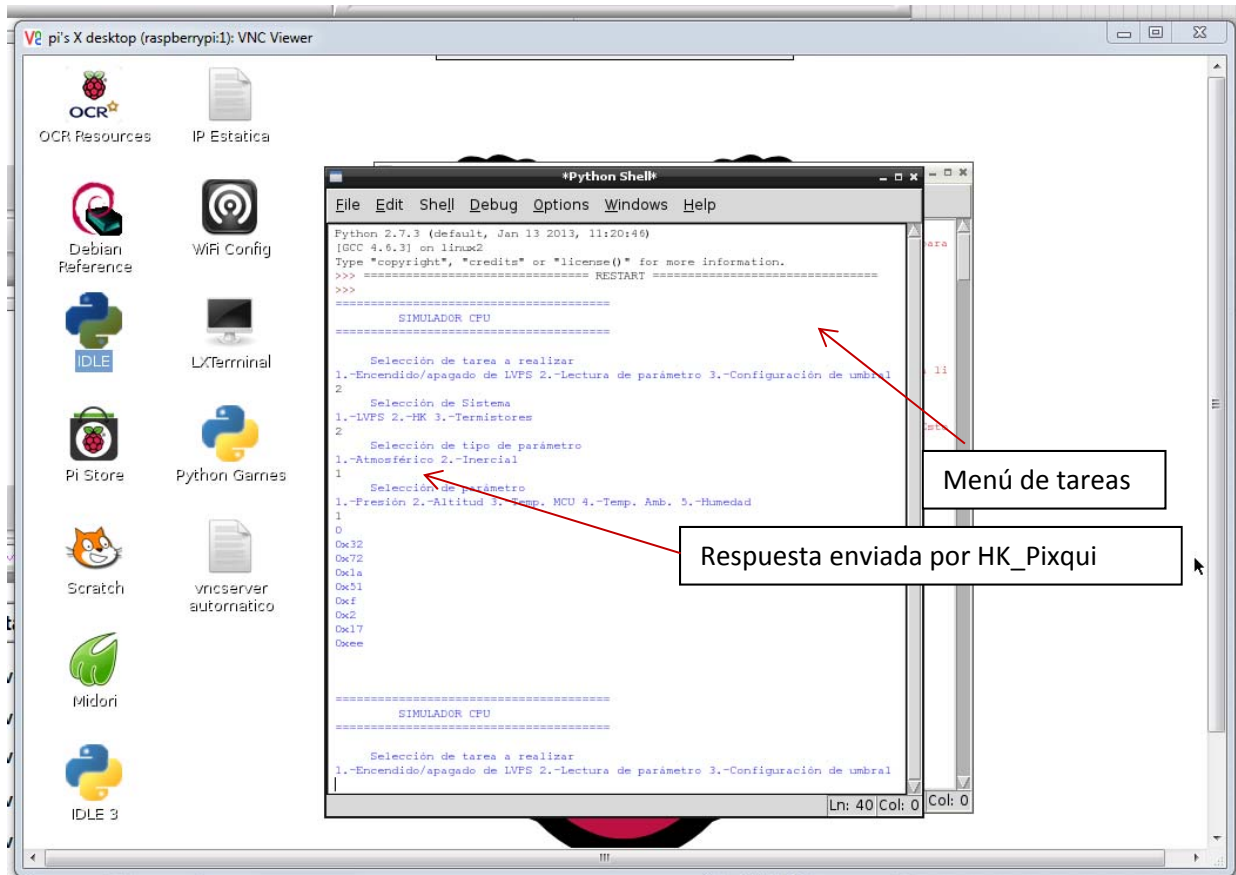


Fig. 4.48. Interfaz de control para el sistema CPU

En la interfaz mostrada, se cuenta con un menú que permite la selección de la tarea que realizará el HK_Pixqui. Este menú consta de tres opciones: 1.- Encendido/apagado de LVPS, 2.- Lectura de parámetro y 3.- Configuración de umbral, una vez seleccionada esta primer opción se despliega otra serie de opciones asociadas a la tarea; para el caso mostrado en la figura 4.48 se ha manejado la opción de lectura de parámetro y se ha seguido el flujo de opciones que el menú proporciona. Una vez que se envía la trama construida, el sistema CPU espera la respuesta del HK_Pixqui, de tal forma que se visualiza los datos recibidos en hexadecimal, ya que es en este formato en el cual, ambos sistemas estarán compartiendo y transmitiéndose información.

4.6.3 Banco de pruebas para el sistema de telemetría

La función que tiene la comunicación entre los sistemas HK_Pixqui y el de telemetría (TS), es la de que este último permita la visualización del monitoreo realizado a las diversas variables atmosféricas e inerciales, así como a las condiciones de operación de las fuentes de alimentación de la plataforma. HK_Pixqui enviará a TS la siguiente información:

- a. Mediciones atmosféricas: Altitud, presión, humedad y temperatura
- b. Mediciones inerciales: Aceleraciones lineal y angular
- c. Posicionamiento global: Geolocalización mediante el GPS
- d. Monitoreo de LVPS: Voltaje y corriente de las 6 fuentes de bajo voltaje de la plataforma
- e. Monitoreo de temperatura: Medición de los 10 termistores del HK_Pixqui

4.6.3 Logica de operación

Es así que se han propuesto 4 tramas de comunicación, constituida por una serie de *bytes*, ver tabla 4.8, cuyos identificadores son cabeceras, las cuales permiten identificar la clasificación de los datos enviados y el fin de trama.

| | Cabecera | Descripción | Fin |
|---|----------|--|------|
| 1 | 0x21 | Monitoreo de variables atmosféricas e inerciales | 0x17 |
| 2 | 0x22 | Monitoreo de LVPS | 0x17 |
| 3 | 0x23 | Monitoreo de termistores | 0x17 |
| 4 | 0x24 | Posicionamiento global | 0x17 |

Tabla 4.8. Tipo de tramas para la comunicación con SIREN.

Monitoreo de variables atmosféricas e inerciales

Se trata del envío de la información obtenida de las mediciones realizadas por el HK_Pixqui respecto a la altura, presión, humedad y temperatura ambiental. Así como de la temperatura del microcontrolador del sistema y las aceleraciones tanto lineales como angulares que experimenta éste. La trama está constituida por 25 *bytes*, cuya estructura es la mostrada en la tabla 4.9:

| Cabecera | Presión | | Altitud | | Temp_MCU | | Temp_Amb | | Humedad | |
|----------|------------|-------|------------|-------|---------------|-------|------------|-------|-------------|-------|
| 0x21 | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL |
| | Humedad | | A.L. Eje X | | A.L. Eje Y | | A.L. Eje Z | | A. A. Eje X | |
| | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL |
| | A.A. Eje Y | | A.A. Eje Z | | Fin de bloque | | CRC H | CRC L | | |
| | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | 0x17 | | ByteH | ByteL | | |

Tabla 4.9. Trama para el envío de variables atmosféricas e inerciales.

Los conceptos relacionados con la trama son:

- Cabecera: Byte con valor de 0x21, el cual indica el envío de variables atmosféricas e inerciales
- Presión, Altitud, Temp MCU, Temp Amb, Humedad: Variables atmosféricas enviadas a SIREN. Dado que la medición de cada una de estas variables se representa en 12 *bits* debido a la resolución del convertidor analógico digital del microcontrolador, cada una de las lecturas está representada en 2 *bytes*
- A.L. Eje X, A.L. Eje Y, A.L. Eje Z, A.A. Eje X, A.A. Eje Y, A.A. Eje Z: Variables inerciales enviadas a TS. A.L. es la abreviación de aceleración lineal, mientras que A.A. representa la aceleración angular; cada una es medida en sus tres ejes. Dado que la lectura tiene una resolución de 12 *bits*, ésta es representada en 2 *bytes*
- Fin de bloque: *Byte* que indica el fin de la transmisión
- Comprobación de redundancia cíclica: Constituida por 2 *bytes* los cuales son el resultado del CRC

Monitoreo de LVPS

Se trata del envío de la información obtenida de las mediciones realizadas por el HK_Pixqui, respecto a los voltajes y corrientes entregados por las fuentes de bajo voltaje (LVPS) con las que cuenta la plataforma. La trama está constituida por 27 *bytes*, cuya estructura es la mostrada en la tabla 4.9:

| | | | | | | | | |
|----------|---------|-------|-----------|-------|---------|-------|-----------|-------|
| Cabecera | CPU_5V | | | | HK5_5V | | | |
| | Voltaje | | Corriente | | Voltaje | | Corriente | |
| 0x22 | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL |

| | | | | | | | |
|---------|-------|-----------|-------|---------|-------|-----------|-------|
| HK5_12V | | | | HK_12V | | | |
| Voltaje | | Corriente | | Voltaje | | Corriente | |
| ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL |

| | | | | | | | | |
|---------|-------|-----------|-------|---------|-----------|---------------|-------|-------|
| HK_3.3V | | | | HK_5V | | Fin de bloque | CRC H | CRC L |
| Voltaje | | Corriente | | Voltaje | Corriente | | | |
| ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | 0x17 | ByteH | ByteL |

Tabla 4.10. Trama para el envío de variables del monitoreo de LVPS.

Los conceptos relacionados con la trama son:

- Cabecera: Byte con valor de 0x22, el cual indica el envío de las variables medidas en las fuentes de alimentación
- CPU_5V, HK5_5V, HK5_12V, HK_12V, HK_3.3V, HK_5V: Son las fuentes de bajo voltaje con las que cuenta la plataforma, cada una tiene dos variables que son monitoreadas: voltaje y

corriente. Ya que la resolución de la medición es de 12 *bits*, el dato es representado por 2 *bytes*

- Fin de bloque: *Byte* que indica el fin de la transmisión
- Comprobación de redundancia cíclica: Constituida por 2 *bytes*, los cuales son el resultado del CRC

Monitoreo de termistores

Se trata del envío de la información obtenida de las mediciones realizadas por los termistores colocados en la plataforma suborbital. La trama está constituida por 23 *bytes*, cuya estructura es la mostrada en la tabla 4.10:

| | | | | | | | | | |
|--------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Cabecera | Termistor 1 | | Termistor 2 | | Termistor 3 | | Termistor 4 | | |
| 0x23 | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | |
| ... | | | | | | | | | |
| Termistor 5 | | Termistor 6 | | Termistor 7 | | Termistor 8 | | Termistor 9 | |
| ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL | ByteH | ByteL |
| ... | | | | | | | | | |
| Termistor 10 | | Fin de bloque | CRC H | CRC L | | | | | |
| ByteH | ByteL | 0x17 | ByteH | ByteL | | | | | |

Tabla 4.10. Trama para el envío del monitoreo de termistores.

Los conceptos relacionados con la trama son:

- Cabecera: *Byte* con valor de 0x23, el cual indica el envío de las temperaturas medidas por los termistores.
- Termistor del 1 al 10. Representan las lecturas realizadas en cada uno de los termistores. Ya que la resolución de la medición es de 12 *bits*, el dato es representado por 2 *bytes*.
- Fin de bloque: *Byte* que indica el fin de la transmisión.
- Comprobación de redundancia cíclica: Constituida por 2 *bytes* los cuales son el resultado del CRC.

Implementación

Para el desarrollo del banco de pruebas del sistema TS, se estudió la posibilidad de implementar hardware basado en un microcontrolador para la interpretación de las tramas, su posterior procesamiento y envío para su visualización. Sin embargo, se ha optado por su implementación totalmente basada en software, por lo que el banco de pruebas de TS es una Interfaz Gráfica (IG) realizada en *LabView*, la cual permite la recepción de tramas, su identificación, procesamiento y visualización tan gráfica como numéricamente. La conexión física para la comunicación entre la interfaz y el sistema HK_Pixqui se realiza mediante un convertidor USB - RS232. Sin embargo,

para el prototipo final se empleará el protocolo RS422, esto con el fin de minimizar el posible ruido en la interfaz, además de mantener aisladas las tierras de alimentación de ambos sistemas.

Arquitectura de la Interfaz Gráfica

En la figura 4.49 se observa la interfaz gráfica (IG) desarrollada para la simulación del sistema TS. Es así que se ha dividido la IG en tres segmentos, correspondientes a las tramas implementadas en el sistema HK_Pixqui.

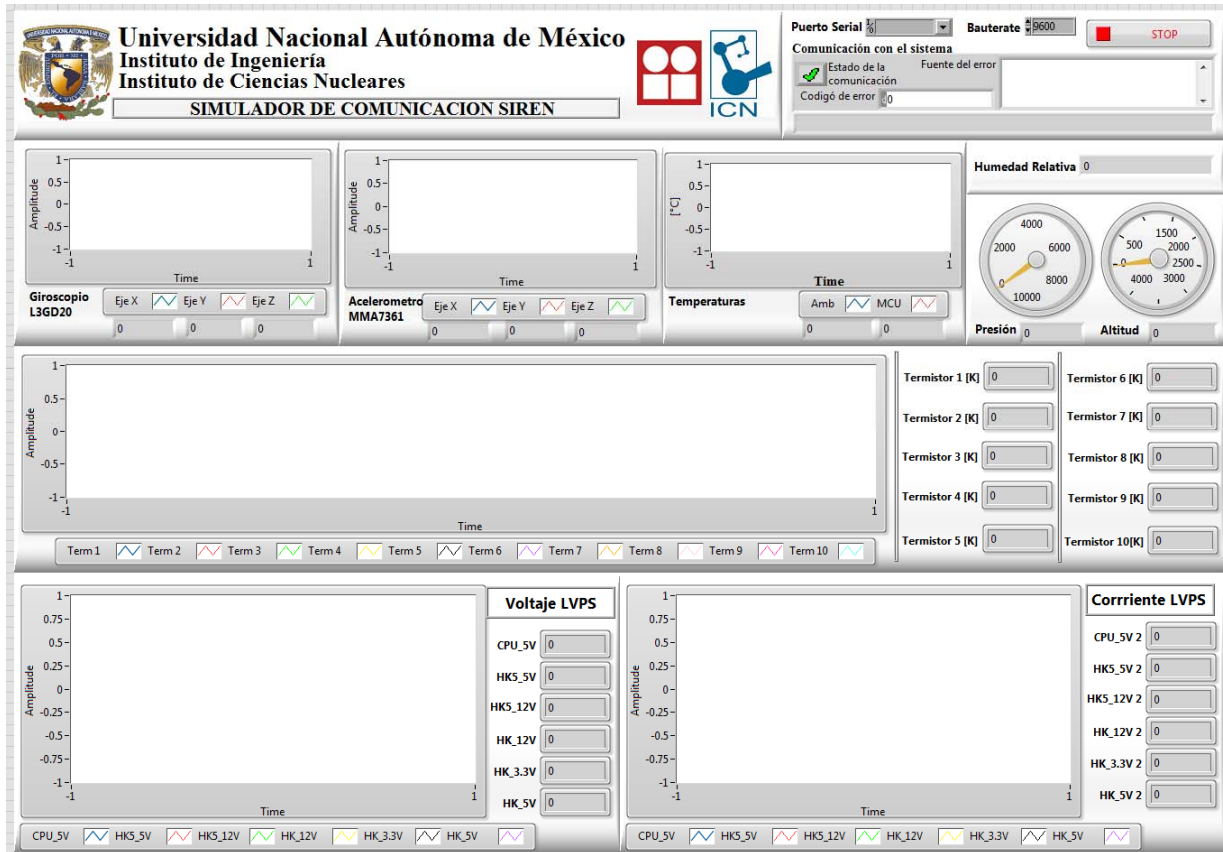


Fig. 4.49. GI para la simulación del sistema TS.

i. Estado de comunicación y monitoreo de variables atmosféricas e inerciales

En la figura 4.50, se muestra el segmento destinado a la configuración del puerto a emplear para la comunicación con el sistema HK_Pixqui, además de la velocidad de transmisión de datos (*Baudrate*). Aunado a eso se cuenta con una ventana para comprobar el estado de la comunicación y los datos recibidos. En relación a la recepción y procesamiento de las variables físicas del sistema HK, se cuenta con tres gráficas que despliegan las medidas de la aceleración angular (giroscopio), aceleración lineal (acelerómetro) y las temperaturas ambientales y del microcontrolador. También se ha implementado indicadores para la presión, altitud y humedad.

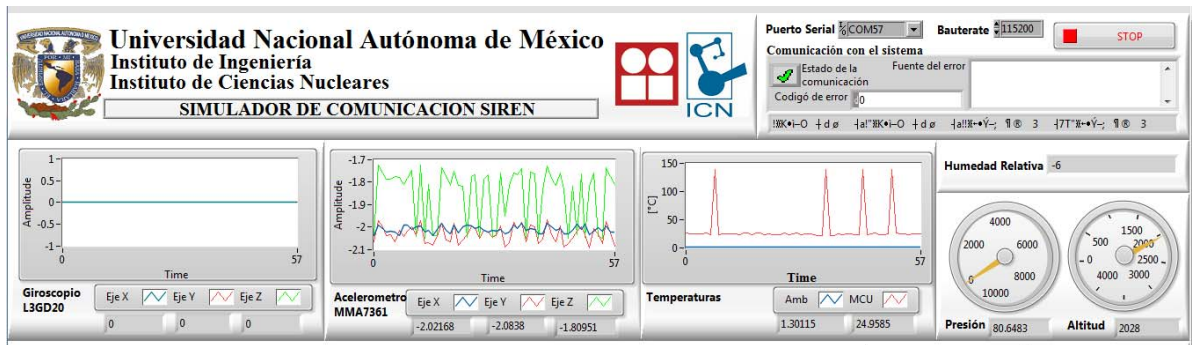


Fig. 4.50. Configuración de comunicación y monitoreo de variables atmosféricas e inerciales.

ii. Monitoreo de temperaturas

En la figura 4.51 se muestra el segmento relacionado con la medición de temperaturas, en la cual se visualizan las mediciones realizadas por los 10 termistores, cada una identificada por un color distinto, además de que se cuenta con un indicador numérico para cada uno de ellos.

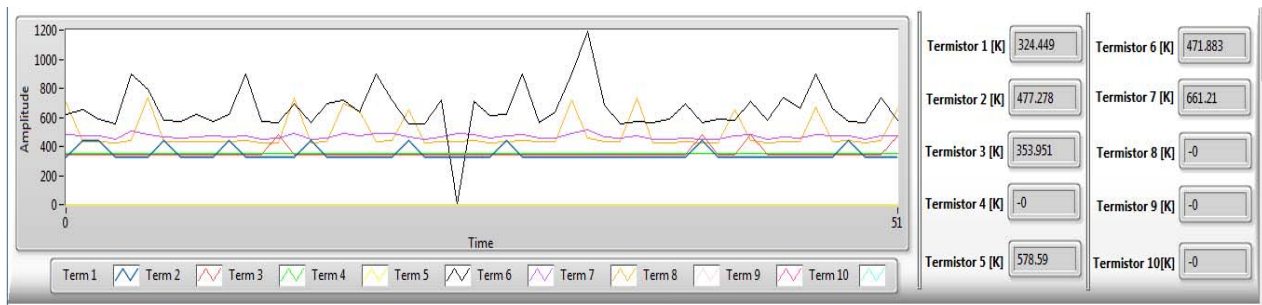


Fig. 4.51. Monitoreo de temperaturas.

i. Monitoreo de fuentes de bajo voltaje (LVPS)

En la figura 4.52 se tiene el monitoreo de fuentes de bajo voltaje. Para este segmento se implementaron dos gráficas, una destinada al voltaje y otra la corriente, de tal forma que en cada una se visualizan las mediciones realizadas a las 6 fuentes, además de que se cuenta con un indicador numérico para cada uno de ellas. En el momento de realizar la comprobación del funcionamiento de la IG, no se contaban con lecturas a monitorear, por lo que en la imagen se aprecia a cada una de las variables con un valor de cero.

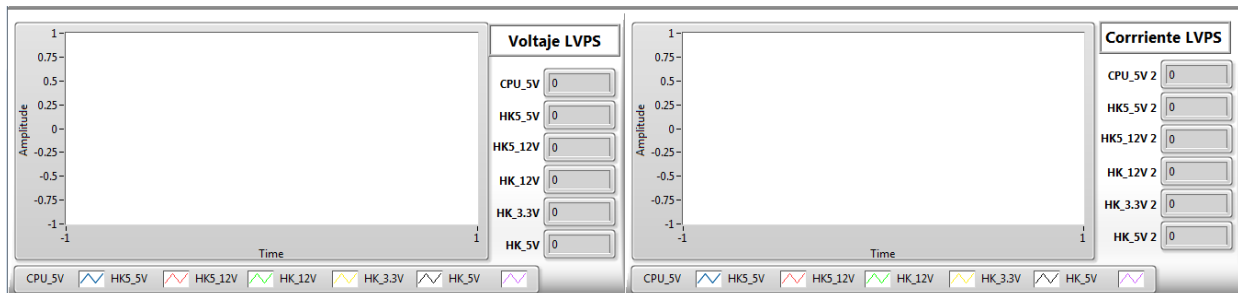


Fig. 4.52. Monitoreo de LVPS.

Pruebas de laboratorio

Para la validación del simulador de TS, se han conectado los sensores de presión y humedad al microcontrolador, además de que se ha configurado el sensor de temperatura interno de éste. De tal forma que se realizará la prueba del envío y recepción de tramas, así como el procesamiento y visualización de las variables de presión, humedad y la temperatura del microcontrolador. En la figura 4.53 se observa que se tiene una lectura de 80.68 kPa, lo cual es un valor cercano y que puede considerarse dentro de un rango aceptable ya que la presión absoluta en la Ciudad de México es de 77 a 78 kPa. La humedad relativa medida corresponde a un valor esperado, ya que comparándolo con el valor que provee el servidor climatológico el cual es de 46%RH, la medición realizada por el sensor es muy próxima.

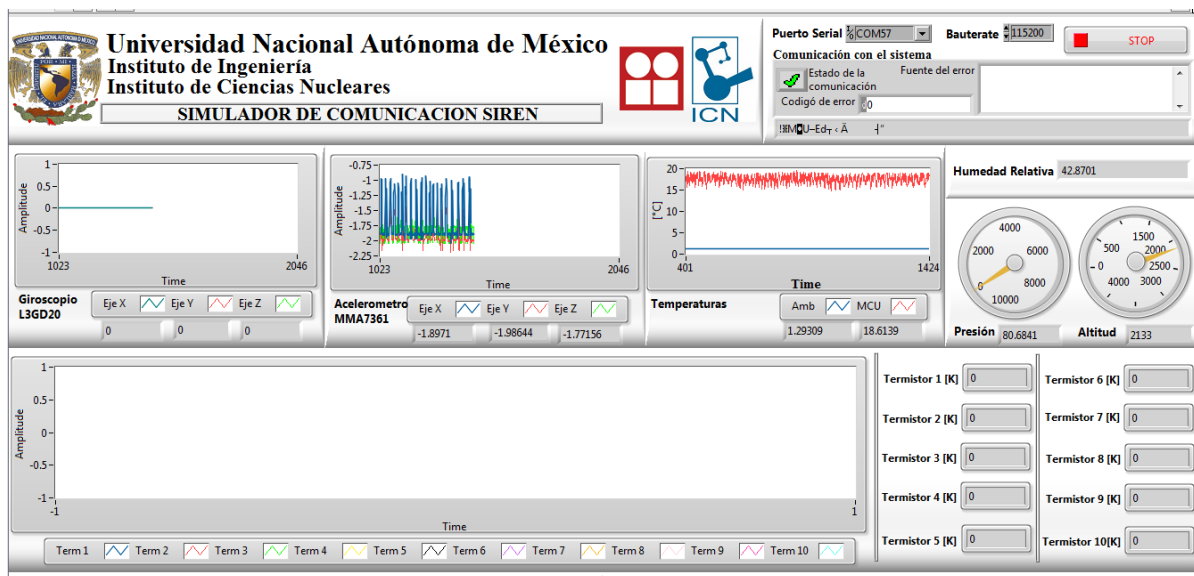


Fig. 4.53. Prueba de laboratorio del simulador de TS.

4.7. Diseño y fabricación del circuito impreso

Para el diseño de sistemas complejos una de las herramientas con las que se cuenta son las llamadas metodologías de diseño, las cuales forman parte de una teoría que busca proveer soluciones rápidas de manera sistemática para la vinculación de diversos subsistemas y variables.

i. Metodología *Top Down*

La metodología *Top Down* se comienza desde un nivel superior, es decir, se cuenta con un esquema en donde las especificaciones de operación están definidas por un sistema global. De tal manera que cada uno de los bloques que constituye el sistema general es trabajado en partes cada vez más pequeñas, esto con el fin de ir buscando establecer las funciones entre las partes del sistema con el objetivo de ultimar detalles.

Dentro de las ventajas que implica el diseñar bajo este concepto, es el hecho de que el impacto a causa de cambios que aparecen a lo largo del proceso se disminuye, debido a la división específica que tiene cada uno de los subsistemas.

ii. Metodología *Bottom Up*

En la metodología *Bottom Up*, se busca el reunir diferentes sistemas para conformar un todo. En este proceso se cuenta con bloques o subsistemas con una especificación a detalle, los cuales se van uniendo para así tener un sistema final, logrando con ello un nivel superior o esquema general. Lamentablemente, esta metodología presenta la desventaja de que si es necesaria una modificación durante el proceso, está resulta compleja, ya que implica el rediseñar desde el bloque mínimo.

Es así, que para el diseño del sistema HK_Pixqui se ha implementado la metodología *Top Down*, en donde partiendo del esquema general mostrado en la figura 2.1 del capítulo 2, se ha desarrollado cada uno de los bloques o subsistemas.

De tal forma que empleando *Altium Designer*, se ha realizado un diagrama a bloques, figura 4.54, en el cual cada uno de estos responde a los requerimientos mostrados en el esquema de la figura 2.1.

En donde:

- i. *High Level Command Part A*: Es el bloque mostrado en la figura 4.55, éste se encarga de acondicionar los pulsos generados por el microcontrolador para el encendido y apagado de las fuentes de bajo poder. Como se mencionó en el capítulo, en estos bloques se contempla el uso de un arreglo de transistores, esto con el fin de poder tener una señal con un nivel lógico de 12 volts, dado que es el voltaje necesario para activar los relevadores de las fuentes.

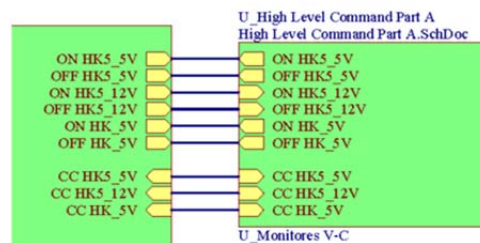


Fig. 4.55. Bloque de *High Level Command*.

- ii. *Monitores V-C*: En la figura 4.56 se muestra el bloque encargado para la conversión de las señales analógicas provenientes de las fuentes de bajo voltaje (LVPS). Dado que las señales son de tipo diferencial, se ha configurado el convertidor analógico-digital interno del microcontrolador de tal forma que pueda leer éste tipo de señales, con ello se ha eliminado la necesidad de acondicionar dichas señales para su conversión a una señal referencial.

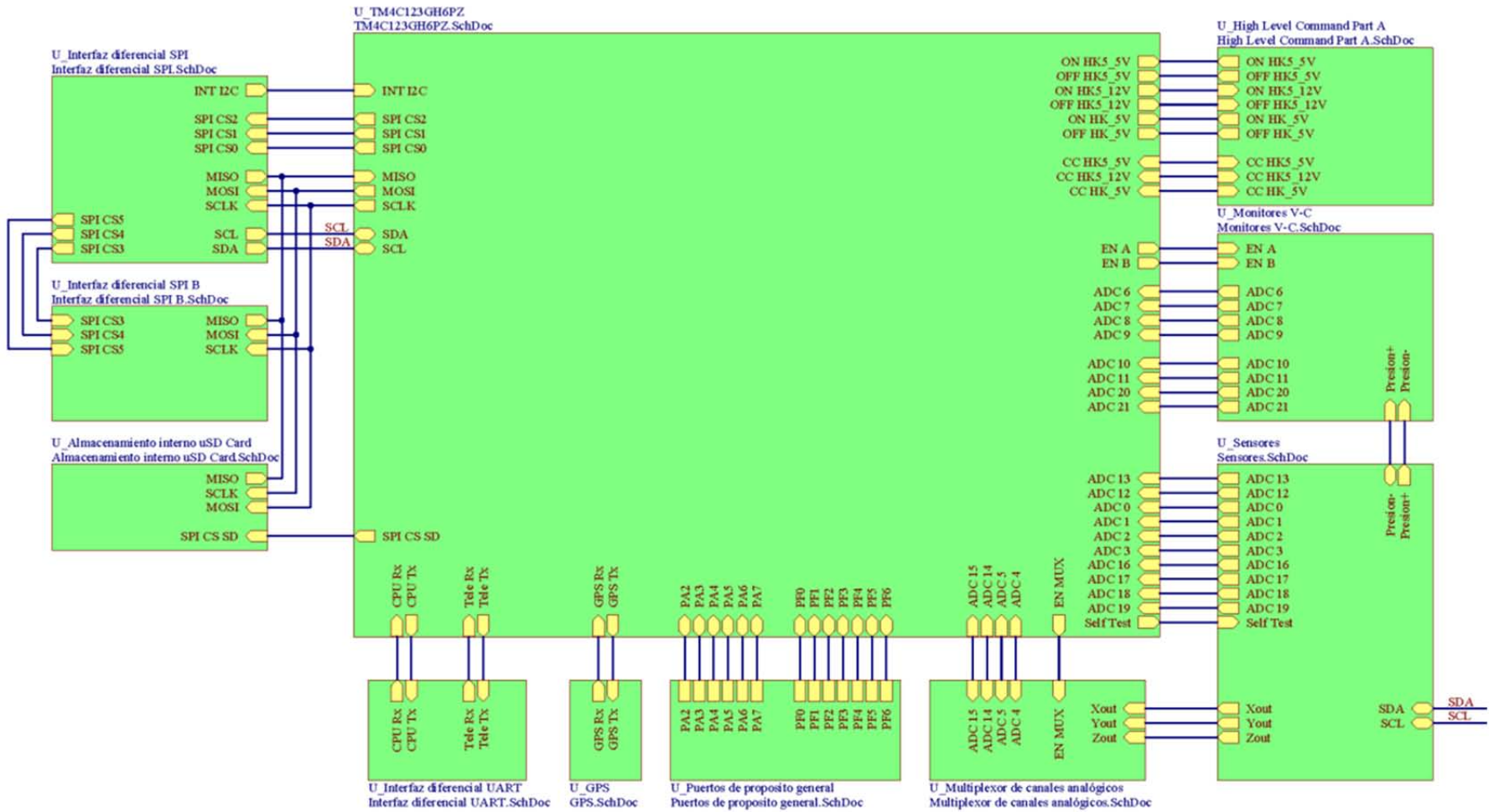


Fig. 4.54. Esquema a bloques del sistema HK_Pixqui.

Para este bloque se ha implementado un conjunto de multiplexores, que mediante dos señales de selección (EN A y EN B) determinar la LVPS que se ha de monitorear.

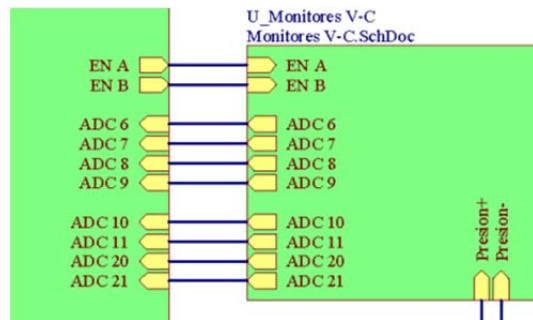


Fig. 4.56. Bloque de Monitores V-C.

iii. Sensores: Se trata del bloque en el cual se contemplan todos los sensores a emplear en el HK_Pixqui, figura 4.57. Se cuenta con los siguientes sensores:

- Sensor de presión (variable analógica diferencial)
- Sensor de aceleración (variables analógicas)
- Giróscopo (Protocolo I2C)
- Sensor de humedad (Protocolo I2C)
- 10 Termistores (variables analógicas)

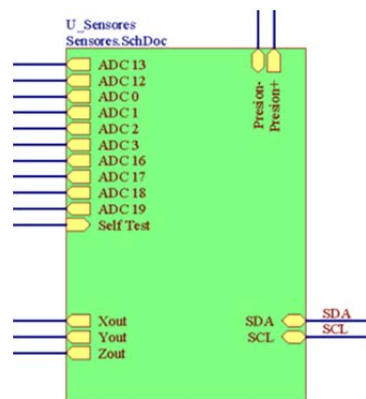


Fig. 4.57. Bloque de sensores.

En este bloque se hace uso de un canal de comunicación basado en el protocolo I2C, ya que como se mencionó, el giróscopo y el sensor de humedad operan bajo ese estándar. Además de que se cuenta con una terminal para la calibración y puesta a prueba del sensor de aceleración.

iv. Interfaz diferencial SPI A y B: En este bloque, figura 4.58, se cuenta con la electrónica necesaria para tener un protocolo SPI diferencial, el cual se empleará de esta forma para reducir ruido en la transmisión y recepción de datos.

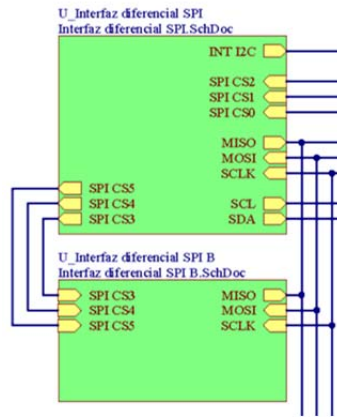


Fig. 4.58. Bloque Interfaz diferencial SPI A y B.

- v. Interfaz diferencial UART: De igual manera se ha realizado la conversión de las señales referenciadas en la comunicación UART a señales de tipo diferencial. Estas interfaces se comunicaran con los sistemas TS y CPU.

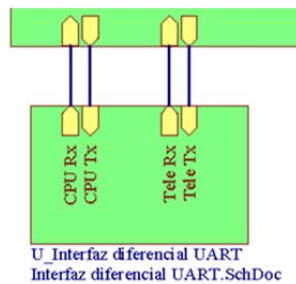


Fig. 4.59. Bloque Interfaz diferencial UART

- vi. Puertos de propósito general: En la figura 4.60 se muestra el bloque destinado a las terminales con las que contará el HK_Pixqui, las cuales estarán disponibles para futuras aplicaciones. Las funciones para las cuales podrán ser empleadas estas terminales son:
 - Comunicación con los protocolos SPI, CAN e I2C
 - Puertos de entrada y salida
 - Comunicación UART

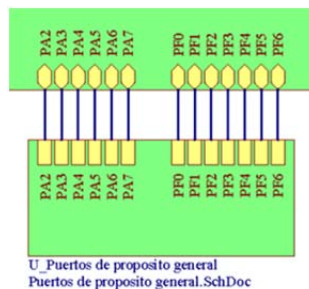


Fig. 4.60. Bloque de puertos de propósito general.

- vii. Multiplexores de canales analógicos: Con el fin de proveer al HK_Pixqui de canales analógicos extras, se implementó el bloque mostrado en la figura 4.61, el cual es un

multiplexor analógico con el que se logra que el HK_Pixqui cuente con 4 canales extras para su uso en posteriores misiones.

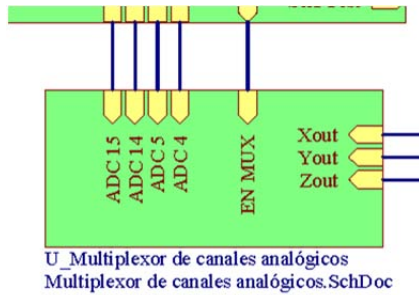


Fig. 4.61. Bloque de multiplexor analógico.

- viii. TM4C123GH6PZ: Es el bloque central, el cual cuenta con el microcontrolador empleado. En este bloque se tienen asignadas las terminales para cada uno de los bloques y es el encargado de hacer el control, monitoreo, almacenamiento y procesamiento de datos.

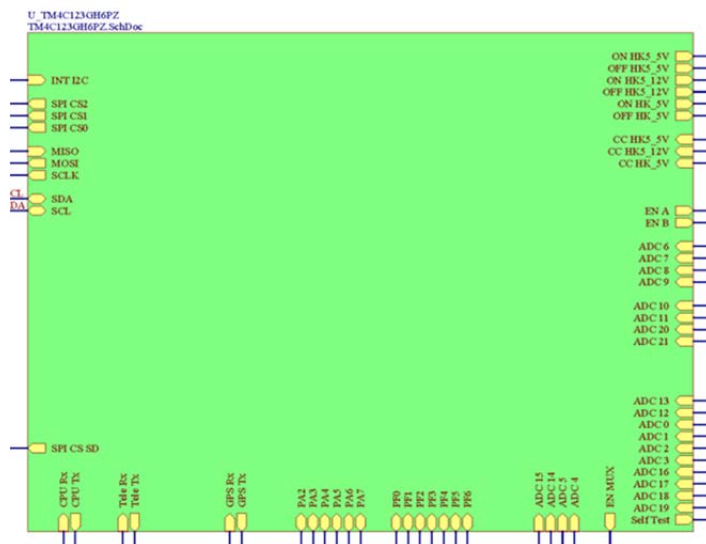


Fig. 4.62. Bloque central.

Una vez que se realizó el diseño de los bloques que conformarán el HK_Pixqui, se efectuó el trazado de las conexiones de la tarjeta electrónica siguiendo las consideraciones de diseño establecida por el fabricante del microcontrolador empleado [7]. En la figura 4.63 se muestra la visualización 3D de la tarjeta realizada.

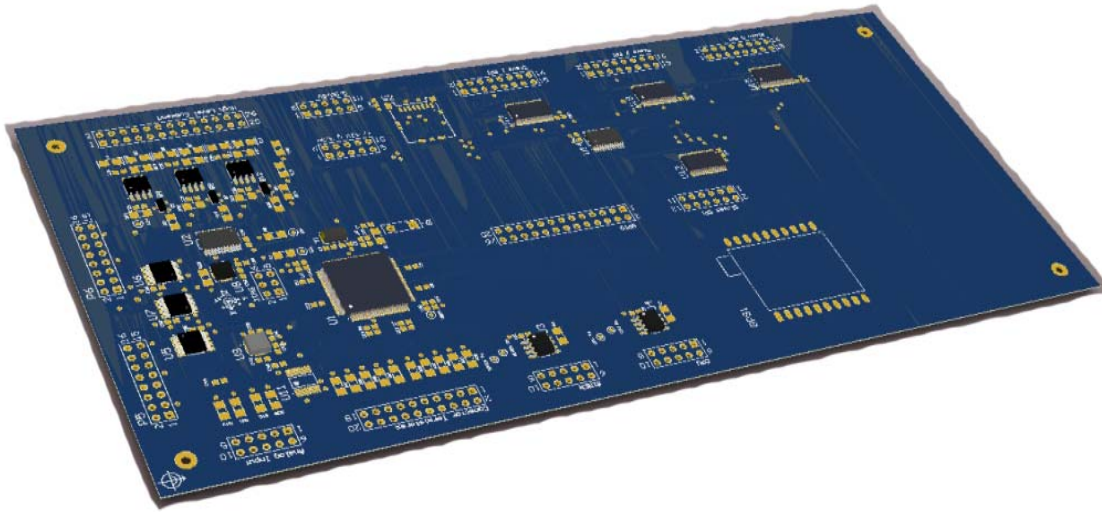


Fig. 4.63. Modelo 3D de la tarjeta electrónica del HK_Pixqui.

En este capítulo se ha abordado el desarrollo de pruebas en laboratorio a prototipos, los cuales servirán para efectuar las Pruebas en el modelo final del sistema HK_Pixqui. Es así que en el siguiente capítulo se tratarán los temas entorno al ensamble, pruebas y validación de la tarjeta diseñada, además de la lógica de operación final que se ha desarrollado para su funcionamiento e interacción con los sistemas de LVPS, CPU y TS.

Capítulo V

Evaluación y resultados

En este capítulo se abordarán las pruebas realizadas al prototipo desarrollado del sistema HK_Pixqui. Esto con el fin de comprobar el funcionamiento adecuado de las interfaces de comunicación serie, además del correcto monitoreo de las señales analógicas para el cual ha sido diseñado. Se ha planteado la evaluación tanto en condiciones ambiente así como de pruebas de vacío y ciclado térmico en la cámara de vacío del laboratorio del Instituto de Ciencias Nucleares.

5.1. Validación del microcontrolador en condiciones de vacío

El primer punto a evaluar del sistema es validar que el dispositivo lógico a emplear en HK_Pixqui es capaz de operar en condiciones de vacío y variaciones de temperatura que van de $-30[^\circ\text{C}]$ a $50[^\circ\text{C}]$. Para la validación de la operación del microcontrolador (MCU), en la figura 5.1 se muestra el sistema mínimo propuesto para ello,

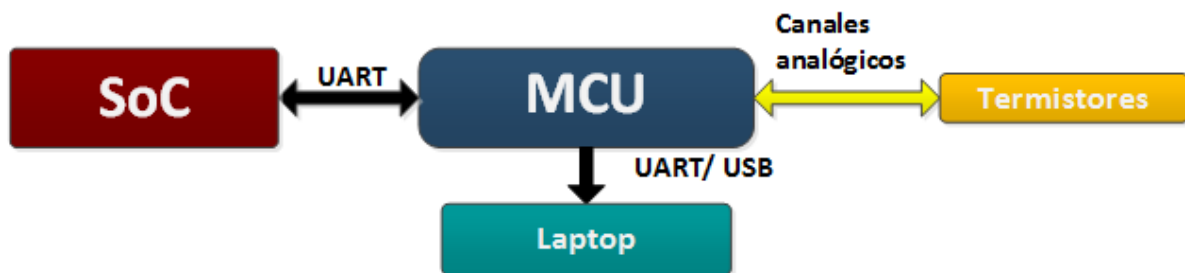


Fig. 5.1. Sistema para la validación del microcontrolador en vacío.

En donde el microcontrolador realizará las siguientes tareas:

- Monitoreo de 5 canales analógicos conectados a termistores NTC
- Procesamiento de las lecturas analógicas para su conversión en variables físicas relacionadas a las temperaturas medidas por los termistores
- Comunicación serial UART con un SoC con el fin de recibir datos de este sistema
- Comunicación serial UART hacia una computadora portátil (Laptop) para el envío de las señales monitoreadas y la información transmitida por la SoC

Se espera que el microcontrolador funcione adecuadamente en las condiciones antes descritas y así poder validar mediante las pruebas de estrés el dispositivo a emplear. En la figura 5.2 se

muestra el sistema ensamblado para su prueba, en el cual se tiene la SoC, los conectores a termistores, el microcontrolador y los conectores de alimentación y comunicación de la cámara de vacío.

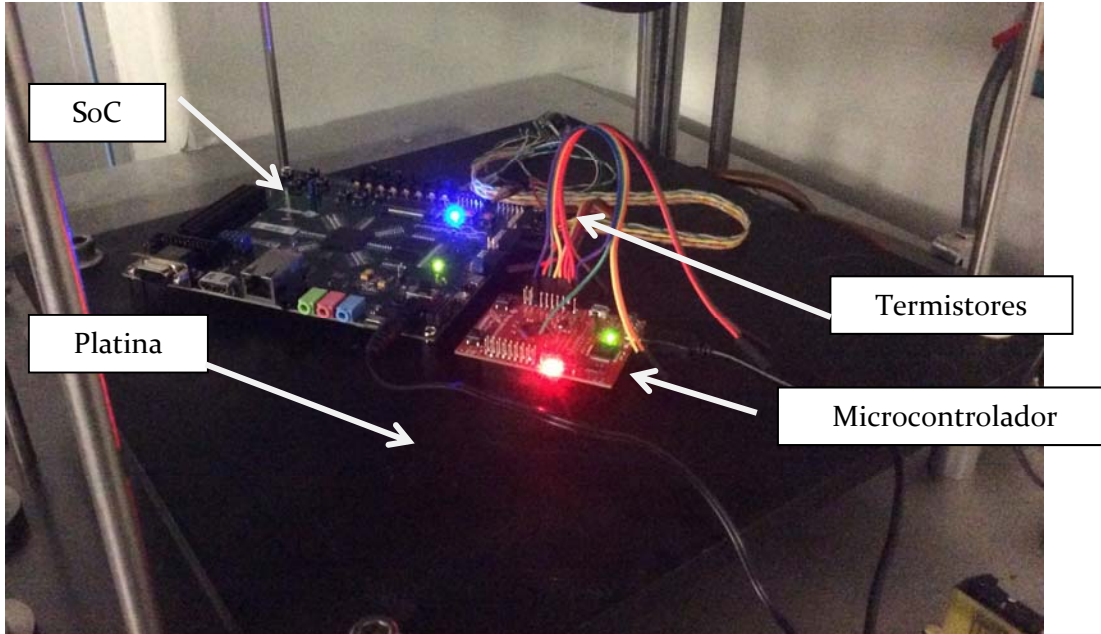


Fig. 5.2. Conexión entre MCU y SoC dentro de cámara de vacío.

Resultados de la prueba a presión ambiente

Para el uso del termistor se empleó el modelo Steinhart-Hart para la obtención de la temperatura, por lo que se procedió a caracterizar el termistor mediante las mediciones de la resistencia de éste a tres temperaturas distintas, obteniendo con ello los datos mostrados en la tabla 5.1.

| Temperatura [°C] | Número de mediciones | Resistencia promedio del termistor [Ohms] | Desviación estándar σ |
|------------------|----------------------|---|------------------------------|
| -3 | 20 | 38.9×10^3 | 0.054 |
| 24 | 20 | 10.65×10^3 | 0.0129 |
| 67 | 20 | 2.129×10^3 | 0.0125 |

Tabla 5.1. Mediciones realizadas a los termistores para su caracterización.

Con los datos obtenidos se generó el sistema de ecuaciones a continuación mostrado

$$\begin{bmatrix} 1/270.15 \\ 1/297.15 \\ 1/340.15 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \ln(38900) & c(\ln(38900))^3 \\ a & b \ln(10650) & c(\ln(10650))^3 \\ a & b \ln(2129) & c(\ln(2129))^3 \end{bmatrix}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se tiene que:

$$\begin{aligned} a &= 0.84526 \times 10^{-3} \\ b &= 2.76718 \times 10^{-4} \\ c &= -0.57765 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

Por lo que el modelo empleado para los termistores empleado en esta prueba y para el sistema en general será:

$$\frac{1}{T} = 0.84526 \times 10^{-3} + 2.76718 \times 10^{-4} \ln(R_T) - 0.57765 \times 10^{-7} (\ln(R_T))^3$$

A continuación se realizó la prueba de funcionamiento del sistema propuesto a temperatura y presión ambiente antes de que fuera introducido a la cámara de vacío. Los parámetros de interés para esta y las siguientes pruebas son: temperatura de microcontrolador, presión, temperatura de la platina de la cámara de vacío y consumo de potencia del microcontrolador. Para esta prueba las mediciones de temperatura para la platina se realizaron mediante el sensor propio de la cámara, mientras que la temperatura del MCU fue medida mediante el sensor propio de éste.

En la tabla 5.2 se muestran los resultados obtenidos de una serie de 20 mediciones a los parámetros de interés:

| | Presion [kPa] | Temp. del MCU [°C] | Temp. de platina [°C] | Corriente [A] | Voltaje [V] | Prueba de comunicación serie | Prueba de ADC y procesamiento |
|------------------------------|---------------|--------------------|-----------------------|---------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|
| Media | 78.1 | 19.761 | 25.2 | 0.123 | 3.3 | Validado | Validado |
| Desviación estándar σ | 0.106 | 0.0427 | 0.123 | 0.00489 | 0.001 | - | - |

Tabla 5.2. Mediciones realizadas a temperatura y presión ambiente.

De tal forma que se observa que el microcontrolador presenta un consumo de potencia constante, mientras que los datos recolectados por el monitoreo de variables y de transmisión de datos se efectuó de manera correcta además de que las lecturas realizadas no presentan una gran dispersión entre ellas, con lo cual se tiene que el dispositivo se comporta de manera estable tal como se esperaba al no haber variaciones de entorno que pudieran afectar su funcionamiento.

Resultados de la prueba de vacío

En la cámara de vacío es posible realizar la variación de temperatura y de presión de manera simultánea, de tal forma que se cuenta con conectores internos de diversos tipos, los cuales permiten realizar interfaces hacia el interior de ésta con los sistemas. En dicha cámara de vacío el proceso de validación consistió en realizar un ciclado térmico y medir con los termistores los comportamientos del microcontrolador y de la platina. Al iniciar el proceso se cerró la campana de la cámara de vacío con una temperatura en la platina de 24[°C]; indicada por el sensor de la cámara, para posteriormente comenzar a vaciar su interior hasta llegar a una presión de 1.2×10^{-3} [kPa]. En la figura 5.3 y 5.4 se muestran las temperaturas obtenidas a lo largo de la prueba.

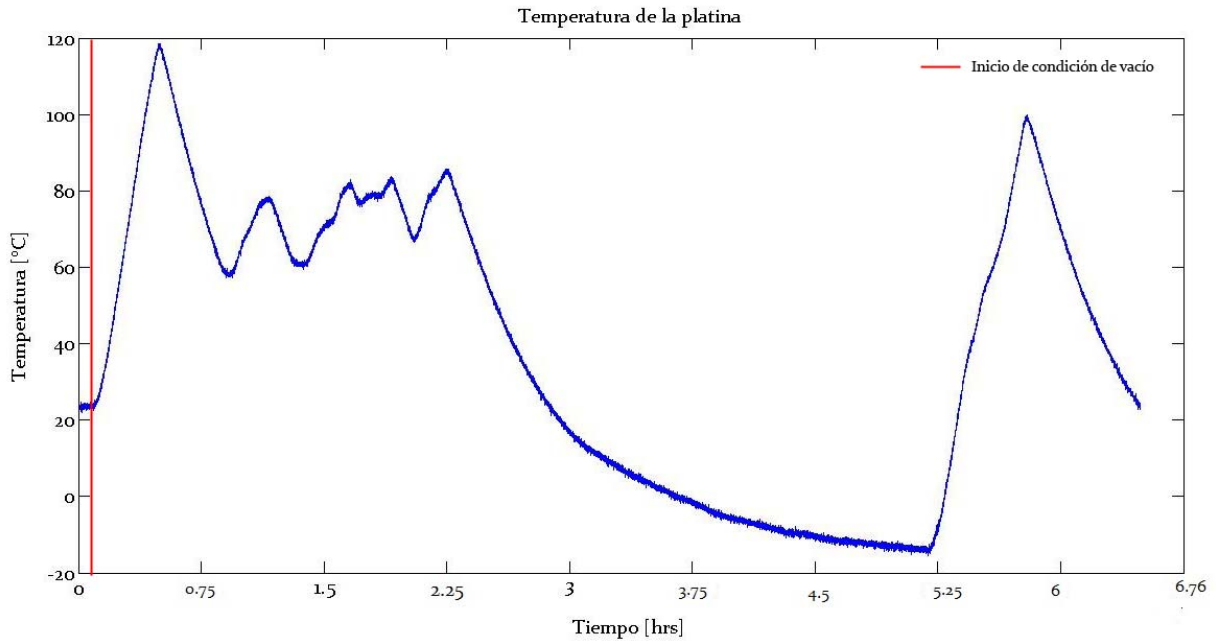


Fig. 5.3. Temperatura de la platina en prueba de vacío.

Al estar en condiciones de vacío, se procedió a elevar la temperatura de la platina, la cual es la fuente de radiación térmica que hace variar la temperatura dentro de la cámara. Se incrementó la temperatura hasta 120 [°C], la cual fue medida tanto por el sensor propio de la cámara como por el termistor colocado en la platina, para posteriormente descender y mantener la temperatura en un rango de 70 – 80 [°C] por al menos 2 horas. En la figura anterior se muestran oscilaciones entorno a los 60 y 80 [°C], debido a que el control de temperatura de la cámara no era el óptimo, ya que el sensor con el que la cámara dispone no realizaba un buen contacto con la platina.

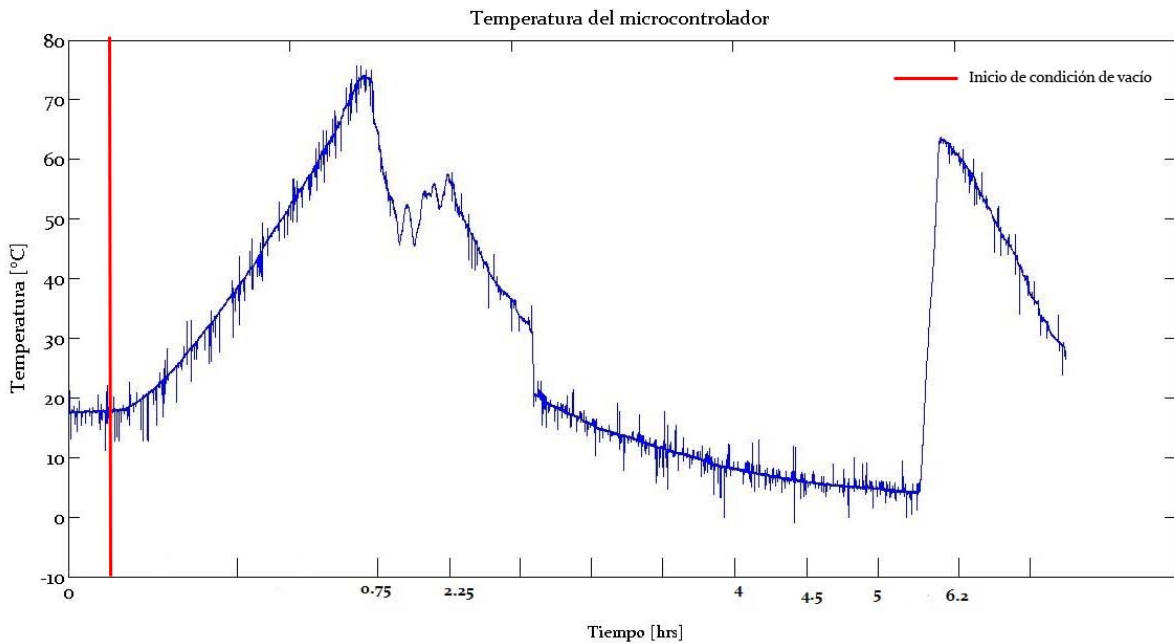


Fig. 5.4. Temperatura del microcontrolador durante prueba de vacío.

La gráfica mostrada en la figura 5.4 corresponde a las temperaturas del microcontrolador medidas mediante el sensor interno del dispositivo. Estas mediciones se realizaron a lo largo de la prueba y como se observa siguen un comportamiento similar al de la temperatura de la platina. Al iniciar la prueba el microcontrolador presentaba una temperatura interna de 19.7 [°C]. Al variar la temperatura de la platina, la temperatura máxima que alcanzó el microcontrolador fue de 75 [°C], mientras que la mínima temperatura de operación fue de 4[°C]. Sin embargo, a lo largo de toda la prueba se observa la presencia de ruido en la adquisición, por lo que se puede concluir que es necesario un acondicionamiento digital de señal, considerando que el sensor es del tipo *on-chip* en el microcontrolador.

En relación con los parámetros de interés, se efectuó la medición de estos cuando se estabilizaron las condiciones dentro de la cámara, obteniendo con ello las tablas mostradas a continuación. En la tabla 5.3 se tienen los resultados a 20 mediciones realizadas cuando la tarjeta electrónica se encontrada en condiciones de vacío a una temperatura de 24.5 [°C] en la platina.

| | Presion [kPa] | Temp. del MCU [°C] | Temp. de platina [°C] | Corriente [A] | Voltaje [V] | Prueba de comunicación serie | Prueba de ADC y procesamiento |
|------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|---------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|
| Media | 1.2 x10 ⁻³ | 19.512 | 24.5 | 0.120 | 3.3 | Validado | Validado |
| Desviación estándar σ | 0.112 | 0.0481 | 0.102 | 0.00543 | 0.001 | - | - |

Tabla 5.3. Mediciones en vacío a temperatura ambiente.

Con lo que se observó un comportamiento correcto del microcontrolador en el vacío, ya que las tareas de comunicación serie y adquisición por medio del ADC se realizaron con éxito, sin haber un cambio en el consumo del microcontrolador.

Dado que en el proceso en el que se elevaba la temperatura no se obtenía una estabilidad en el interior de la cámara de vacío, se decidió realizar la medición de los parámetros cuando la temperatura en la platina fuera de 80 [°C], es así que se tiene la tabla 5.4.

| | Presion [kPa] | Temp. del MCU [°C] | Temp. de platina [°C] | Corriente [A] | Voltaje [V] | Prueba de comunicación serie | Prueba de ADC y procesamiento |
|------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|---------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|
| Media | 1.2 x10 ⁻³ | 55.458 | 80.117 | 0.160 | 3.3 | Validado | Validado |
| Desviación estándar σ | 0.107 | 0.0529 | 0.124 | 0.00521 | 0.001 | - | - |

Tabla 5.4. Mediciones en vacío a temperatura de 80[°C].

En la tabla anterior, se observa que el consumo del microcontrolador ha aumentado además de que su temperatura interior también lo ha alcanzado los 55[°C]. Sin embargo, el microcontrolador siguió comunicándose de manera adecuado con los sistemas con los estaba conectado.

Para el periodo en que la temperatura de la cámara de vacío descendió, se tomaron las mediciones de los parámetros de interés cuando se alcanzó la mínima temperatura registrada, obteniendo así la tabla 5.5.

| | Presion [kPa] | Temp. del MCU [°C] | Temp. de platina [°C] | Corriente [A] | Voltaje [V] | Prueba de comunicación serie | Prueba de ADC y procesamiento |
|------------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|---------------|-------------|------------------------------|-------------------------------|
| Media | 1.2×10^{-3} | 4.112 | -18.324 | 0.120 | 3.3 | Validado | Validado |
| Desviación estándar σ | 0.103 | 0.0378 | 0.163 | 0.00473 | 0.001 | - | - |

Tabla 5.5. Mediciones en vacío a temperatura de -18[°C].

Se observa que el consumo del microcontrolador volvió a ser el presentado en condiciones de temperatura ambiente, mientras que la temperatura mínima alcanzada por el dispositivo fue de aproximadamente 4[°C]. En este periodo el microcontrolador siguió operando de manera adecuada en las tareas para las cuales fue diseñado.

Estas gráficas son producto de los datos enviados por el microcontrolador hacia la computadora portátil, por lo que esto permite comprobar que en todo momento el dispositivo estuvo funcionando en condiciones de vacío y ante una temperatura de un valor extremadamente alto, ya que el máximo de operación para el cual está caracterizado el dispositivo es de 80 [°C].

5.2. Integración de Hardware

En el capítulo anterior se evaluaron los componentes e interfaces con las que contará el HK_Pixqui. Es así que al contar con la tarjeta electrónica del prototipo realizado se procederá a validar su funcionamiento en condiciones de vacío y variaciones térmicas. En la figura 5.5 se muestra la tarjeta electrónica de manera física del sistema HK_Pixqui, la cual es la que se empleará para las pruebas de evaluación. La integración de los componentes que componen al sistema HK_Pixqui se realizó de manera modular, es decir, se evaluaron paso a paso cada uno los bloques que componen al sistema esto con el fin de detectar errores de manera local y de manera inmediata.

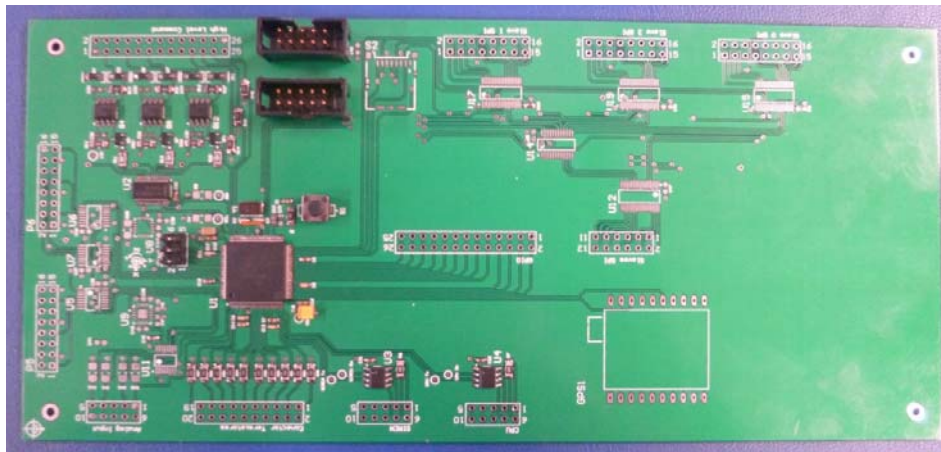


Fig. 5.5. Tarjeta electrónica del sistema HK_Pixqui.

5.3. Evaluación y caracterización del prototipo final

Se realizó el montaje de los componentes electrónicos de PCB del sistema para su validación.

5.3.1. Pruebas de interfaces externas

Para realizar la validación de las interfaces con las que contara el HK_Pixqui, se realizaron las siguientes pruebas:

- Interfaz JTAG
 - Programación y depuración del sistema HK_Pixqui
- Comunicación SPI diferencial
- Comunicación Serie UART
 - Interacción entre el GPS y el HK_Pixqui
- Comunicación Serie RS-422
 - Interacción entre los sistemas CPU y el HK_Pixqui
- Activación de subsistemas
 - Encendido y apagado de relevadores empleando el circuito de *High Level Command*
- Adquisición analógica
 - Monitoreo de voltajes y corrientes de las LVPS
 - Lectura de termistores y almacenamiento en memoria SD_Card

Interfaz JTAG

La interfaz JTAG[8] permite la programación y depuración del software desarrollado para el microcontrolador del HK_Pixqui, es así que mediante la conexión con esta interfaz se validará que el diseño de la tarjeta entorno al dispositivo es correcta. En la figura 5.6 se muestra el esquema de conexión implementado para validar la comunicación.

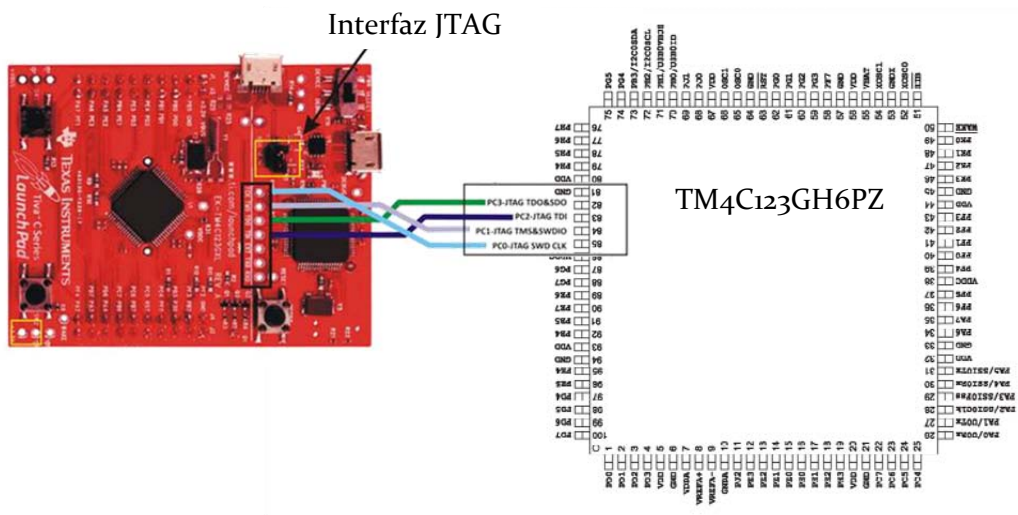


Fig. 5.6. Conexión de la interfaz JTAG.

Como se muestra en la figura 5.7, se realizó la conexión del programador con la tarjeta del HK_Pixqui y se procedió a realizar el reconocimiento y programación del dispositivo.

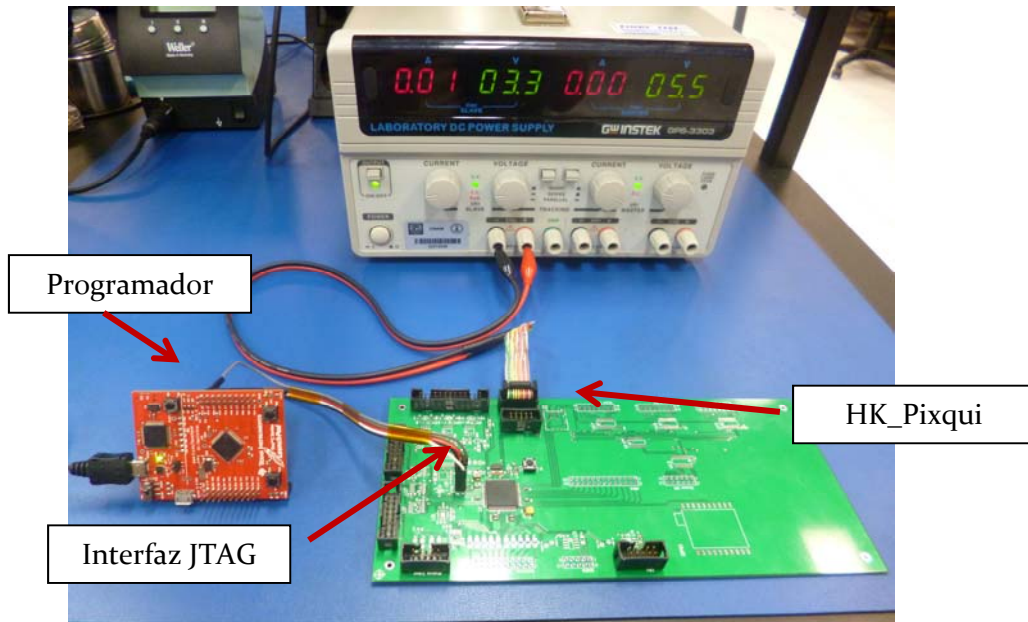


Fig 5.7. Conexión de programador con la tarjeta de HK_Pixqui para su configuración.

Durante la realización de la prueba el consumo de corriente de la tarjeta fue de 10mA a 3.3V, esto considerando que únicamente se encontraba soldado el microcontrolador.

Como se muestra en la figura 5.8, se obtuvo el resultado esperado ya que la computadora logró reconocer el microcontrolador, Se observa en la figura, la ventana de la plataforma *Code Composer Studio (CCS)*, en la cual se realizó la depuración del código desarrollado para el dispositivo con el que cuenta la tarjeta electrónica.

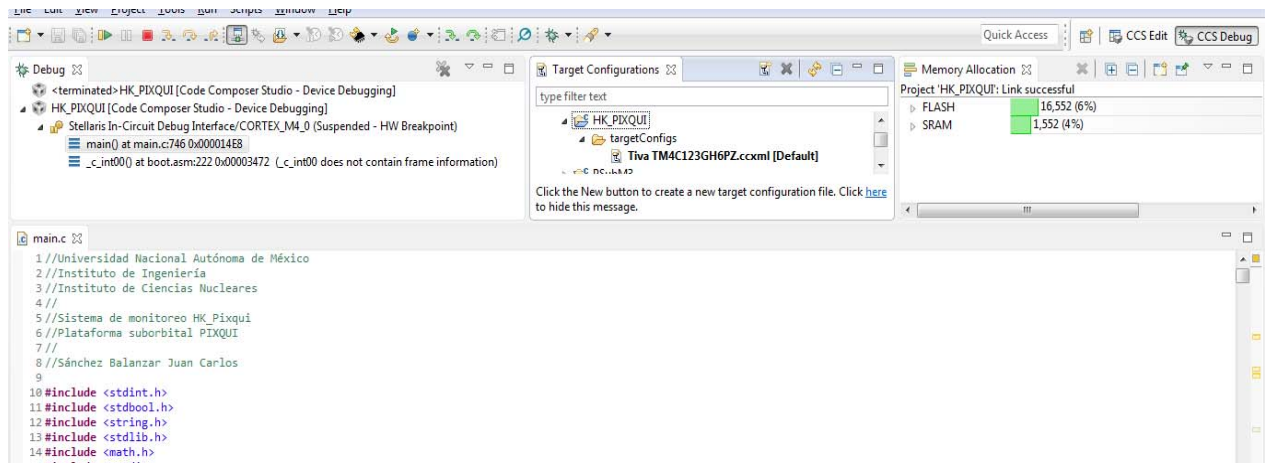


Fig. 5.8. Reconocimiento del microcontrolador mediante CCS.

Comunicación SPI diferencial

Dado que actualmente no existe un sistema definido con el cual comunicarse mediante el protocolo SPI diferencial, se diseñó para la validación de la comunicación SPI diferencial, una prueba en donde se envió una serie de bytes mediante el bus de comunicación el cual consistirá en los datos mostrados en la tabla 5.6.

| | Datos a enviar | | | | | | | | |
|----------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Valor en ASCII | H | K | _ | P | I | x | q | u | i |
| Valor en Hexadecimal | 0x48h | 0x4Bh | 0x5Fh | 0x50h | 0x69h | 0x78h | 0x71h | 0x75h | 0x69h |

Tabla 5.6. Datos a enviar mediante protocolo SPI.

De tal manera que para la realización de la prueba se han empleado los siguientes elementos:

- Sistema HK_Pixqui, el cual cuenta con convertidores de señales referenciales a diferenciales. Esto con el fin de contar con el protocolo SPI diferencial.
- Osciloscopio Tektronix MSO5204, el cual cuenta con software especializado que permite la lectura de diversos protocolos de comunicación serie entre los que se encuentran: SPI, UART, CAN, I2C. [8]

En la figura 5.9 se muestra el esquema para esta prueba.

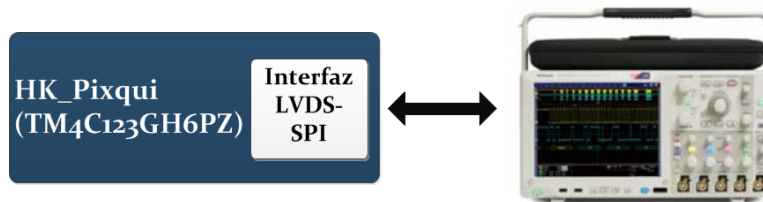


Fig. 5.9. Esquema de prueba de interfaz SPI diferencial del HK_Pixqui.

La cadena de datos se logró observar con ayuda del osciloscopio digital, el cual cuenta con un módulo de comunicaciones seriales que permiten la identificación de los diversos protocolos que se han de emplear. En la figura 5.10 se puede observar una captura de pantalla del osciloscopio.

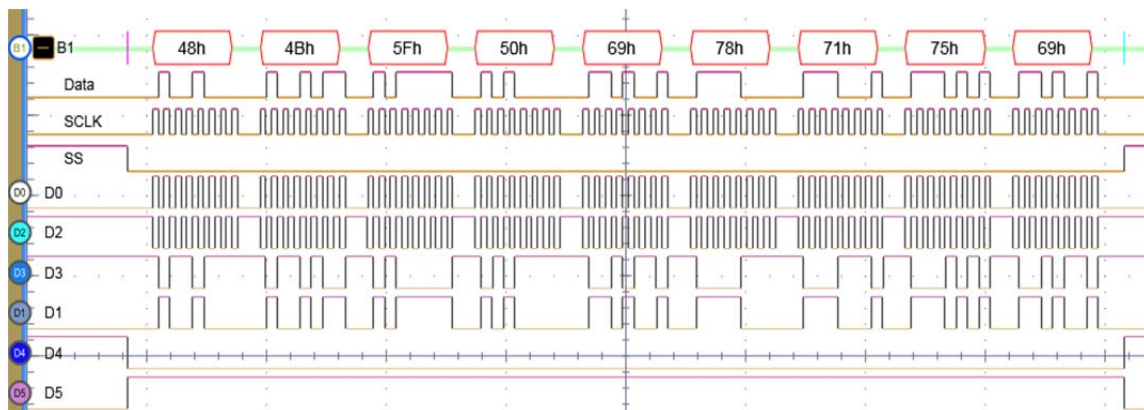


Fig. 5.10. Trama enviada mediante la interfaz SPI diferencial.

De tal forma que en la figura 5.10 se observan las líneas diferenciales en los canales digitales D0-D5, los cuales son procesados por el osciloscopio teniendo como resultado la identificación de las líneas de comunicación del protocolo, MOSI(Data), Chip Select(SS) y CLK (SCLK). Una vez identificadas las líneas, se tiene que existe similitud entre los datos planteados en la tabla 5.5 a enviar y los datos adquiridos mediante el osciloscopio.

Comunicación Serie UART

En la realización de la prueba de comunicación serie UART se utilizaron los dispositivos GPS EM-506 y el osciloscopio empleado anteriormente en la validación de la comunicación serie SPI. En la figura 5.11 se muestra el esquema empleado para esta prueba.

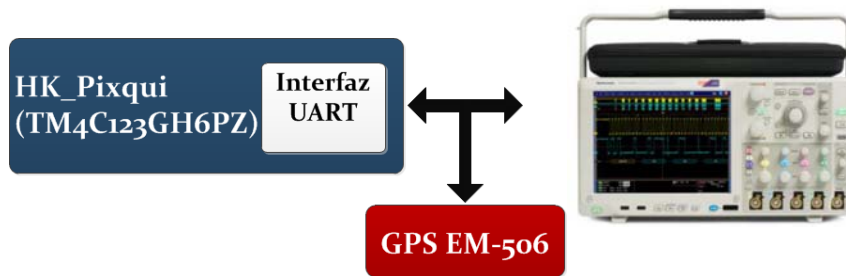


Fig. 5.11. Esquema de prueba de interfaz UART del HK_Pixqui.

En la figura 5.12 se muestra el HK_Pixqui con el GPS empleado para la prueba, además del programador para la depuración de código y la comprobación de los datos enviados por el localizador digital.

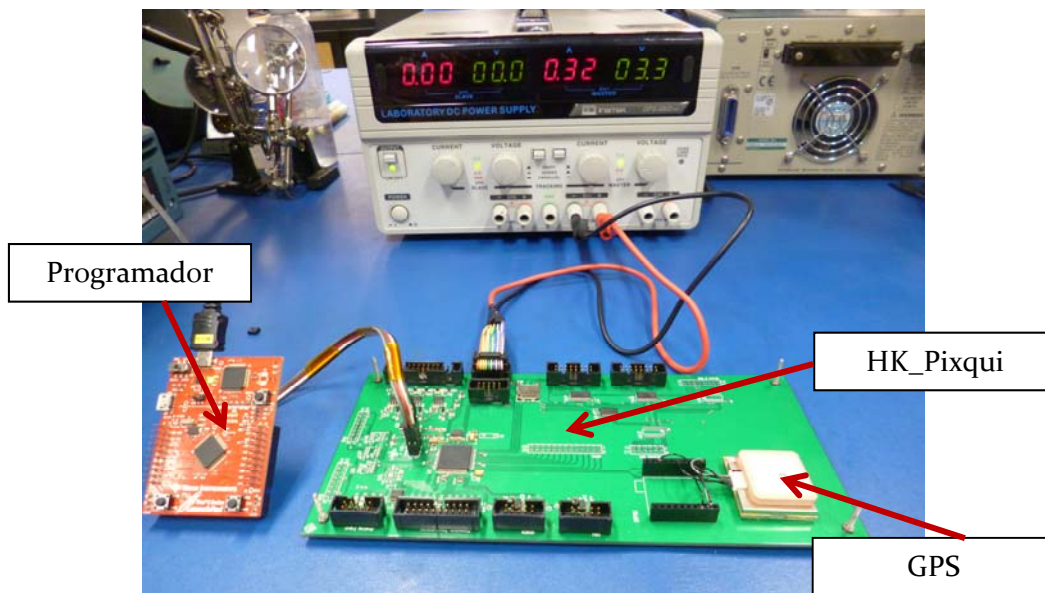


Fig. 5.12. Conexión entre GPS y HK_Pixqui para prueba de validación.

Comunicación Serie RS-422

El estándar RS-422 o TIA/EIA-422[9] utiliza señales balanceadas del tipo diferencial para resolver los problemas de *crosstalk* que se presentan en interfaces *single-ended*, esto permite aumentar la velocidad de transmisión. Además de eliminar problemas de ruido debido a las entradas comunes, es así que el diseño del HK_Pixqui cuenta con este estándar para favorecer la comunicación entre CPU y el sistema de telemetría. Para la validación de la interfaz RS-422 con la que cuenta el HK_Pixqui, se planteó como primer paso el diseño de una prueba en la que se realiza el envío de una trama definida, de manera similar a la prueba de la interfaz SPI. De tal forma que se programó el envío de la trama "HK_Pixqui" por el puerto serie RS-422. En la figura 5.13 se muestra el esquema de prueba realizado.

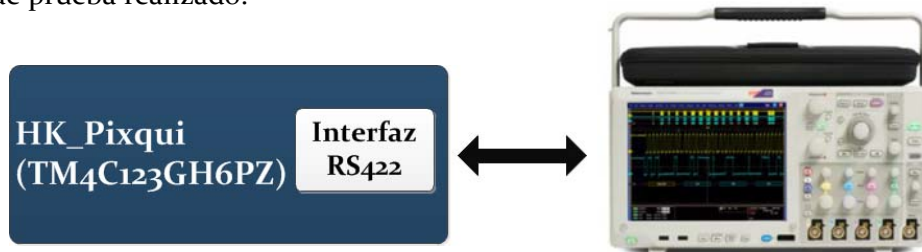


Fig. 5.13. Esquema de prueba de la interfaz RS-422 del HK_Pixqui.

Esta prueba fue importante ya que permitió comprobar que el HK_Pixqui puede realizar la transmisión de datos mediante los puertos UART con los que fue diseñado y que son fundamentales para su control y comunicación durante los vuelos estratosféricos.

Para verificar que la correcta transmisión de datos, se planteó la realización de una prueba en la cual se emplearía el banco de pruebas de CPU con el cual se evaluaría tanto la recepción, procesamiento y transmisión de datos mediante el la interfaz RS-422.

Dado que se emplearía el sistema CPU para la validación del HK_Pixqui, se decidió emplear el banco de pruebas de LVPS, ya que de esta forma se validaría la correcta ejecución de instrucciones por parte del sistema diseñado además de validar el funcionamiento de los circuitos de *High Level Command (HLC)*. Es así que en la figura 5.14 se muestra el esquema empleado para esta prueba.

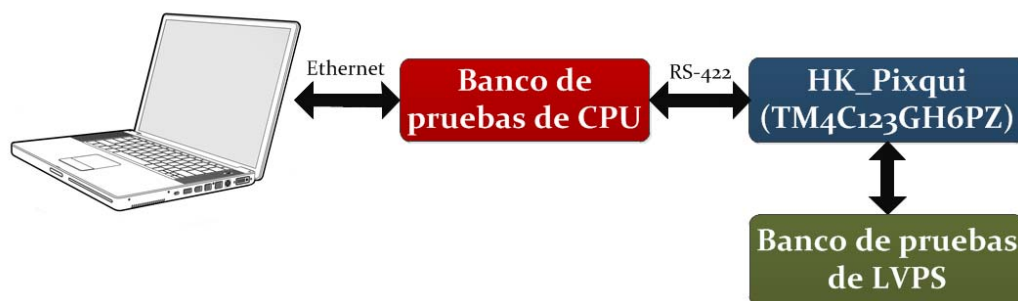


Fig. 5.14. Esquema de prueba para la validación de interfaces con CPU y HLC.

En la figura 5.15 se muestra las conexiones realizadas para efectuar la validación de la comunicación entre los distintos sistemas.

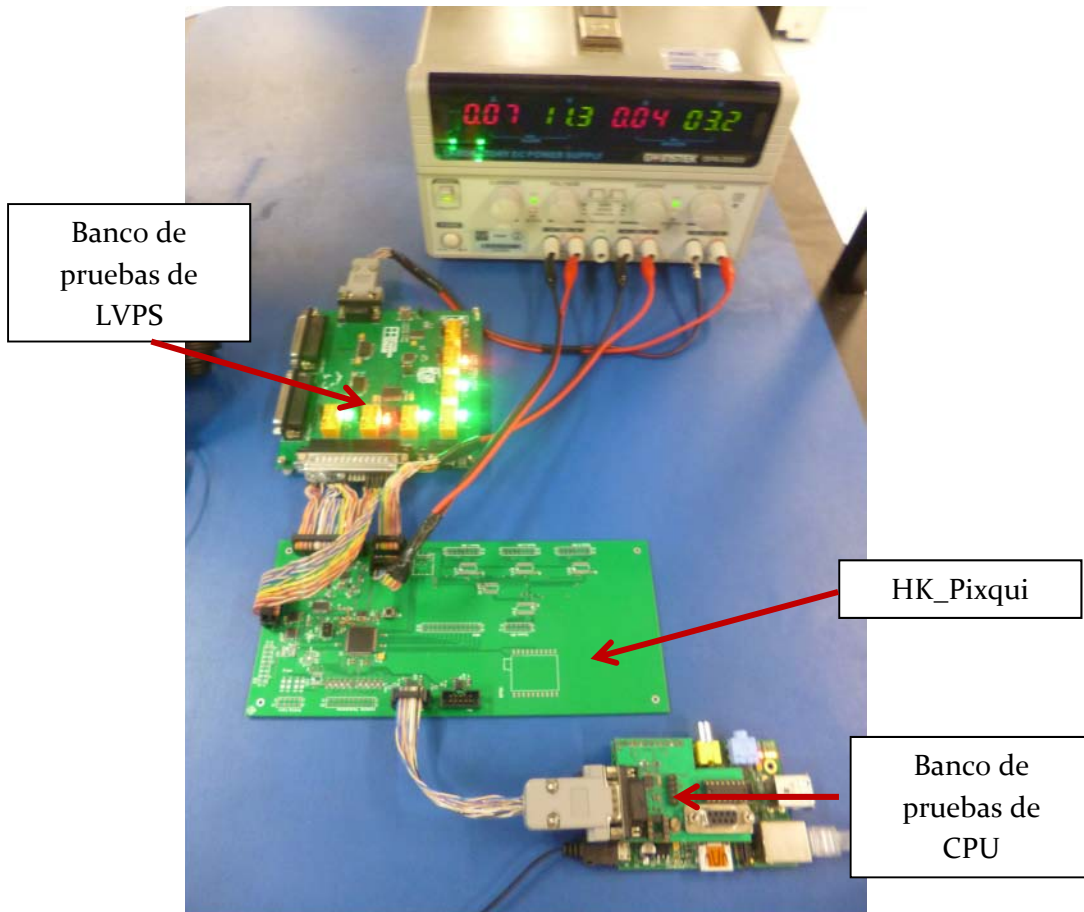


Fig. 5.15. Circuito de prueba para la validación de interfaces con CPU y HLC.

Los resultados obtenidos de esta prueba fueron:

- Se realizó la petición mediante la interfaz de usuario de CPU para encender y apagar 3 simuladores de LVPS, obteniendo el resultado esperado ya que la activación y desactivación de los relevadores se efectuó de manera adecuada comprobándose por el *Contact Closure* del HK_Pixqui y por los leds con los que cuenta el banco de pruebas de LVPS.
- Se validó la comunicación bajo el estándar RS-422.
- Se validó la lógica de comunicación y funcionamiento entre CPU y HK_Pixqui.
- Se validó la comunicación I2C, ya que el circuito de *High Level Command* es accionado por un expansor de puertos que maneja dicho protocolo.
- Se midió el consumo de corriente para la activación de los relevadores de las LVPS, el cual fue de 70mA a 12V. Este consumo es solamente durante 10 milisegundos, ya que el relevador cuentan con *latch*, es decir, mantiene el estado aún sin una tensión en la bobina.

- Se efectuó el monitoreo de los voltajes y corrientes del banco de pruebas de LVPS. Sin embargo, este banco en su diseño solo genera valores fijos para estas variables, por lo que se validó la correcta adquisición de señales analógicas por medio del HK_Pixqui.
- Se midió el consumo del HK_Pixqui, obteniendo un consumo de 40mA a 3.3V con el sistema de encendido/apagado operando, así como la rutina de adquisición de datos y la comunicación serie RS422.

5.3.2. Pruebas de vacío y ciclado térmico

Una vez finalizada la integración de los elementos del HK_Pixqui, se procedió a realizar las pruebas de vacío y ciclado térmico al prototipo armado. En la figura 5.16 se muestra el sistema finalmente armado, dicha tarjeta es la que se evaluó en la cámara de vacío.

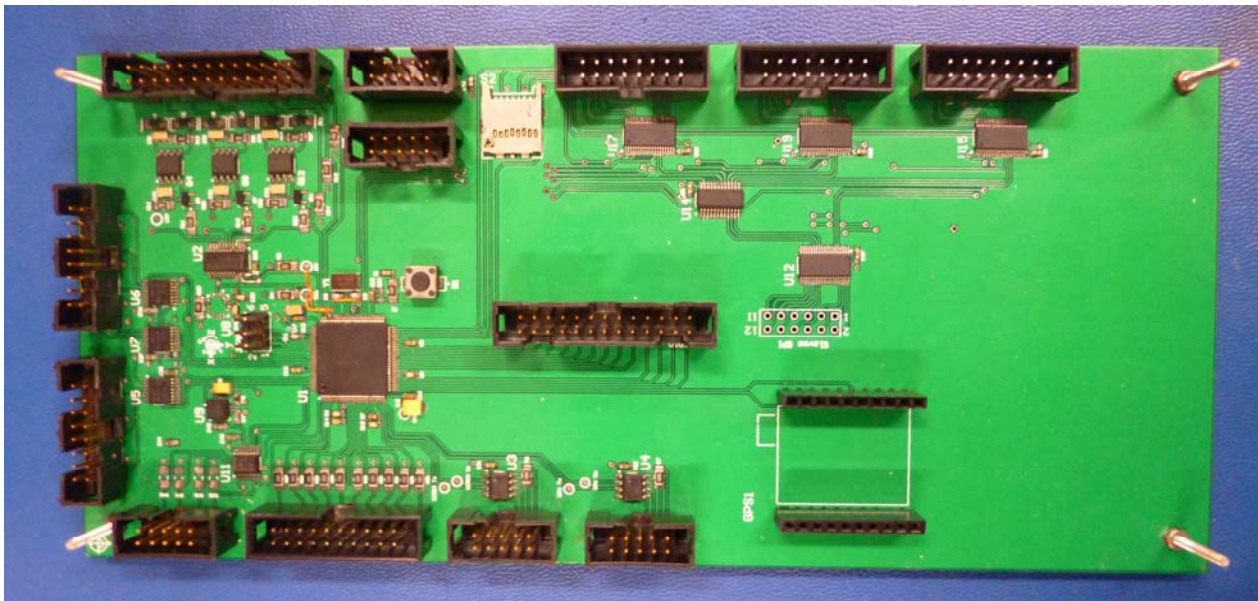


Fig. 5.16. Sistema HK_Pixqui.

Las condiciones a las cuales se realizaría la prueba dentro de la cámara de vacío fueron:

- Presión: 3 mbar
- Temperatura máxima: 50°C
- Temperatura mínima -30°C

En la figura 5.17 se muestran el sistema empleado, el cual consiste en la cámara de vacío, la computadora de adquisición de datos enviados por el HK_Pixqui, así como la infraestructura con la que se efectuó la alimentación de los dispositivos y el monitoreo de las variables de la cámara para el ciclado térmico.



Fig. 5.17. Cámara de vacío y sistema de adquisición de datos del ICN.

Los puntos de interés realizados en esta prueba fueron:

- Comprobar la correcta comunicación entre el banco de pruebas de CPU y el HK_Pixqui en condiciones de vacío.
- Comprobar la correcta adquisición de variables analógicas del HK_Pixqui.
- Comprobar la correcta comunicación entre el banco de pruebas de TS y el HK_Pixqui.
- Comprobar la generación y escritura de información en la memoria SD

Comunicación entre CPU y HK_Pixqui

En esta prueba se manejó el mismo protocolo y lógica implementada anteriormente para la comunicación entre estos dispositivos, con lo cual se lograron obtener los siguientes resultados:

- Se logró realizar el envío de tramas de encendido/apagado de relevadores y a su vez se verificó el correcto procesamiento de dichos datos, ya que se estableció control sobre el banco de pruebas de LVPS.
- Se realizó el envío de tramas de lectura de parámetros, a las cuales el HK_Pixqui respondió adecuadamente, como lo fue haciendo en las pruebas a condiciones de temperatura y presión ambiente.

- **Adquisición analógica**

Durante la prueba se realizó el establecimiento de la condición de vacío dentro de la cámara y se procedió a realizar la validación del sistema a dos temperaturas: 50°C y -20°C. Es así que durante las variaciones de temperatura el HK_Pixqui realizó la adquisición de datos de diversos termistores con los que cuenta, obteniendo los perfiles de temperatura que se experimentaron dentro del instrumento.

La prueba estuvo compuesta de las siguientes etapas:

- En el inicio de la prueba la cámara de vacío, el sensor de temperatura de ésta presentaba una temperatura de 25°C, condición que se dejó por cerca de 45 minutos para que se estabilizaran las variaciones térmicas en los componentes.
- Posteriormente mediante el control de temperatura de la cámara se procedió a bajar la temperatura hasta que el indicador marcara -30°C, manteniendo esta condición por cerca de 6 horas.
- Una vez transcurrido el tiempo de 6 horas, se elevó la temperatura hasta que el indicador mostrara 50°C, manteniendo esta condición en un periodo de 5 a 6 horas, para posteriormente descender nuevamente la temperatura a -20°C.

Los termistores empleados fueron colocados en los componentes más críticos de los sistemas que se introdujeron dentro de la cámara, por lo que al contar con termistores de sobra, se decidió tener dos termistores por componente, esto con el fin de tener redundancia en las adquisiciones de temperaturas. Es así que durante la prueba se obtuvieron las temperaturas de:

- Microcontrolador del HK_Pixqui
- Superficie de la tarjeta electrónica
- CPU
- Platina de la cámara de vacío

Para la adquisición de los datos que se generaba del monitoreo del HK_Pixqui, se empleó la interfaz diseñada en LabView como banco de prueba del sistema de telemetría TS, por lo que se ha empleado una computadora de escritorio para el almacenamiento de la información para su posterior análisis. Además de esto, se configuró el HK_Pixqui para que realizará el almacenamiento de datos dentro de una memoria SD de 2GB de memoria clase 4, esto con el fin de validar dicha función del sistema, además de contar con un sistema de redundancia.

En la figura 5.18 se muestra el perfil de temperaturas de los componentes críticos que fueron monitoreados durante la prueba, los cuales fueron generados mediante los datos almacenados en la memoria SD y procesador mediante MATLAB.

Cabe señalar que las temperaturas mostradas se obtuvieron con los termistores colocados sobre los componentes y una capa de pasta térmica, esto con el fin de incrementar la conducción de calor, además de ser sujetados mediante cinta kapton para evitar su movimiento.

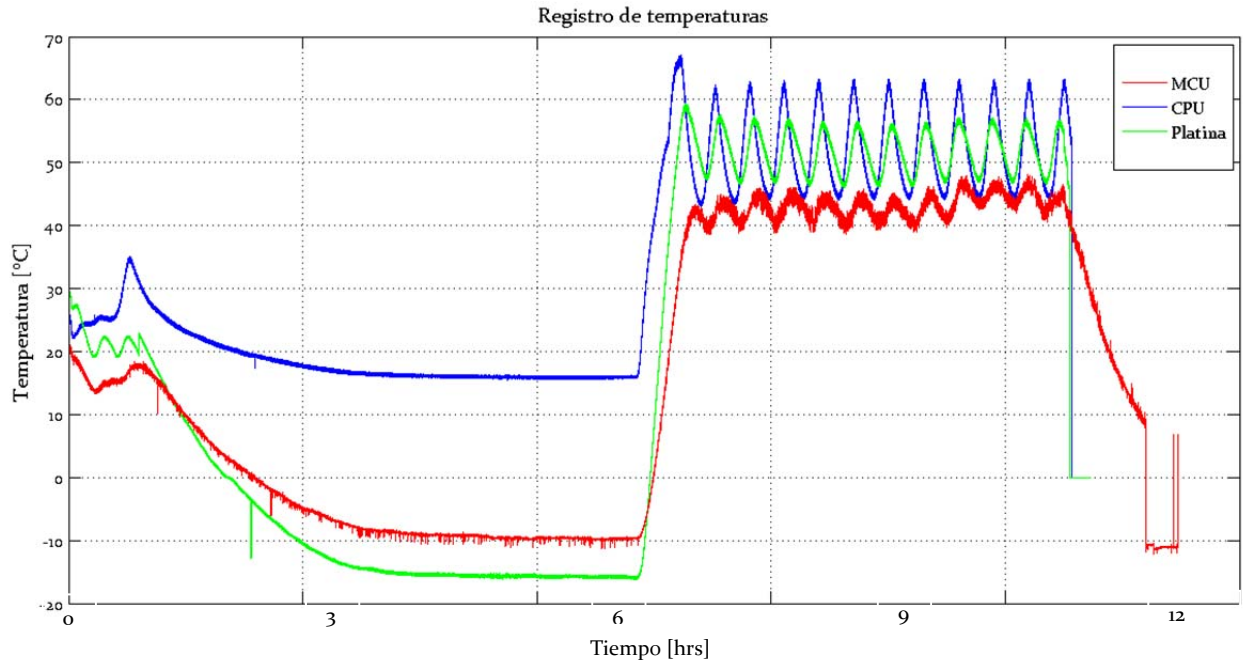


Fig. 5.18. Perfil de temperaturas durante la prueba dentro de la cámara de vacío.

Se puede observar que la prueba tuvo una duración máxima de 12hrs, mientras que las temperatura máxima alcanzada dentro de la cámara fue de 59°C y la mínima de -15°C.

En la figura 5.19 se observa el perfil de temperatura de la platina de la cámara de vacío.

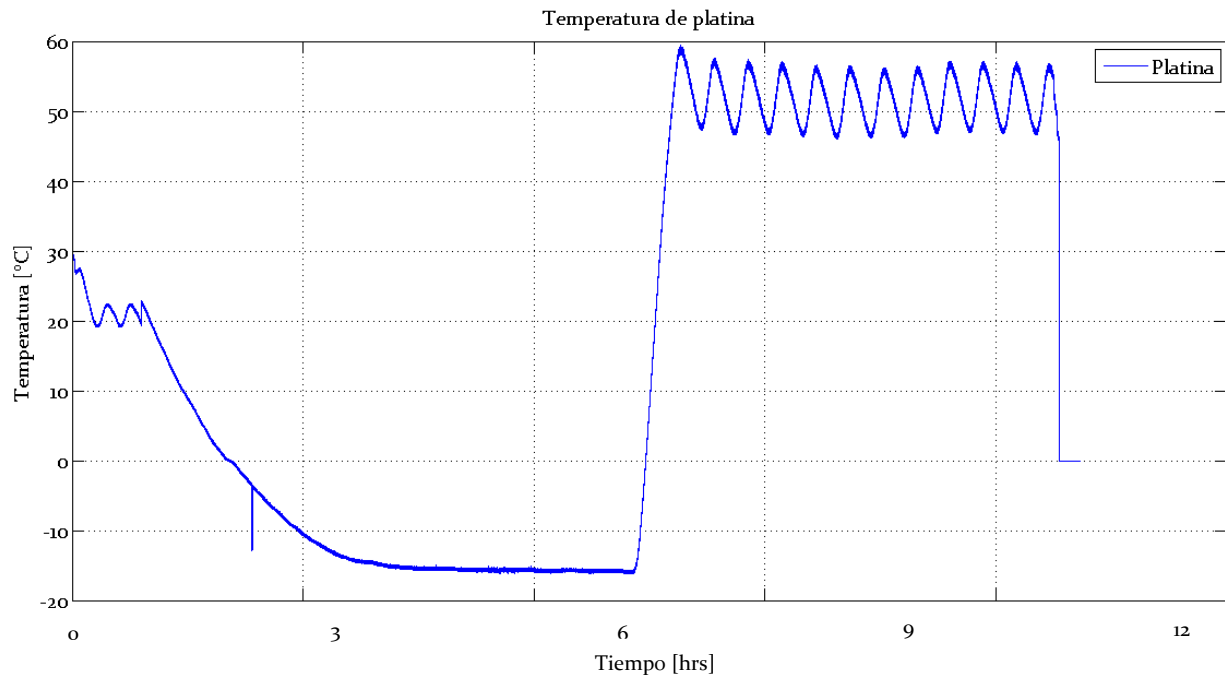


Fig. 5.19. Perfil de temperatura de la platina.

Cabe señalar que el perfil de temperatura de la superficie de la tarjeta es similar al de la platina, ya que estuvo en contacto directo la platina con la PCB.

La temperatura máxima alcanzada fue del orden de 60°, esto se debe a que aunque se configuró el sistema a 50°C, el control de temperatura con el que cuenta la cámara de vacío es de ON/OFF, es por ello que se observan oscilaciones en el rango de los 46 y 60 °C.

La temperatura mínima que presentó la platina fue de -15°C, la cual fue alcanzada en el primer ciclo. No se logró alcanzar la temperatura deseada de -20°C debido a problemas que presenta la cámara de vacío en relación al sistema de enfriamiento.

Es de particular interés saber sobre el comportamiento del microcontrolador, en la figura 5.20 se tiene el perfil de temperatura del microcontrolador del HK_Pixqui.

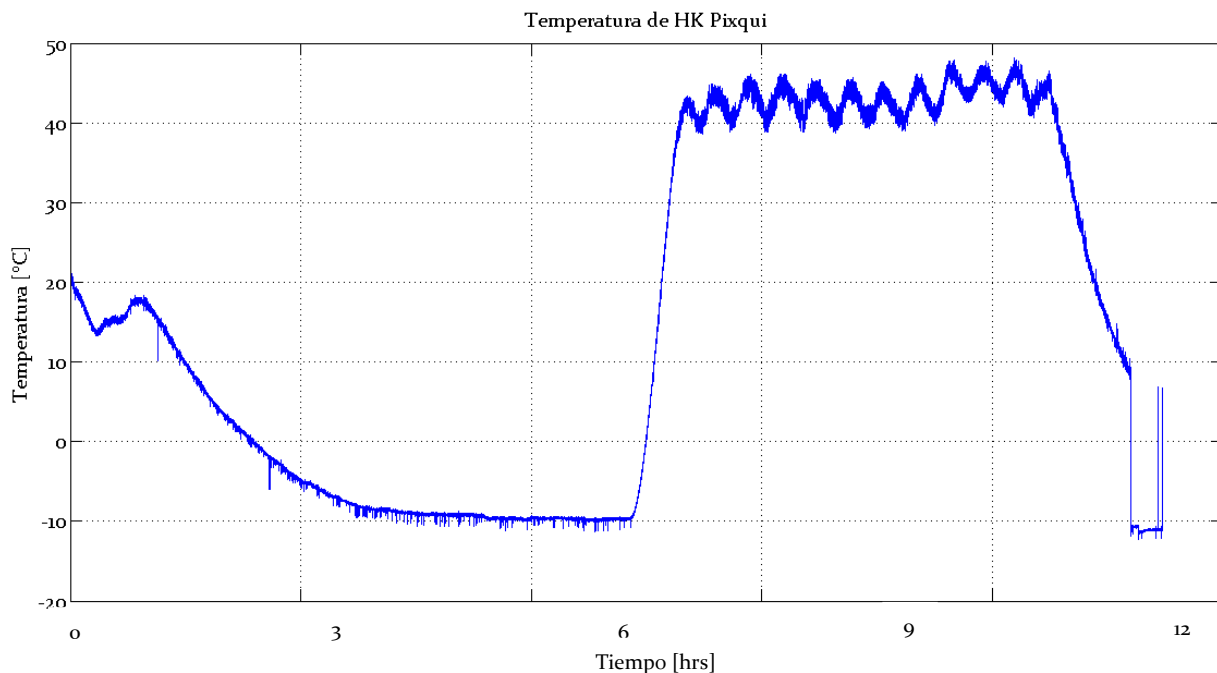


Fig. 5.20. Perfil de temperatura del microcontrolador del HK_Pixqui.

- Durante la prueba el microcontrolador registró como máxima temperatura 58°C, esto debido a las variaciones que presentó la cámara de vacío en relación al control de temperatura, sin embargo esto no dañó al dispositivo ya que su rango de operación se encuentra entre -40°C y 85°C.
- La temperatura mínima que registró el microcontrolador fue de -12°C.

Durante la realización de la prueba, cerca de las 12hrs de operación se perdió la comunicación entre el HK_Pixqui y el banco de pruebas de TS. Ante este evento no se pudo tomar una acción inmediata ya que dicho suceso se presentó en la madrugada y no se tenía acceso al instituto.

Al poder actuar sobre el sistema, se procedió primero a subir la temperatura a 25°C para poder resetear el HK_Pixqui de manera remota, sin embargo, no se pudo reestablecer el funcionamiento de éste, por lo que se procedió a terminar la prueba para el análisis físico de la tarjeta.

Del análisis realizado una vez que se contó con la tarjeta electrónica fuera de la cámara, se observó que había fallas debido a los capacitores de bypass, ya que varios se encontraron en corto circuito, es así que se decidió cambiar la totalidad de capacitores con el fin de verificar que esto haya sido la causa de falla.

Es así que del estudio de las condiciones de operación tanto del HK_Pixqui como de la cámara de vacío es que se detectaron descargas eléctricas en los conectores que cuenta la cámara para la alimentación de dispositivos, esos provocados por un mal aislamiento que se tenía entre el PXI de National Instruments y la cámara de vacío. Lo cual eventualmente pudo haber sucedido a los largo de la prueba y finalmente dañar la tarjeta.

Actualmente la tarjeta opera de manera adecuada concluyendo con ello que los capacitores presentaron una falla durante la prueba.

Otro punto importante de observar fue el perfil de temperatura del procesador con el que cuenta el sistema de CPU, figura 5.21.

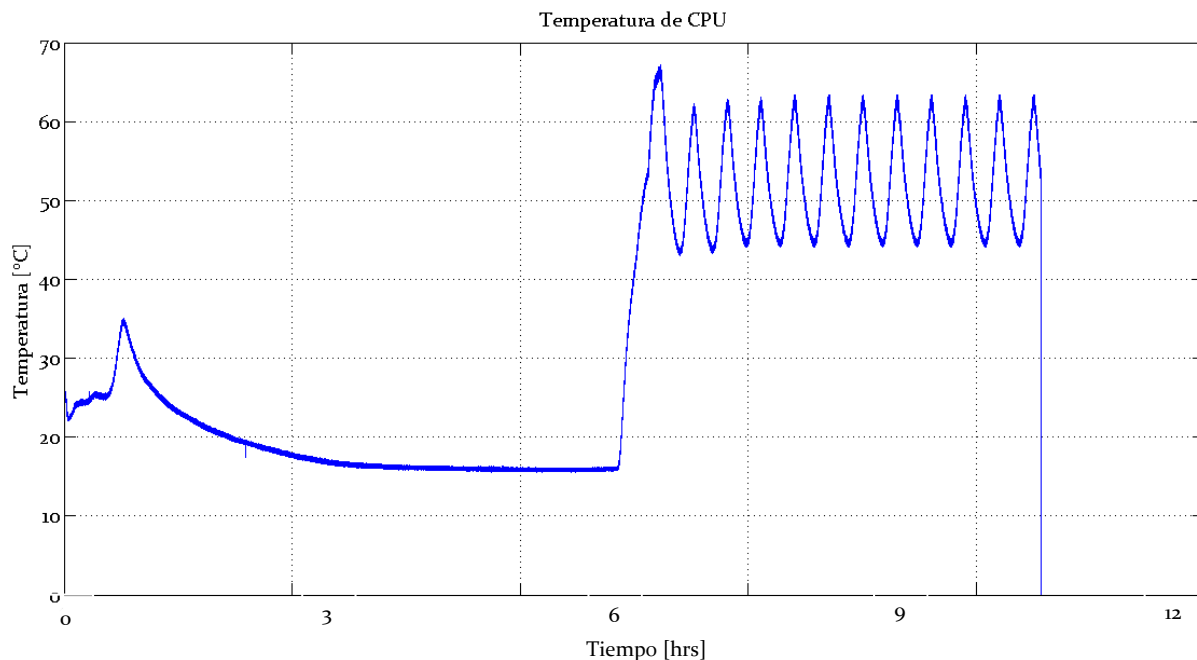


Fig. 5.21. Perfil de temperatura de la CPU.

- La temperatura máxima que registró el dispositivo fue de 68°C y al igual que el HK_Pixqui y la platina se presentan oscilaciones mientras la temperatura se encontraba establecida a 50°C dentro de la cámara de vacío.

- La temperatura mínima fue de 16°C. Este dispositivo no alcanzó una temperatura por debajo de 0°C debido al procesamiento que realiza, lo cual se traduce en calor disipado por su dispositivo.

Al finalizar la prueba, se obtuvieron los resultados esperados ya que se logró validar el HK_Pixqui en dos temperaturas extremas, además de la lógica de operación del mismo. Asimismo se tiene la validación de las comunicaciones serie con el sistema de telemetría y CPU.

Capítulo VI

Conclusiones

En este capítulo se abordará un resumen general de los resultados que se obtuvieron durante el desarrollo del HK_Pixqui, además de presentar las conclusiones que se generaron y sugerencias para el mejoramiento del sistema.

6.1. Resultados obtenidos

Dentro de los objetivos planteados al inicio del desarrollo del HK_Pixqui y los resultados logrados se tienen:

- Diseño y fabricación de las tarjetas electrónicas para el desarrollo del prototipo, así como el diseño e implementación de bancos de pruebas para su validación.
- Implementación de las interfaces de comunicación planteadas como necesarias para la interacción con los sistemas de la plataforma suborbital Pixqui.
- Diseño de la tarjeta electrónica del prototipo final del HK_Pixqui cumpliendo los requerimientos establecidos.
- Selección de los componentes para el desarrollo del sistema de tal manera que la relación costo-prestaciones sea la mejor.
- Desarrollo e implementación del software para el funcionamiento del HK_Pixqui.
- Entrega de prototipo a las instituciones dentro de la colaboración.

6.2. Conclusiones

Se dio continuidad al desarrollo de tecnología aeroespacial mediante el desarrollo del sistema HK_Pixqui, pues ahora se cuenta con un sistema electrónico que sirve de base para el monitoreo de variables en condiciones de vacío, así como el de supervisión de potencia de sistema de alimentación.

Se adquirió la capacidad para la generación de recursos humanos e infraestructura para la producción de tecnología especializada, debido a la necesidad de gestionar tanto material y equipo de alto nivel para el desarrollo del proyecto, así como la necesidad de obtener el conocimiento para su uso.

Los resultados obtenidos en las pruebas del prototipo diseñado, son satisfactorios ya que al finalizar este trabajo permite tener un sistema funcional que cumple con los requerimientos establecidos, sin embargo, el uso del microcontrolador propuesto no ha sido aprovechado en su totalidad, ya que ciertos periféricos como el NVIC(*Nested Vectored Interrupt Controller*) o el DMA (*Direct Memory Access*) no fueron empleados, pero permitirían una administración de interrupciones de manera óptima y el manejo de datos de manera eficiente por el procesador respectivamente. Por lo que es importante definir una lógica de funcionamiento de la plataforma como un sistema integral y abordar el uso de dichos periféricos.

Es necesario un rediseño de la tarjeta electrónica ya que se encontraron errores en el ruteo de señales, lo que provocó que se realizarán modificaciones superficiales mediante cables, lo cual no es viable su uso en un instrumento que estará en condiciones extremas como las descritas en el trabajo.

Otro punto en este rediseño, es la consideración del uso de la memoria SD, ya que en caso de seguir empleándose este método de almacenamiento de datos, es conveniente el dedicar un módulo de comunicación SPI con el propósito de manejar únicamente dicho dispositivo, ya que esto permitirá configurarlo para velocidades de transmisión en las que operan las memorias de reciente generación y poder mantener otra velocidad en los módulos SPI-Diferencial diseñados.

El trabajo desarrollado forma parte de una primera versión del sistema de monitoreo, por lo que como tal presenta se considera que presenta limitantes en la lógica, esto debido a que no se cuenta con una definición concreta de los sistemas con los que interactuará. En esencia el sistema desarrollado funciona como un sistema de monitoreo de variables básicas. Es por esto que es necesario un planteamiento claro de la arquitectura que contará la plataforma suborbital, pues esto podrá definir tareas específicas que por el momento no son visibles en este primer modelo.

De manera personal, el proyecto me permitió desarrollar habilidades para la formación profesional dentro de la ingeniería, tales como la gestión y planeación de proyectos, la autogestión de tareas, autoaprendizaje para el diseño e implementación de circuito de sistemas analógicos y digitales, manejo de equipo y software especializado e investigación para la solución de problemas de programación.

6.3. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos se realizan las siguientes recomendaciones:

- Es necesario la evaluación del prototipo en una cámara de vacío que permita el ciclado térmico dentro de los rangos que se esperan que experimente el sistema durante el vuelo, ya que actualmente no sé logra alcanzar estos parámetros en el equipo con el que se cuenta.

- Así mismo, es necesario actualizar el control de la cámara de vacío, de tal forma que sea modificado el control de temperatura *on/off* con el que cuenta la cámara, ya que se presentan oscilaciones indeseadas al efectuar el ciclado térmico como se vio en las gráficas presentadas durante el desarrollo de las pruebas.
- De manera general, se recomienda la revisión de la cámara de vacío ya que se detectaron fugas en la compresora, éstas posiblemente ocasionadas en el traslado de esta a las nuevas instalaciones con las que cuenta el laboratorio de detectores del ICN; además de que se presentaron descargas eléctricas en algunos de los conectores internos con lo que cuenta. Esto con el fin de garantizar que los sistemas a evaluar sean bajo condiciones controladas como los establecen los protocolos de prueba.
- En torno al sistema diseñado, se recomienda emplear un regulador de voltaje para la alimentación de la electrónica, ya que esto permitirá disminuir el ruido proveniente de fuentes conmutadas tales como las que se emplean en el sistema de LVPS.
- Es necesario, el estudio detallado de los capacitores a emplear en futuras misiones, ya que estos fueron una fuente de fallas durante las pruebas.
- En torno a la lógica de funcionamiento, se recomienda el implementar algoritmos de detección de errores tanto para las comunicaciones seriales, así como en el propio funcionamiento del dispositivo, esto con el fin de garantizar un mayor grado de confiabilidad del sistema.
- Uno de los puntos que se recomienda analizar de manera mecánica, es el dispositivo de almacenamiento de datos, ya que aunque presento resultados positivos durante las pruebas, durante un vuelo se desconoce cómo actuará el dispositivo debido a la estructura mecánica del conector de la tarjeta SD.
- Uno de los problemas que alargaron el tiempo de desarrollo del sistema fue debido a factores externos relacionados a proveedores de componentes, por lo que resultaría importante analizar las ventajas y desventajas que se tienen al adquirir componentes con proveedores nacionales a proveedores internacionales.

Bibliografía

Libros

- Bertoa Manuel F., Troya José M., Vallecillo Antonio, “Atributos de Calidad para Componentes
- COTS: Una valoración de la información ofrecida por los vendedores”, Dpto. Lenguajes y Ciencias de la Computación. Universidad de Málaga.
- Coral Calero Muñoz, Moraga de la Rubia María Ángeles, Piattini Velthuis Mario G., “Calidad de producto y proceso software”, Editorial Ra-Ma, España, 2010.
- Pallas Areny Ramón, “Sensores y acondicionadores de señales”, cuarta edición, MARCOMBO S.A., España, 2003.
- Robert F. Coughlin, Frederick F. Driscoll, “Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales”, Quinta edición, Prentice Hall, México, 1999.
- Tocci, Ronal J. y Widmer, Neal S., “Sistemas digitales”, Octava edición, Pearson Education, México, 2003.
- Corona Ramírez Leonel Germán, Abarca Jiménez Griselda Stephany, Mares Carreño Jesús, “Sensores y Actuadores. Aplicaciones con Arduino”, Primera Edición ebook: 2014 Grupo editorial Patria S.A. de C.V.
- Universidad de las Américas, Puebla, Apéndice B: Estándar RS-232.
- Wakerly John F., “Diseño digital”, Tercera edición, Pearson Education, México, 2011.

Referencias

[1] SANTIAGO CRUZ Lauro, MEDINA TANCO Gustavo Adolfo, DE LA CRUZ MARTÍNEZ Adrián, LÓPEZ LÓPEZ César Alán, ROJAS GARCÉS Javier, SILVARÁN GUERRERO Sócrates Alberto. “Sistema de monitoreo y adquisición de datos, Housekeeping, para el fotodetector a bordo de la misión EUSO-BALLOON”. En: 1er. Congreso iberoamericano de instrumentación y ciencias aplicadas. San Francisco de Campeche, Campeche, México 31 de octubre de 2013. SOMI XXVIII Congreso de instrumentación.

[2] Y. Takahashi, “The JEM-EUSO Mission”, [en línea], <<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0910/0910.4187.pdf>>

[3] IEEE Standard 1452.1
<<http://www.ieee.org>>

[4] Corona Ramírez Leonel Germán, Abarca Jiménez Griselda Stephany, Mares Carreño Jesús, “Sensores y Actuadores. Aplicaciones con Arduino”, Primera Edición ebook: 2014 Grupo editorial Patria S.A. de C.V.

- [5] Phillips Semiconductor, “*The I2C-Bus Specification*”, [en línea],
<<http://www.cs.unc.edu/Research/stc/FAQs/Interfaces/I2C-BusSpec-V2.1.pdf>>
- [6] Standardized Temperature Profile. [en línea]
<<http://www.srh.noaa.gov/jetstream/atmos/atmprofile.htm>>
- [7] Texas Instruments, “*Tiva TM4C123GH6PZ Microcontroller*”, [en línea],
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tm4c123gh6pz.pdf>>
- [8] Freescale, “*±1.5g, ±6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer*”, [en línea],
<http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA7361L.pdf>
- [9] Sensirion, “*Datasheet SHT21 Humidity and Temperature Sensor IC*”, [en línea],
<http://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Humidity/Sensirion_Humidity_SHT21_Datasheet_V4.pdf>
- [10] Texas Instruments, “*System Design Guidelines for the TM4C123x Family of Tiva™ C Series Microcontrollers*”, [en línea],
<<http://www.ti.com/lit/an/spmao59/spmao59.pdf>>
- [11] Texas instruments, “*AN-1031 TIA/EIA-422-B Overview*” [en línea],
<<http://www.ti.com/lit/an/snla044b/snla044b.pdf>>