



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE
MONITOREO DE PARÁMETROS FÍSICOS PARA UN
MICRO SATÉLITE**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO Y
ELECTRÓNICO**

P R E S E N T A:

JESÚS ANTONIO ESTEBAN SERNA CUÉLLAR



DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ ALBERTO RAMÍREZ AGUILAR

MÉXICO D.F.

2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Resumen

México se encuentra en un momento de condiciones peculiares para lanzarse a la carrera espacial. Considerando la transición global del desarrollo de satélites grandes y medianos hacia los micro-satélites, se está a tiempo para crear un impacto del desarrollo e implementación de este tipo de tecnología en el territorio nacional, así como en otros países. Dado a que aún se está experimentando con tal tecnología, es buen momento para aprender y generar bases sólidas.

El satélite *Quetzal*, un proyecto de colaboración entre la UNAM y MIT, está abriendo las puertas para el desarrollo de tecnología aeroespacial en el país. Los estudiantes están metiendo manos al proyecto y están obteniendo experiencia invaluable en el campo de tecnología satelital. El desarrollo de tal satélite se necesita llevar a cabo por partes, un satélite se compone de diversos subsistemas y cada subsistema tiene su especialidad.

Un subsistema es el de telemetría, tal sistema recolecta información de todo el satélite (estado operativo y carga útil) y envía esa información a la estación Terrestre. Inclusive el sistema de telemetría se compone de diversas partes, una de esas partes es el sistema de monitoreo de parámetros físicos. Es sobre tal sistema que se basa el desarrollo de ésta tesis.

En Mayo de 2013 se presentó la oportunidad de probar algunos sistemas en condiciones casi espaciales abordo de un globo aeroestático de la NASA , se determinó que uno de los sistemas que debería ser probado era el sistema de monitoreo de parámetros físicos.

Tal sistema se diseño y construyó en un lapso poco mayor a dos meses y estuvo listo y a tiempo para el vuelo que se llevó a cabo en Agosto de 2013. En éste trabajo se desarrolla todas las etapas de diseño y construcción del sistema así como los resultados que generó.

*“Por tanto, al Rey de los siglos, incorruptible, invisible, al único
Dios, sea honor y la gloria por los siglos. Amén”
- 1 Timoteo 1:17*

Índice general

Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	XII
Agradecimientos	XIII
Acrónimos	XV
1. Introducción	1
1.1. Caso de estudio: Quetzal	2
1.1.1. Misión	2
1.1.2. Necesidades de monitoreo	2
1.1.3. Limitantes	3
1.2. Caso de estudio: AEMB-F1	3
1.2.1. Misión	3
1.2.2. Necesidades de monitoreo	3
1.2.3. Limitantes	4
1.3. Objetivos	4
1.4. Tipos de Misiones Satelitales	4
1.4.1. Comunicaciones	5
1.4.2. Percepción Remota	5
1.4.3. Navegación	6
1.4.4. Militar	6
1.4.5. Ciencia en sitio	6
1.5. Tipos de órbitas	6
1.5.1. Misiones espaciales en órbita LEO	7
1.5.2. Misiones espaciales en órbita MEO	7
1.5.3. Misiones espaciales en órbita GEO	7
1.5.4. Misiones espaciales no orbitales	8
1.6. Plataformas Satelitales	8
1.7. Subsistemas de un satélite	8
1.7.1. Determinación de posición y control	8
1.7.2. Telemetría, Rastreo y Comando	9
1.7.3. Comando y Manejo de Información	9
1.7.4. Potencia	9

1.7.5.	Control Térmico	9
1.7.6.	Estructura y Mecanismos	9
1.7.7.	Guía y Navegación	10
1.7.8.	Propulsión	10
1.7.9.	Carga Útil	10
1.8.	Ambiente espacial	10
1.8.1.	Radiación Solar	10
1.8.2.	Ambiente de la órbita terrestre	11
1.8.3.	Radiaciones Ionizantes	11
1.8.4.	Meteoros y Escombros	12
1.8.5.	Efectos del ambiente espacial sobre el diseño	12
1.8.5.1.	Gasificación o sublimación	12
1.8.5.2.	Erosión por oxígeno atómico	12
1.8.5.3.	Efectos de radiación a largo plazo	12
1.8.5.4.	Efectos de radiación transitorios	13
1.9.	Telemetría	13
1.9.1.	Importancia de la telemetría en una misión satelital	13
1.9.2.	Partes que conforman un sistema de telemetría	14
1.9.2.1.	Sistema de Adquisición de datos	15
2.	Metodología de diseño del sistema de monitoreo	16
2.1.	Sistema de Adquisición de Datos	16
2.2.	Definición de los parámetros de medición	19
2.3.	Sensores	20
2.3.1.	Clasificación de Sensores	21
2.3.2.	Voltaje	22
2.3.2.1.	Bits de estado	22
2.3.3.	Corriente	23
2.3.3.1.	Shunts (derivaciones)	23
2.3.3.2.	Al medir la fuerza de Lorentz en el conductor	23
2.3.3.3.	Elementos de efecto Hall	23
2.3.3.4.	Bobinas simples	24
2.3.3.5.	Por medio de detectar la energía del campo magnético (Lazo Abierto)	24
2.3.3.6.	Bobinas con núcleos magnéticos (Lazo Cerrado)	24
2.3.3.7.	Bobinas Rogowski	25
2.3.4.	Temperatura	26
2.3.4.1.	Resistencias Detectoras de Temperatura (RTD)	26
2.3.4.2.	Resistivos de Silicio	27
2.3.4.3.	Termistores	27
2.3.4.4.	Termopar	27
2.3.4.5.	Semiconductores de unión P-N	27
2.3.5.	Presión	28
2.3.5.1.	A base de Mercurio	29
2.3.5.2.	Piezo-resistivos	30

2.3.5.3.	Capacitivos	30
2.3.5.4.	Tubos de Bourdón	31
2.3.5.5.	Manómetro	31
2.3.5.6.	Dispositivos de alambre resonante	31
2.3.6.	Posición y desplazamiento	31
2.3.6.1.	Potenciómetro	32
2.3.6.2.	De gravitación	32
2.3.6.3.	Capacitivo	33
2.3.6.4.	Magnéticos e Inductivos	33
2.3.6.5.	LVDT y RVDT	33
2.3.6.6.	Transverso Inductivo	34
2.3.7.	Aceleración	34
2.3.7.1.	Capacitivo	35
2.3.7.2.	Piezo-resistivo	35
2.3.7.3.	Piezoeléctrico	36
2.3.7.4.	Efecto Hall	36
2.3.8.	Humedad	36
2.3.8.1.	Sensores Capacitivos	37
2.3.8.2.	Sensores de conductividad eléctrica	37
2.3.8.3.	Sensor de conductividad térmica	38
2.3.8.4.	Higrómetro óptico	38
2.3.9.	Flujo	38
2.3.9.1.	Técnica de gradiente de presión	39
2.3.9.2.	Sensores ultrasónicos	40
2.3.9.3.	Fuerza de arrastre	40
2.3.9.4.	Rotores de Efecto Hall	40
2.3.10.	Sensores Ópticos	41
2.3.10.1.	Puente óptico	41
2.3.10.2.	Sensor de fibra óptica	42
2.3.10.3.	Sensores de rejilla	42
2.3.11.	Sensores Ultrasónicos	43
2.4.	Acondicionamiento de señales adquiridas	43
2.4.1.	Amplificación	44
2.4.1.1.	Amplificador Diferencial	46
2.4.1.2.	Amplificador de Instrumentación	47
2.4.1.3.	Eliminación de voltaje de polarización	47
2.4.1.4.	Seguidor de voltaje	48
2.4.2.	Filtrado	48
2.4.2.1.	Filtro paso bajas	49
2.4.2.2.	Filtro paso altas	49
2.4.2.3.	Filtro paso banda	50
2.4.2.4.	Filtro rechaza banda	50
2.4.3.	Aislamiento y Aterrizaje	50
2.4.4.	Cables y Escudos	51
2.4.5.	Linealización	53

2.5.	Procesamiento de la información	53
2.5.1.	Microprocesadores y Microcontroladores	54
2.5.2.	Modulación por Pulsos Codificados	55
2.5.3.	Cuantificación	55
2.5.4.	Conmutación	56
2.5.5.	Hardware de muestreo	56
2.5.6.	Muestreo y Retención	57
2.5.7.	Convertidor Analógico-Digital	57
2.5.8.	ADC de Aproximaciones Sucesivas	57
2.5.9.	Algoritmos de procesamiento	58
2.5.9.1.	Formato de la Información	58
2.5.9.2.	Marco Menor	59
2.5.9.3.	Marco Mayor	60
2.5.9.4.	Cantidad total de información transmitida	60
2.5.10.	Protocolos de transmisión de información	61
2.5.10.1.	Paquetes Fuente	61
2.5.10.2.	Marco de Transferencia	62
2.6.	Almacenamiento de la información	63
3.	Diseño del Sistema de Monitoreo	65
3.1.	Determinación de parámetros a monitorear	65
3.2.	Selección de sensores	67
3.2.1.	Temperatura	68
3.2.2.	Corriente	71
3.2.3.	Presión	73
3.2.4.	Humedad	74
3.2.5.	Aceleración	77
3.3.	Desarrollo de circuitos para acondicionamiento de señales	78
3.3.1.	Diseño de Filtro	78
3.3.2.	Acondicionamiento para el sensor de temperatura	81
3.3.3.	Acondicionamiento para el sensor de corriente	82
3.3.4.	Acondicionamiento para el sensor de presión	84
3.3.5.	Acondicionamiento para el sensor de humedad	87
3.3.6.	Acondicionamiento para el sensor de aceleración	87
3.4.	Procesamiento de la información	88
3.4.1.	Procesamiento de la señal de temperatura	88
3.4.2.	Procesamiento de la señal de corriente	90
3.4.3.	Procesamiento de la señal de presión	91
3.4.4.	Procesamiento de la señal de humedad	93
3.4.5.	Procesamiento de la señal de aceleración	93
3.4.6.	Selección del micro-controlador	94
3.4.7.	Desarrollo de algoritmos de procesamiento de datos	99
3.4.8.	Selección e implementación del protocolo de transmisión	102
3.5.	Selección e implementación de método de almacenamiento	104
3.6.	Selección del puerto de programación y diagnóstico	108

3.7.	Descripción del software del sistema	109
3.8.	Balance energético	109
3.9.	Diseño del prototipo funcional	112
3.9.1.	Primer nivel	115
3.9.2.	Segundo nivel	121
3.9.3.	Tercer nivel	124
3.9.4.	Cuarto nivel	124
3.9.5.	Componentes EAGLE diseñados	128
3.10.	Integración e implementación del prototipo funcional	130
3.10.1.	Fabricación de PCBs	130
3.10.1.1.	CAT - Juriquilla, Querétaro	130
3.10.1.2.	Instituto de Ingeniería	132
3.10.2.	Integración de los componentes a las PCBs	132
3.10.3.	Conectores para el bus de datos	134
3.10.4.	Conectores para los sensores	135
3.10.5.	Sistema acabado	136
3.10.5.1.	Estructura de la trama de datos	136
3.10.5.2.	Sistema físico	136
4.	Pruebas de rendimiento y operación	139
4.1.	Pruebas en tierra	139
4.2.	Pruebas en cámara al vacío regulada	140
4.3.	Prueba a bordo del globo aerostático de la NASA-AEMB-F1	140
5.	Resultados y Conclusiones	149
6.	Trabajo a Futuro	160
	Apéndices	162
A.	Programas utilizados	163
A.1.	Programa final para SMPF	163
A.2.	Programa utilizado en SMPF	167
A.3.	Programa utilizado en SMPF-E	170
B.	Tablas de cálculos	172
B.1.	Tablas de cálculos del rendimiento de los algoritmos	172
C.	Diseño del filtro	174
	Bibliografía	176

Índice de figuras

1.1. Tipos de satélites	5
1.2. Tipos de Órbitas	7
1.3. Algunos factores del ambiente espacial	11
1.4. Esquema de Telemetría	14
2.1. Diagrama de un sistema de adquisición de datos	18
2.2. Sensores de corriente	25
2.3. Sensores de temperatura	28
2.4. Sensores de presión	32
2.5. Sensores de posición y desplazamiento	34
2.6. Acelerómetro Capacitivo	35
2.7. Acelerómetros	36
2.8. Sensores de humedad	39
2.9. Sensores de flujo	41
2.10. Sensores ópticos	42
2.11. Sensores ultrasónicos	43
2.12. Amplificador inversor	45
2.13. Amplificador DC no-inversor	46
2.14. Amplificador diferencial	46
2.15. Amplificador de Instrumentación	47
2.16. Seguidor de voltaje	48
2.17. Respuesta ideal y real de un filtro paso bajas y su circuito pasivo	49
2.18. Topología Saleen-Key de un filtro paso bajas	49
2.19. Respuesta ideal y real de un filtro paso altas y su circuito pasivo	50
2.20. Topología Saleen-Key de un filtro paso altas	50
2.21. Respuesta ideal y real de un filtro paso banda y su circuito pasivo	51
2.22. Respuesta ideal y real de un filtro rechaza banda y su circuito pasivo	51
2.23. Tipos de cables	52
2.24. Microprocesador y microcontrolador	55
2.25. Niveles de cuantificación	56
2.26. ADC de Aproximaciones Sucesivas	57
2.27. Niveles OSI	59
2.28. Estructura de marco PCM	60
2.29. Formato del Paquete Fuente	62
3.1. Cronograma de la misión AEMB-F1	66

3.2. Presión y Temperatura Atmosférica	69
3.3. Sensores seleccionados	78
3.4. Espectro en frecuencia del sensor de temperatura (1.25 kHz/div)	79
3.5. Espectro en frecuencia del sensor de corriente (1.25 MHz/div)	79
3.6. Espectro en frecuencia del sensor de presión (1.25 MHz/div)	79
3.7. Espectro en frecuencia del sensor de humedad (1.25 kHz/div)	80
3.8. Espectro en frecuencia del acelerómetro (1.25 kHz/div)	80
3.9. Configuración del filtro	81
3.10. Acondicionamiento del sensor de corriente ($i = 0.8 \text{ A}$)	84
3.11. Acondicionamiento del sensor de corriente ($i = 0.8 \text{ A}$) 2	84
3.12. Caracterización del sensor de presión	85
3.13. Acondicionamiento para el sensor de presión	86
3.14. Caracterización del circuito de acondicionamiento del sensor presión	87
3.15. Prueba de caracterización para el sensor de temperatura	89
3.16. Caracterización del sensor de temperatura LM60-CIZ	89
3.17. Comparación entre la implementación del circuito acondicionador del sensor de corriente y su simulación	90
3.18. Prueba de caracterización para el sensor de corriente	91
3.19. Caracterización del sensor de presión acondicionado	92
3.20. Prueba de caracterización para el sensor de presión	92
3.21. Caracterización del sensor de humedad	93
3.22. Arduino UNO y sus Puertos	96
3.23. Partes del Paquete Fuente a incluir en el diseño	103
3.24. Número de pin para cada tipo de tarjeta SD	106
3.25. Circuito de comunicación Arduino UNO - SD	107
3.26. Diagrama de flujo que representa el algoritmo de almacenamiento de datos	108
3.27. Diagrama de flujo del software del sistema (a)	110
3.28. Diagrama de flujo del software del sistema (b)	111
3.29. Diagrama a bloques del sistema diseñado	113
3.30. Estructura mecánica de Pixqui	114
3.31. Diagrama del cajón para Quetzal	115
3.32. Esquemático del Arduino UNO-R3	116
3.33. Coordenadas de headers Arduino UNO	116
3.34. Esquemático del primer nivel (a)	119
3.35. Esquemático del primer nivel (b)	120
3.36. Diseño para PCB del primer nivel	121
3.37. Esquemático del segundo nivel	122
3.38. Distribución de sensores de temperatura en el conector	123
3.39. Diseño para PCB del segundo nivel	123
3.40. Esquemático del tercer nivel (a)	125
3.41. Esquemático del tercer nivel (b)	126
3.42. Diseño para PCB del tercer nivel	127
3.43. Diseño para PCB del cuarto nivel	127
3.44. Esquemático del cuarto nivel	128

3.45.	Diagrama y huella para ACS712-05B	129
3.46.	Diagrama y huella para LM124D	129
3.47.	Diagrama y huella para 74HC4051	129
3.48.	Diagrama y huella para CD4067BE	129
3.49.	Diagrama y huella para CD74HC4067	129
3.50.	Máquina CNC en Juriquilla	131
3.51.	PCBs fabricadas con CNC en Juriquilla	131
3.52.	Errores generados por CNC	131
3.53.	Trabajando en Juriquilla, Querétaro	132
3.54.	MITs AutoLab	132
3.55.	PCB fabricada con AutoLab en el I.I.	133
3.56.	Detalles de las PCBs hechas con AutoLab	133
3.57.	Tarjetas con componentes montados	134
3.58.	Interior del conector para bus de datos y potencia	135
3.59.	Sensores de temperatura y humedad	135
3.60.	Conector con sensores de temperatura	135
3.61.	Partes del Paquete Fuente a incluir en el diseño	136
3.62.	Sistema con sensores conectados	137
3.63.	Dimensiones del sistema	138
3.64.	Ejemplos de las placas terminadas	138
3.65.	Detalles del acabado del sistema	138
4.1.	Conexión wire wrap	142
4.2.	Bus de datos con wire wrap	142
4.3.	Circuito de emergencia visto de frente	143
4.4.	Circuito de emergencia visto de atrás	143
4.5.	Cajón abierto con todos los sistemas integrados	145
4.6.	Tarjeta de emergencia colocada sobre sistema original	145
4.7.	Distribución de los sensores de la tarjeta de emergencia en el cajón	146
4.8.	A. Serna sellando el cajón de Quetzal	147
4.9.	O. Domínguez sellando Pixqui	147
4.10.	Pixqui antes de cerrar y sellar	147
4.11.	Pixqui montado en la góndola	147
4.12.	A.Serna frente a la góndola de NASA	148
4.13.	Equipo de NASA revisando la góndola	148
4.14.	Pixqui es entregado al ICN	148
4.15.	J. Ferrer con el cajón de Quetzal recuperado	148
5.1.	Comparación de la variación de la temperatura	151
5.2.	Variación de temperatura en la estructura del cajón	151
5.3.	Variación de temperatura en el SMPF	152
5.4.	Variación de temperatura en el sistema de potencia	153
5.5.	Variación de temperatura en la cámara	153
5.6.	Variación de temperatura en materiales de prueba	154
5.7.	Consumo de corriente en el SMPF	154

5.8. Variación de humedad dentro del cajón	155
5.9. Resultado de multiplexor que falló	156
5.10. Fuerzas de aceleración que experimentó el sistema	157
B.1. Pruebas de rapidez de los algoritmos de variables	172
B.2. Pruebas de precisión de los algoritmos	173

Índice de tablas

1.1. Clasificación de satélites de acuerdo a su masa	8
2.1. Tipos de estímulos	20
2.2. Parámetros físicos a bordo de un satélite	21
2.3. Memorias no-volátiles de tipo ROM	63
3.1. Análisis de sensores de temperatura	70
3.2. Análisis de sensores de corriente	72
3.3. Análisis de sensores de presión	75
3.4. Análisis de sensores de humedad	76
3.5. Comparación entre los dos circuitos de acondicionamiento para el sensor de corriente	85
3.6. Caracterización del acelerómetro	94
3.7. Equivalencias de fuerza g vs. valor de conversión para el acelerómetro	94
3.8. Comparación de las características del UNO vs. MEGA	95
3.9. Distribución de terminales del Arduino UNO	97
3.10. Distribución de sensores en los multiplexores	98
3.11. Selección de multiplexores	98
3.12. Tiempo promedio del ADC por cantidad de muestras	101
3.13. Análisis del rendimiento de los algoritmos	102
3.14. Distribución de pines en memoria SD y Arduino UNO	106
3.15. Consumo de potencia de los Arduino	109
3.16. Consumo de potencia de los componentes del sistema	112
3.17. Consumo total de potencia de los sistemas	112
3.18. Distribución de señales del bus	117
3.19. Distribución de componentes por nivel	117
4.1. Cantidad de sensores integrados al sistema	139
4.2. Estadísticas de tiempo del programa	140
4.3. Cantidad de información generada por muestra completa	140
4.4. Distribución de los sensores de la tarjeta de emergencia	144
5.1. Características del SMPF	150

Agradecimientos

A Dios, por su suplir de vida y gracia cada día. No soy yo quien puede, sino Él.

A mi Papá, Antonio, gracias por todo tu amor, apoyo, y aliento de vida. Sigamos corriendo la carrera. A mi Mamá, Leticia, gracias por escucharme, por tu amor y cariño, todo tu esfuerzo comienza a dar fruto. A mi hermana, Ónice, gracias por tus abrazos, chistes y pláticas. Sin ti la vida sería aburrida. Verte crecer me llena de gozo. Los amo con todo mi corazón.

A mi mejor amiga, Andrea. Aunque las noches eran largas, ahí estuviste a mi lado. Cuando sentía que no podía más, tu sonrisa y tus palabras de aliento me empujaban a terminar.

A mis hermanos, Óscar, Isaac C., Isaac B., Frank, Fred, Juan Pablo, y Edgar. Sin las tardes de risas, pláticas, y oración, me hubiera vuelto loco en la universidad.

A mi asesor Dr. José Alberto Ramírez Aguilar y a mis profesores Dr. Carlos Romo Fuentes, Dr. Saúl de la Rosa Nieves, y Dr. Saúl Santillán Gutierrez, gracias por compartir su tiempo, conocimiento y experiencia. Su esfuerzo no ha sido en vano.

Al Dr. Jorge Ferrer, gracias por creer en mi, por las palabras de ánimo, por no rendirte, y por ensuciarte las manos junto con nosotros. Al Mtro. Ricardo Arturo Vázquez Robledo por su amplia disposición y ánimo para trabajar.

A la Red de Ciencia y Tecnología Espacial y al programa PAPIIT por las becas que me otorgaron para continuar con este proyecto hasta terminarlo.

A la UNAM, que me abrió sus puertas y me ha dado dado oportunidades tan grandes para crecer. A la Facultad de Ingeniería y al Centro de Alta Tecnología.

Acrónimos

Capítulo 1

CAT	Centro de Alta Tecnología
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
SMPF	Sistema de Monitoreo de Parámetros Físicos
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NADCS	Navigation, Attitude Determination and Control Subsystem
PSS	Power Supply Subsystem
SS	Structural Subsystem
TCS	Thermal Control System
TS	Telecommunications Subsystem
DHPS	Data Handling and Processing Subsystem
TMS	Telemetry Subsystem
PS	Propulsion Subsystem
COTS	Comercial Off The Shelf
AEMB-F1	Agencia Espacial Mexicana Balloon - Flight 1
AEM	Agencia Espacial Mexicana
NASA	National Aeronautics and Space Administration
DUT	Device Under Test
RF	Radio Frecuencia

Capítulo 2

FDM	Multiplexaje por División de Frecuencia
TDM	Multiplexaje por División de Tiempo
ADC	Convertidor Analógico-Digital
RTD	Resistencia Detectora de Temperatura
PTC	Coficiente de Temperatura Positivo
NTC	Coficiente de Temperatura Negativa
LDVT	Transformador Diferencial de Variación Lineal
RDVT	Transformador Diferencial de Variación Giratorio
DC	Corriente Directa
PCM	Modulación por Pulsos Codificados
μP	Microprocesador
CPU	Unidad Central de Procesamiento
μC	Microcontrolador
MUX	Multiplexor

GND	Tierra
RAM	Memoria de Acceso Aleatorio
OSI	Sistemas de Interconexión Abiertos
PDU	Unidades de Datos con Protocolo
IRIG	Inter Range Instrumentation Group
CCSDS	Comité Consultivo para Sistemas de Datos Espaciales
SCPS	Protocolo de Especificación para Comunicaciones Espaciales
NVRAM	RAM No-Volátil
FRAM	RAM Ferroeléctrica
DRAM	RAM Dinámica

Capítulo 3

GPS	Sistema de Posicionamiento Global
DAQ	Adquisición de Datos
IPS	Instrucciones Por Segundo
DIP	Dual In-line Package
IDE	Entorno de Desarrollo Integrado
UART	Transmisor/Receptor Asíncrono Universal
TTL	Lógica Transistor a Transistor
I²C	Inter-Circuitos Integrados
USB	Bus Universal en Serie
COM	Comunicación
SDA	Línea de Datos Serial
SCL	Línea de Reloj Serial
SD	Secure Digital
ASCII	Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información
BIN	Binario
OCT	Octal
DEC	Decimal
HEX	Hexadecimal
CAN	Controller Area Network
PC	Computadora Personal
ICN	Instituto de Ciencias Nucleares
II	Instituto de Ingeniería
PCB	Tarjeta de Circuito Impreso
VCC	Voltaje de Polarización
SSOP	Shrink Small Outline Package
CNC	Computer Numeric Control
SSTV	Televisión Slow-scan
AWG	Calibre de Alambre Estadounidense

Capítulo 4

CSBF	Columbia Scientific Balloon Facility
SMPF-E	Sistema de Monitoreo de Parámetros Físicos de Emergencia

Capítulo 1

Introducción

La tecnología espacial es un tema cada día más común entre nuestra sociedad. Conforme ha avanzado la ciencia, son más palpables los beneficios que nos ha traído ésta tecnología; desde información para pronósticos de clima hasta una red de comunicaciones global, inclusive podemos determinar nuestra posición sobre la tierra con un dispositivo adecuado. Los satélites artificiales son la espina dorsal de estas operaciones (por conveniencia, a lo largo de éste trabajo se referirán a los satélites artificiales simplemente como satélites). Hay cientos de satélites en órbita alrededor de la Tierra, la mayoría de los países es dueño de alguno. México es dueño de algunos satélites, sin embargo, estos satélites han tenido que ser adquiridos en el extranjero. México sólo ha diseñado y construido un satélite, el UNAMSAT. El desarrollo de tecnología espacial ha estado estancado durante algún tiempo pero tomará fuerza de nuevo. El Centro de Alta Tecnología (CAT) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ha tomado la iniciativa y está buscando impulsar el área aeroespacial en el país. Por medio de colaboraciones con otros institutos y algunas agencias de gobierno el CAT ha obtenido el honor de llevar a cabo el diseño de algunos proyectos satelitales para el país. Uno de estos proyectos es *Quetzal*.

Es por este proyecto que nace la necesidad de desarrollar diversos subsistemas para poder integrar el satélite, véase sección 1.1.2. Uno de estos subsistemas es el de telemetría. El sistema de telemetría es necesario para que el satélite se pueda comunicar con el equipo en Tierra. Una función de tal sistema es el envío del estado operativo del satélite, para esto se necesita diseñar un sistema de monitoreo de parámetros físicos (SMPF).

La necesidad de tal sistema surgió con *Quetzal* (sección 1.1 pero es por medio de la misión AEMB-F1 (sección 1.2) que se logrará probar el diseño del sistema de monitoreo. El proyecto que se irá desarrollando a lo largo de esta tesis está basado principalmente en las necesidades y restricciones que implican la misión AEMB-F1 pero con miras a poder ser fácilmente configurado para las necesidades de *Quetzal*.

En este capítulo se describirán las dos misiones que definen este proyecto. Se dará una idea general del como surgió cada uno y su misión de manera breve. Es de interés para el desarrollo del SMPF conocer que requerimientos de monitoreo tiene cada caso y también que limitantes están ligados a cada uno. A raíz de tal información se presentarán los objetivos del trabajo. Una vez presentados los casos, se

darán algunos antecedentes de tecnología espacial. Se analizarán que tipo de misiones espaciales hay y las diversas plataformas satelitales y se comentarán las diversas partes de las cuales se forma un satélite. Para poder realizar un diseño que funcione en el espacio es necesario conocer a que tiempo de ambiente se va a enfrentar, se presentarán algunas de las posibles causas de fallas en un satélite si no se toman las debidas precauciones. Finalmente, se entrará con más detalle al concepto de telemetría y su fuerte lazo con la tecnología espacial.

1.1. Caso de estudio: Quetzal

Quetzal nace como una colaboración entre la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), por medio del Centro de Alta Tecnología (CAT), y el Massachusetts Institute of Technology (MIT) con el fin de promover actividades de investigación y desarrollo tecnológico de forma conjunta en el campo espacial. Se propone llevar a cabo el diseño preliminar de una plataforma para micro-satélites que sea flexible, relativamente barata, capaz de realizar observaciones complementarias, así como, probar nuevas técnicas, algoritmos de monitoreo, etc.[1].

1.1.1. Misión

La misión principal del satélite propuesto es: medir la columna vertical de contaminantes sobre la ciudad de México y otras ciudades latinoamericanas, a fin de complementar la información adquirida con la instrumentación en la superficie terrestre. Las mediciones permitirán definir las fuentes de los contaminantes y establecer estrategias ecológicas para tratar con ellas. Esto va a proveer a México elementos para proponer nuevos enfoques para llevar a cabo su rol con respecto las nuevas leyes internacionales de cambio climático.

1.1.2. Necesidades de monitoreo

Dado a que este trabajo se va a enfocar al diseño de un sistema de adquisición de datos con miras a ser integrado en esta plataforma satelital, es necesario ubicar los diversos subsistemas por los cuales estará conformado el satélite para así determinar que parámetros se van a estar monitoreando. Se planea que el satélite cuente con los siguientes subsistemas y los consecuentes parámetros físicos a monitorear:

1. **Navegación, determinación de posición, y control (NADCS)** - parámetros físicos a monitorear: temperatura, corriente, bits de estado, tramas de datos
2. **Suministro de Potencia (PSS)** - parámetros físicos a monitorear: temperatura, corriente, voltaje, frecuencia, bits de estado
3. **Estructural (SS)** - parámetro físico a monitorear: temperatura
4. **Control Térmico (TCS)** - parámetros físicos a monitorear: temperatura, bits de estado

5. **Telecomunicaciones (TS)** - parámetros físicos a monitorear: temperatura, bits de estado
6. **Manejo y Procesamiento de Datos (DHPS)** - parámetros físicos a monitorear: temperatura, corriente, bits de estado, tramas de datos
7. **Telemetría (TMS)** - parámetros físicos a monitorear: temperatura, corriente, tramas de datos
8. **Propulsión (PS)** - parámetros físicos a monitorear: temperatura, corriente, voltaje, bits de estado

1.1.3. Limitantes

Se propone que la órbita esté a 686 km de altura con una inclinación ya sea de 98° o 28.5°. Los modelos de ingeniería se desarrollarán con componentes *Comercial Off The Shelf* (COTS). Esto debido a su bajo costo y fácil adquisición. Se ha contemplado que la estructura sea 50x50x70 cm, dividido en tres niveles. ***La potencia que podrá generar el satélite esta en el orden de 10 W.***

1.2. Caso de estudio: AEMB-F1

AEMB-F1 (Agencia Espacial Mexicana Balloon - Flight 1), también conocido como *Pixqui*, es una plataforma sub-orbital Mexicana de usos múltiples. Surge como un convenio de colaboración científica entre la Agencia Espacial Mexicana (AEM) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) [2].

1.2.1. Misión

Equipada con una computadora central, un sistema de potencia protegido, un sistema de monitoreo de parámetros físicos ,y un banco de memoria, la misión de la plataforma sub-orbital es permitir probar de manera rápida y a bajo costo el funcionamiento de equipos y componentes espaciales en vuelos sub-orbitales (32 km).

1.2.2. Necesidades de monitoreo

Se realizarán pruebas para algunos subsistemas del satélite *Quetzal* dentro de *Pixqui*. Debido a las limitaciones de la misión, no se podrá poner un GPS en el sistema debido a su emisión de señales de radio, así que no habrá manera de determinar la posición del sistema en prueba. Se propone hacer una medición indirecta de la altura del sistema por medio de medir la presión atmosférica. Se monitoreará, además, la humedad dentro del sistema, dado a que el sistema atravesará gran parte de la atmósfera se teme que haya condensación y se provoquen cortos, se pretender monitorear estas condiciones para pruebas futuras. El sistema monitoreará además: temperatura, corriente y fuerzas de aceleración de acuerdo a las necesidades del satélite *Quetzal*.

1.2.3. Limitantes

NASA requiere que la plataforma completa, con el sistema bajo prueba (DUT) integrado, no emita ningún tipo de onda electromagnética (RF) y deberá superar las pruebas de compatibilidad electromagnética necesarias. Tampoco podrá emitir ningún tipo de luz. Se espera una variación de temperatura entre los -60° y 30°C y una disminución de presión desde 1 bar a 3 mbar.

1.3. Objetivos

Teniendo todo esto en cuenta, se plantean los siguientes objetivos para el trabajo a desarrollar.

- Diseñar y construir un sistema de monitoreo de parámetros físicos para un micro-satélite.
- El sistema deberá monitorear los parámetros físicos necesarios dentro del proyecto *Pixqui* y tener una fácil migración hacia las necesidades de monitoreo del satélite *Quetzal*.
- El sistema no emitirá ningún tipo de ondas de radio.
- El sistema no emitirá ningún tipo de luz.
- El sistema deberá ser diseñado y construido con componentes COTS.
- El sistema deberá ser capaz de sobrevivir la temperaturas a 32 km de altura y la variación implícita para llegar a esa altura.
- El sistema deberá ser capaz de sobrevivir la presión a 32 km de altura y la variación implícita para llegar a esa altura.
- El consumo del sistema no deberá superar 1.5 W.
- Toda la información generada deberá ser guardada en algún dispositivo y recuperada para su análisis.
- El trabajo deberá servir como base para el futuro desarrollo del sistema de telemetría de *Quetzal*

1.4. Tipos de Misiones Satelitales

Por lo general se define a un satélite como un cuerpo natural o artificial que gira entorno a un cuerpo celeste como los planetas o estrellas. Los satélites artificiales son puestos en una órbita deseada y llevan una carga dependiendo de la misión que se pretende llevar a cabo[3]. Los satélites son destinados a aplicaciones de comunicación, clima, y navegación. Otros monitorean los recursos de la Tierra, el estado de

las cosechas y la contaminación. Monitorear el avance del calentamiento global y el monitoreo de los hoyos en la capa de ozono solamente es posible mediante satélites. También, por medio de los satélites que sirven a la comunidad científica, se está agregando al conocimiento que el hombre tiene sobre el ambiente, nuestro sistema solar y el universo. Así como los satélites se utilizan para fines pacíficos hay aplicaciones paralelas pero para fines militares inevitables en especial para comunicaciones, clima y navegación.

El desarrollo de un satélite dependerá grandemente de su misión, tal misión y sus requerimientos de rendimiento determinarán el diseño del satélite resultante. Así como hay una amplia variedad de vehículos aéreos para realizar diversas clases de tareas, la clase de la misión del satélite llevará a diversos tipos de diseños, es por esto que es necesario identificar las diversas misiones que existen y algunas de sus características[4]. Los satélites pueden ser clasificados de diversas maneras, por la altitud de su órbita, excentricidad o inclinación. La órbita específica adoptada para una misión tendrá un fuerte impacto en el diseño [5].

la mayoría de las misiones espaciales se pueden clasificar en las siguientes categorías generales: comunicaciones, percepción remota, navegación, militar, ciencia en sitio, y otros. La figura 1.1 ilustra algunos satélites de distintas clasificaciones.

1.4.1. Comunicaciones

El propósito de la mayoría de los aparatos espaciales es de simplemente transferir información a la Tierra. Su alcance va desde telecomunicaciones full-duplex de banda ancha a la transmisión en una dirección de señales de televisión o mensajes de navegación.

1.4.2. Percepción Remota

La observación a distancia (percepción remota) representa una amplio rango de misiones y aplicaciones. Cualquier observación que haga una nave espacial sin contactar el objeto en question es considerado percepción remota. Ya sea que se este obteniendo imágenes de la tierra, sondeando la atmósfera de la Tierra, proveyendo



(a) Acts
Comunicación



(b) Galileo
Navegación



(c) Hubble
Ciencia

Figura 1.1: Tipos de satélites

un aviso temprano del lanzamiento de un misil balístico, u observando el espectro químico característico de galaxias distantes.

1.4.3. Navegación

GPS, GLONASS, y otros sistemas de navegación internacionales han demostrado ser ricos en aplicaciones para usos militares, civiles, académicos, y recreativos. GPS provee información en tiempo-real de posición y velocidad de un objeto, por ejemplo, automóviles, barcos, aviones comerciales y militares, aparatos espaciales. Este sistema está disponible en todo el mundo y cuenta con dos frecuencias: civil y militar.

1.4.4. Militar

Aun permanece como un concepto, debido al gran debate que genera. El desarrollo de ciertas armas espaciales operacionales ha sido prohibido bajo el tratado anti misiles balísticos de 1972. Algunos expertos ven el armamento en el espacio como inevitable, no se ha planteado como un objetivo.

1.4.5. Ciencia en sitio

La recolección de muestras y evaluación tienen un gran papel en la ciencia planetaria y espacial. En general esta categoría se refiere a aparatos espaciales que logran aterrizar en otros planetas.

1.5. Tipos de órbitas

Las categorías de misiones antes mencionadas se pueden llevar a cabo en diversas ubicaciones en el espacio, algunas órbitas son más útiles para ciertas misiones que otras, a continuación se presentan las tres categorías de órbitas de acuerdo a su altura y las clases de misiones que se pueden llevar a cabo en ellas.

- Órbita Terrestre Baja - Low Earth Orbit (LEO)
- Órbita Terrestre de Altura Media - Medium-Altitude Earth Orbit (MEO)
- Órbita Terrestre Geosíncrona - Geosynchronous Earth Orbit (GEO)

Dentro de cada órbita se pueden realizar las diferentes tipos de misiones mencionadas, clasifiquemos las diversas categorías dependiendo de la altura de la órbita, la figura 1.2 ilustra las distintas órbitas.

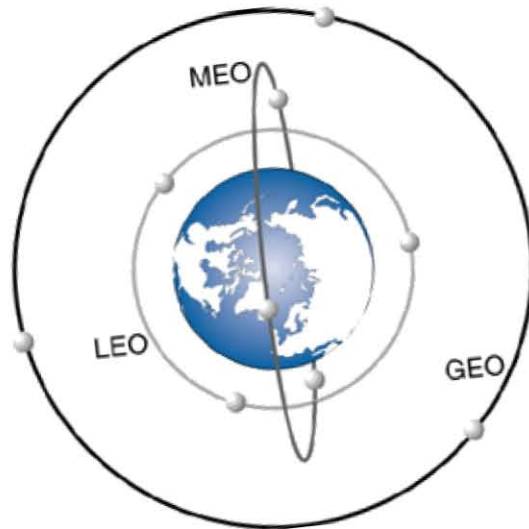


Figura 1.2: Tipos de Órbitas

1.5.1. Misiones espaciales en órbita LEO

Las órbitas LEO están definidas hasta una altura máxima de 2000 km, o bien, debajo del cinturón de radiación Van Halen inferior. Entre las misiones espaciales que se llevan a cabo a esta altura están los vuelos de prueba, observaciones de la Tierra para fines científicos, militares, meteorológicos y otros fines utilitarios, así como, observaciones de fenómenos espaciales locales o de espacio profundo. Inclusive la Estación Espacial Intenacional (ISS) se ubica a esta altura (400 km).

1.5.2. Misiones espaciales en órbita MEO

Ubicada entre los 2000 y 35,788 km la órbita MEO no fue muy utilizada en los primeros años de la era espacial sino hasta tiempos mas recientes especialmente para aplicaciones de navegación mediante el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Los satélites en órbita MEO experimentan un flujo de electrones (radiación) mucho mayor que las otras dos órbitas debido a los cinturones de Van Halen. Los satélites en órbitas a estas alturas evitan estar dentro del cinturón interno, pero si se ubican más profundamente dentro del cinturón externo que la órbita GEO.

1.5.3. Misiones espaciales en órbita GEO

Las órbitas geosíncronas, en particular la órbita geosíncrona conocida como geoes-tacionaria, es una de las “propiedades” más valiosas en el espacio. Ubicadas a alturas mayores a 35,788 km, al movere en sincronía con la tierra, tienen la particularidad de aparentar estar estacionarios sobre un punto de la tierra. Principalmente se utilizan para comunicaciones, observaciones meteorológicas y observaciones espaciales.

1.5.4. Misiones espaciales no orbitales

Además de misiones que se enfocan en la Tierra o se limitan a permanecer en una órbita cercana, existen misiones que salen al espacio exterior. Existen misiones lunares y de espacio profundo. Dentro de tales están las misiones interplanetarias, cuyo fin es poder enviar aparatos espaciales a los planetas internos y externos de nuestro sistema solar y las misiones a los pequeños cuerpos de nuestro sistema solar, esto es, enviar aparatos espaciales a cometas y asteroides.

1.6. Plataformas Satelitales

Se puede clasificar a los satélites por su función, tipo de órbita, costo, tamaño, etc. La tabla 1.1 ilustra un esquema para clasificar satélites en términos de masa desplegada que ha sido adoptada generalmente en los últimos años. Las masas presentadas se refieren al satélite en órbita y con su capacidad máxima de combustible. El término de satélites pequeños cubren todas las categorías menores a 500 kg.

Tabla 1.1: Clasificación de satélites de acuerdo a su masa[6]

Categoría	Rango de Masa [kg]
Satélite grande	>1000
Satélite mediano	500-1000
Mini-satélite	100-500
Micro-satélite	10-100
Nano-satélite	1-10
Pico-satélite	0.1-1
Femto-satélite	<0.1

1.7. Subsistemas de un satélite

Wertz [7] divide un satélite en siete subsistemas para llevar a cabo el diseño completo, sin embargo, puede haber más, inclusive, se puede hacer la división como mejor le parezca a el equipo de diseño. Cada subsistema se encarga de una parte crítica para soportar la misión que lleva el satélite. A continuación se mencionarán los diversos subsistemas y su función dentro del satélite.

1.7.1. Determinación de posición y control

Attitude Determination and Control subsystem (ADCS) estabiliza el satélite y lo orienta en las direcciones deseadas durante la misión a pesar de los pares de perturbación externos. Esto requiere que el satélite determine su posición, utilizando sensores, y la controle, mediante actuadores. Se liga cercanamente a los subsistemas de propulsión y navegación [7]. Para dicho propósito se puede emplear un sistema de control *pasivo* o *activo*.

1.7.2. Telemetría, Rastreo y Comando

Telemetry Tracking and Command (TT&C), también conocido como el subsistema de comunicaciones provee la interfaz entre el satélite y los sistemas en Tierra. La información de la carga útil (instrumentos científicos) y la información del estado operacional de los diversos equipos del satélite (carga de servicio) pasan a través de este subsistema a los operadores en la estación terrestre. Igualmente los comandos enviados por los operadores para controlar el satélite y operar la carga útil pasan por el subsistema de comunicaciones hacia el satélite. Entre sus funciones está: hacer el seguimiento de la señal portadora y mantener el enlace con la estación terrestre; detectar y recibir comandos mediante la señal de uplink (enlace de subida Tierra-Satélite) y procesarla; hacer la modulación y transmisión de la señal de telemetría proveniente de los sistemas del satélite; recibir, procesar y transmitir las señales para determinar la posición del satélite; y realizar operaciones de subsistema (procesar información de los subsistemas, mantener el estado operativo del satélite, apuntar las antenas, detección y corrección de fallas) [7].

1.7.3. Comando y Manejo de Información

Command and Data Handling (C&DH), lleva a cabo dos funciones principales: recibe, valida, decodifica y distribuye comandos a los otros subsistemas del satélite, así mismo, junta, procesa, y da formato a la información de la misión y del estado operativo del satélite para ser enviada a la estación Terrestre o para ser usada por una computadora de abordo. También puede hacer funciones adicionales como llevar el reloj del satélite, monitoreo del estado de la computadora e interfaces de seguridad [7].

1.7.4. Potencia

Electrical Power Subsystem (EPS), provee, almacena, distribuye y controla la potencia eléctrica del satélite [7]. Este subsistema incluye también los paneles solares.

1.7.5. Control Térmico

Thermal Control Subsystem (TCS), su función principal es la de mantener todos los componentes de la nave espacial y de la carga útil dentro de los límites de temperatura de operación requeridos para cada etapa de la misión. Si la temperatura de los componentes excede su límite de supervivencia puede resultar en daños permanentes, por eso la importancia de controlar la temperatura a bordo del satélite [7]. Existen sistemas de control térmico *pasivos* y *activos*.

1.7.6. Estructura y Mecanismos

Structure and Mechanics Subsystem (S&MS), soporta mecánicamente todos los subsistemas del satélite, sujeta el satélite a el vehículo de lanzamiento y provee para

la separación activada mediante un comando. El diseño deberá cumplir con todos los requerimientos de fuerza y dureza del satélite y su interfaz con el cohete [7].

1.7.7. Guía y Navegación

Guidance and Navigation (G&N), se utiliza el término navegación y determinación de órbita indistintamente para referirse a la posición de un satélite, su velocidad o, equivalentemente, sus elementos orbitales como una función del tiempo. También se puede referir al ajuste de la órbita para llegar a algún requerimiento predeterminado. Así, tal sistema se encarga de medir y mantener la posición del centro de masa de la nave espacial [7].

1.7.8. Propulsión

Propulsion Subsystem, se utiliza para proveer el empuje requerido para impartir los cambios de velocidad necesarios para ejecutar todas las maniobras requeridas para mover el satélite ya sea de su órbita de transferencia a su órbita geoestacionaria o para mantener el satélite en su órbita durante el tiempo de vida del satélite [3].

1.7.9. Carga Útil

Payload, el subsistema más importante de cualquier satélite. La carga útil que lleva un satélite depende de los requerimientos de la misión; será el instrumento o dispositivo que llevará a cabo las acciones por las cuales fue enviado el satélite al espacio. Pueden ser transpondadores, radiómetros, cámaras de alta resolución, espectrómetros, detectores de plasma, magnetómetros, etc. [3].

1.8. Ambiente espacial

Es fácil olvidar que el ambiente existente en la Tierra no es el único. Acostumbrados a nuestra atmósfera protectora nos impresionaría los efectos a los cuales estaríamos expuestos si algún día dejara de existir. Las misiones espaciales se llevan a cabo fuera del escudo protector de la atmósfera, para poder hacer el diseño de un satélite que sea duradero es necesario evaluar el tipo de ambiente al cual el satélite va a estar expuesto, para así poder mitigar los efectos destructivos del ambiente espacial [8].

1.8.1. Radiación Solar

El sol provee prácticamente toda la entrada de calor al sistema solar. El sol es fundamentalmente un reactor de fusión termonuclear cuya temperatura de superficie es de aproximadamente 5800 K. El sol emite una cantidad sustancial de rayos ultra violeta (UV) y rayos X, la energía liberada por el sol de manera nominal es de 3.85×10^{26} W. El viento solar es otro flujo emitido por el sol, es un flujo de plasma enviado a

velocidades altas, este viento llega a la tierra con una velocidad de aproximadamente 450 km/s con una densidad de 9 protones/ cm^3 y una temperatura cinética de 100 000 K [8].

1.8.2. Ambiente de la órbita terrestre

Existen pocas colisiones atómicas o moleculares entre componentes de la atmósfera y el satélite ya sea en orbitas LEO o GEO. Esto causa que el intercambio de calor sea meramente mediante radiación. La entrada principal de calor en el espacio cercano a la tierra es debida al sol que equivale a $1371 \pm 5 \text{ W/m}^2$. La segunda entrada es resultado del albedo de la Tierra con una magnitud aproximada de 200 W/m^2 , atmósfera neutral y el viento solar tienen un efecto despreciable de calentamiento, así, la temperatura del satélite va a ser resultado del calor absorbido menos el calor disipado. Además por el flujo poco denso de moléculas libres, el calentamiento por fuerzas de fricción a pesar de que se alcanzan velocidades cercanas a 8km/s [8].

La ionosfera es una región donde con un aumento en la densidad de plasma causada por photoionización por la incidencia de fotones UV. El plasma afecta significativamente la propagación de ondas de radio, inclusive pueden provocar que no haya propagación o que las ondas sean reflejadas en otras direcciones.

Los campos magnéticos de la Tierra tienen dos fuentes principales, el principal en la superficie debido a las corrientes circulando en el núcleo Terrestre, y a mayores alturas causados por el movimiento diferencial de iones y electrones en la magnetósfera. El plasma del viento solar distorsiona el campo magnético de la Tierra en líneas magnéticas abiertas y cerradas (ver figura 1.3).

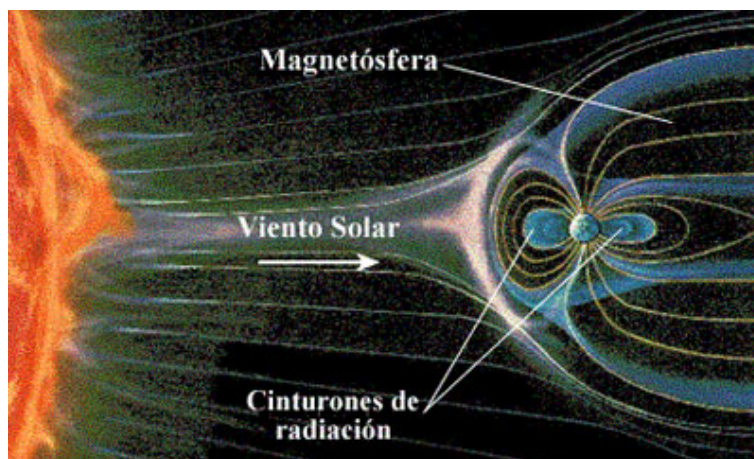


Figura 1.3: Algunos factores del ambiente espacial

1.8.3. Radiaciones Ionizantes

Los cinturones de radiación de Van Allen contienen protones y electrones con altos niveles de energía que están atrapados en los campos magnéticos de la Tierra y siguen las líneas de los campos magnéticos. Los efectos de estas partículas atrapadas son la

degradación de partes electrónicas por dosis acumulada, degradación del rendimiento de los paneles solares por daños de desplazamiento, Single Event Upsets (SEU), y carga dieléctrica[8].

También existe la radiación cósmica que se compone por núcleos de alta energía que se propagan por el espacio sin materia densa.

1.8.4. Meteoros y Escombros

Los meteoros y micro meteoros son objetos sólidos cuyo tamaño puede variar. El impacto de micrometeoros causa una degradación de propiedades térmicas en la superficie, aunque la posibilidad de fallas de componentes existe. Los escombros generados por el hombre, consisten principalmente en partículas de polvo de óxido de aluminio, cubiertas de instrumentos, tuercas y tornillos, etapas de cohetes, etc. Los tamaños varían de 0.001 mm a 10 m de diámetro. Los escombros varían de acuerdo a la altitud de la órbita. Las partículas pequeñas tienen un flujo lo suficientemente alto para desgastar superficies y energía suficiente para penetrar cubiertas protectoras [8].

1.8.5. Efectos del ambiente espacial sobre el diseño

1.8.5.1. Gasificación o sublimación

Se refiere a la vaporización de los átomos en la superficie de un material al ser sujeto a una presión ambiental que es comparable con su propia presión de vapor. Tal presión, $10^{-11} - 10^{-15}$ Pa, ocurre a alturas donde se encuentran los satélites. Aumenta este proceso conforme aumenta la temperatura ambiental. Capas de plástico delgadas y capas de óxido son particularmente sensibles a la pérdida de masa, de igual manera los lubricantes utilizados normalmente en la Tierra [8].

1.8.5.2. Erosión por oxígeno atómico

Los átomos de oxígeno forman la mayor parte de la atmósfera en órbitas LEO. El efecto de la erosión es el degradar las propiedades de los materiales (ópticas, térmicas, mecánicas, y eléctricas). Esto sucede no solo por la actividad química sino que principalmente por la velocidad a la que viajan los átomos (8 km/s). Entre los materiales que ceden poco a la erosión están el kapton recubierto por aluminio, teflón FEP y silconas. También aunque no tan buenos, polietileno, kapton-H y Z302[8].

1.8.5.3. Efectos de radiación a largo plazo

La dosis total de ionización (TID) es causada por el depósito de energía por muchas partículas a través de un largo periodo de tiempo debido principalmente a protones y neutrones. Los efectos que generan son cambios de voltajes de umbral, corrientes de fuga, cambios en temporización y fallas funcionales. Los efectos de desplazamiento generan defectos que llevan a la degradación de un dispositivo, no son daños ionizantes. Principalmente afectan a los acopladores ópticos, las celdas solares y los dispositivos lineales bipolares. Se puede mitigar estos efectos parcialmente con blindaje [8].

1.8.5.4. Efectos de radiación transitorios

Los Single Event Effects (SEE), Efectos de Eventos Individuales en español, suceden cuando iones pesados inciden en áreas sensibles de un circuito integrado y pueden generar alguno de los siguientes efectos: Single Event Upset (SEU) - provoca cambios en el estado lógico de circuitos digitales, Single Event Latchup (SEL) - el dispositivo cambia a un estado de alta corriente y sus efectos son destructivos, Single Event Gate Rupture (SEGR) - al haber una falla destructiva de un transistor de potencia, Single Event Burnout (SEB) - falla destructiva en un transistor de potencia, Single Event Functional Interrupt (SEFI) - provoca que el dispositivo digital entre a un modo donde ya no ejecuta su función de diseño, Single Event Multiple Bit Upset (SEMBU) - cuando se cambia más de un estado lógico debido a un ion, Single Event Transient (SET) - al generarse una corriente transitoria en un circuito, Single Event Induce Dark Current (SEIDC) - hay un aumento en la corriente oscura en un arreglo CCD. Las SEL, SEGR, y SEB tienen los efectos más destructivos [8].

Hay maneras de mitigar los diversos tipos de SEE, para los SEU y SEMBU se puede implementar detección y corrección de errores ya sea simple o múltiple. Es complicado corregir los SEFI, dependerá del efecto identificado. Se pueden mitigar los SET diseñando circuitos digitales con reloj, o al agregar cargas RC a los circuitos analógicos. Con los SEL habrá que detectar dónde se generó la falla y eliminar el elemento que falló, se utiliza una reserva fría de los elementos susceptibles a este efecto. Se pueden mitigar los SEGR y SEB al reducir el voltaje de compuerta y drenador. El blindaje no es efectivo contra los SEE.

1.9. Telemetría

La rama de la telemetría (medición a distancia) nació a raíz de la necesidad de enviar información de un lugar remoto, o al cual es inconveniente llegar, a otro. Tal información necesitaba ser relevada a un lugar donde pudiera ser evaluada. Por lo tanto, el objetivo principal de la telemetría es el de transmitir información exacta entre lugares lejanos o remotos. Se considera al sistema de telemetría como un sistema de comunicaciones especial. La figura 1.4 muestra un esquema simplificado de un sistema de telemetría.

1.9.1. Importancia de la telemetría en una misión satelital

Como parte del subsistema de TT&C, la parte de telemetría se encargará de obtener información del estado operativo de los diversos subsistemas del satélite. Codifica la información y la transmite hacia la estación terrestre. Sin el sistema de telemetría abordo del satélite sería imposible saber cual es el estado operativo del satélite al estar en órbita ya que no habría un sistema tal que este monitoreando los parámetros físicos relevantes del satélite (corriente, voltaje, temperatura, etc.), los procese, y los envíe a la Tierra. Es de suma importancia poder obtener y analizar esta información para poder dar los comandos adecuados, de acuerdo a la situación,

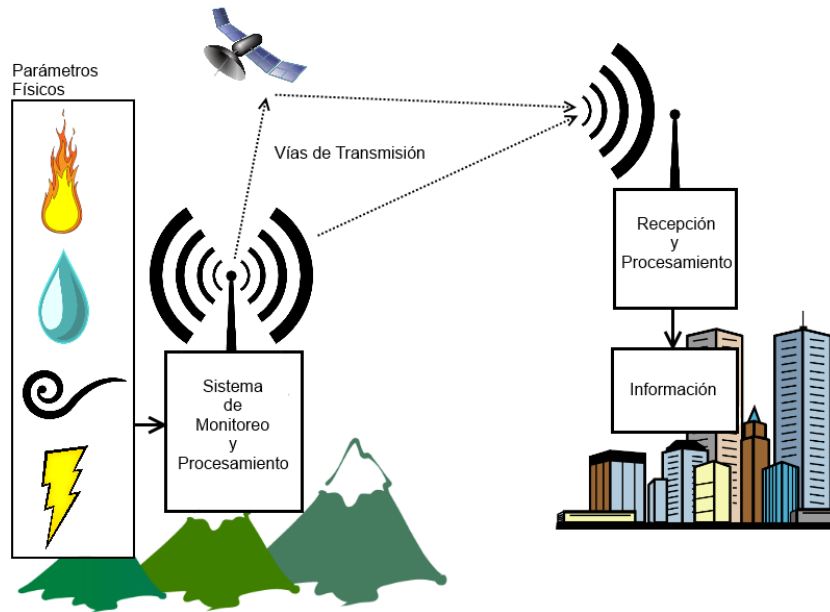


Figura 1.4: Esquema de Telemetría

al satélite. Además es por este medio que a veces se envía la información generada por la carga útil, la cual es la más importante para cualquier misión.

1.9.2. Partes que conforman un sistema de telemetría

El sistema de telemetría está compuesto de diversas secciones para facilitar su estudio y diseño. Diversos autores describen el sistema con secciones diferentes como lo describe Carden[9] comparado con Horan[5]. Ambos autores engloban todo el sistema, desarrollemos entonces una descripción expandida del sistema de telemetría, bajo esta consideración el sistema de telemetría consta de las secciones presentadas a continuación. En el presente trabajo nos enfocaremos solo en los puntos del 1 al 8.

1. Fenómenos físicos a medir
2. Sensores
3. Alambrado de campo
4. Acondicionamiento de señales
5. Sistema de multiplexaje
6. Convertidor Analógico-Digital
7. Bus
8. Procesador

9. Una interfaz de usuario para desplegar la información
10. Modulador, transmisor y antena
11. Forma de onda o canal de transmisión
12. Antena, receptor de frecuencia de radio, sección de frecuencia intermedia, demodulador de portadora.
13. Sistema de demultiplexaje
14. Procesamiento de información

1.9.2.1. Sistema de Adquisición de datos

El propósito de un sistema de adquisición de datos es convertir variables físicas en señales eléctricas por medio de sensores. Es una interfaz entre las señales del mundo exterior con el sistema de procesamiento. Su función principal es digitalizar señales analógicas entrantes para que el procesador pueda interpretarlas. Se considera que un sistema de adquisición de datos se compone de los puntos 2 al 7 del sistema de telemetría [9, 10].

Capítulo 2

Metodología de diseño del sistema de monitoreo

En este capítulo daremos una primera aproximación hacia el diseño del sistema de monitoreo. Veremos que partes lo conforman para así ir definiendo el esqueleto del sistema y delimitando su desarrollo. Se definirá que parámetros se pueden monitorear, que tecnología de sensores existe para monitorear tales parámetros, para así, escoger de entre tales opciones el más adecuado. Además, se expondrá qué técnicas se utilizarán para llevar a cabo el acondicionamiento de las señales, que procesador se va a utilizar y como se va a procesar y estructurar la información. Para entender por qué que se necesita definir cada uno de estos parámetros, definamos que es el sistema, para que sirva y cómo está conformado.

2.1. Sistema de Adquisición de Datos

Hace no demasiados años, la información proveniente de sistemas o máquinas era presentada en forma analógica por medio, por ejemplo, de la posición de una aguja sobre un marcador. Un operador tenía que tomar la lectura de dichos instrumentos. Conforme fue pasando el tiempo, los sistemas y máquinas se volvieron más complejos y más rápidos y se volvería más difícil, casi imposible, que un operador tomara todas las lecturas necesarias. Las lecturas se toman para llevar un registro del comportamiento de cierto sistema o como un pre-requisito para control. A pesar de que hoy en día la mayoría de los sensores convierten la señal analógica que están midiendo a un voltaje o corriente también analógico, es usual que ésta señal sea convertida a forma digital. Este cambio se ha ido dando conforme el precio de las computadoras y de los dispositivos electrónicos va disminuyendo y va aumentando su capacidad. Así, una computadora puede leer mucha más información y responder de manera más rápida que un operador, logrando registros de información y control en tiempo-real [11].

La adquisición de datos es un proceso por el cual fenómenos físicos del mundo real son transformados a señales eléctricas que son medidas y convertidas a formato digital para su procesamiento, análisis y almacenamiento por una computadora [12]. La figura 2.1 ilustra a manera de bloques las partes y secuencia de un sistema de

adquisición de datos.

Los sensores son aquellos dispositivos electrónicos que son capaces de convertir un fenómeno físico a una señal eléctrica.

El alambrado de campo representa la conexión física desde los sensores hasta el sistema de acondicionamiento de señales. Dado a que este alambrado es de los componentes más grande del sistema (por su longitud), es más susceptible a los efectos de ruido externo. La puesta a tierra y blindaje del alambrado de campo es de primordial importancia para reducir los efectos de ruido.

El circuito de acondicionamiento de señales toma las señales de los sensores o del mundo exterior que pueden ser demasiado ruidosas o peligrosas para medirlas directamente y las manipula de tal forma que sean apropiadas para ser procesadas por un ADC. Por lo tanto el circuito puede realizar funciones de amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento, según sea el caso de la señal entrante [10].

El sistema de multiplexaje determina en qué manera va a ser separada la información que se va recibiendo, si se va a separar en el dominio de la frecuencia (FDM) o si en el dominio del tiempo (TDM), se pueden combinar ambos esquemas [9].

El convertidor analógico-digital (ADC) se encarga de tomar muestras de señales analógicas de los sensores y convertirlas en señales digitales. La conversión implica una cuantización de la señal de entrada por lo que introduce cierta cantidad de error. Los ADC se caracterizan por dos propiedades principales su resolución y su frecuencia de muestreo. La resolución indica la cantidad de valores discretos que puede producir sobre el rango de valores analógicos, normalmente se expresa en bits por lo que la cantidad de posibles valores discretos siempre será una potencia de dos. También se puede expresar en volts como el cambio mínimo necesario para garantizar un cambio en el nivel del código de salida. Dado a que un ADC no puede hacer conversiones instantáneas, el valor de entrada necesita ser retenido durante el tiempo que el convertidor realiza la conversión (tiempo de conversión). Esto limita que tantas muestras se pueden hacer en un tiempo determinado. A la razón a la cual nuevos valores digitales pueden ser generados a partir de la muestra de señales analógicas se le denomina frecuencia de muestreo.

La información producida por el sistema de adquisición de datos necesita ser transferida al procesador también el procesador le puede enviar instrucciones al sistema de adquisición de datos; esto se hace mediante un bus. Algunas veces el procesador es externo al sistema de adquisición de datos, por lo que se deberá definir de qué manera se van a comunicar, puede ser USB, PCI, Ethernet, 802.11 Wi-Fi. También existe la posibilidad de que el procesador esté integrado al mismo sistema de adquisición de datos [13].

Cada uno de estos elementos deberá ser definido de acuerdo a las necesidades y limitantes que presenta la misión. En las siguientes secciones se irá presentando cada parte y presentarán las opciones que hay para implementar esa parte.

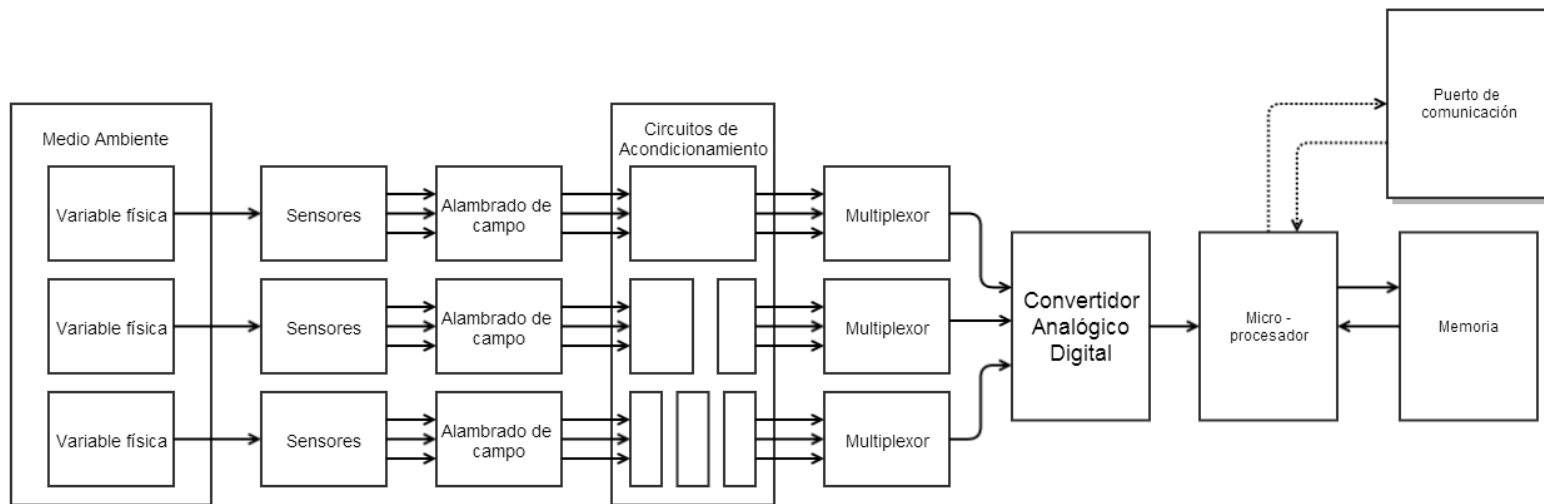


Figura 2.1: Diagrama de un sistema de adquisición de datos

2.2. Definición de los parámetros de medición

A fin de comenzar el diseño del sistema de monitoreo de parámetros físicos primero es necesario determinar que parámetros se van a monitorear. Una vez definidos tales parámetros se podrá proseguir con el diseño. En nuestro entorno físico existen una cantidad infinita de señales, las señales son, de una manera muy general, una cantidad física que varía en el tiempo. Algunas cantidades físicas típicas son las siguientes: Temperatura, humedad, Intensidad de la luz, color de la luz, fuerza o presión sobre un cuerpo, flujo de algún fluido, posición, distancia, velocidad, aceleración, el PH de alguna substancia, inclusive variables biométricas como pulso, presión sanguínea y el latido del corazón. Sin embargo en términos de sistemas eléctricos, las señales que son procesadas o analizadas no son las cantidades físicas en sí, sino un parámetro que está variando en el tiempo, como un voltaje o una corriente, que simplemente representa esa cantidad física. Así, algún tipo de “transductor” convierte tales cantidades físicas a otra forma de energía, por ejemplo, la eléctrica [5, 14].

Podemos medir e interpretar cualquier variable física, pero ¿qué variables son las más relevantes? Para el hombre, ¿qué tipo de fenómenos son más importantes monitorear? Enlistemos algunas variables físicas: Carga eléctrica, campos eléctricos y magnéticos, potenciales, capacitancia, resistencia, el efecto piezoeléctrico, el efecto piro-eléctrico, el efecto Hall, ondas sonoras, temperatura, luz, etc.

¿Qué tipo de estímulos podemos medir? Definamos algunas categorías: Acústicos, biológicos, químicos, eléctricos, magnéticos, ópticos, mecánicos, de viscosidad, de radiación, y térmicos. Podemos medir al menos una característica de cada una de estas categorías de estímulos. Es necesario identificar que características de los estímulos nos podrían ser útiles. Para tener una vista global de los tipos de estímulos que existen véase la tabla 2.1.

Ya que el sistema de monitoreo va a ser utilizado a bordo de un satélite, hay que considerar qué parámetros son los más relevantes para monitorear. Hay que tener en cuenta que cada elemento que es agregado a un satélite contribuirá al aumento del costo de la misión, por lo que es imprescindible agregar solamente lo más esencial y necesario.

Para los sistemas de telemetría espaciales existen tres categorías básicas en las cuales se puede clasificar la información: estado de salud, posición (attitude), carga útil.

La información del estado de salud, también conocido como información de parámetros de ingeniería, necesita ser monitoreada para mantener una revisión del estado operativo del equipo a bordo. La información de la posición proviene de aquellos sensores e instrumentos utilizados para ubicar la posición y orientación del satélite en el espacio. La información de la carga útil, como su nombre lo indica, proviene de la carga útil la cual que puede ser algún instrumento para observaciones terrestres y científicas así como instrumentación para comunicaciones. Analicemos los diversos tipos de parámetros que se podrían monitorear a bordo de un satélite por medio de la tabla 2.3.

Así, dependiendo de la misión, las principales variables que se van a monitorear en un satélite son: temperatura, voltaje, corriente, bits de estado y presión.

Tabla 2.1: Tipos de estímulos [15]

Acústicos	Amplitud de onda, fase de onda, polarización de onda, espectro, y velocidad de onda.
Mecánicos	Posición lineal posición angular, aceleración, fuerza, presión, esfuerzo, tensión, masa, densidad, momento, torca, velocidad de flujo, razón de transporte de masa, forma, aspereza, orientación, dureza, y conformidad.
Biológicos	Tipos de biomasa, concentración de biomasa, y estados de biomasa.
Químicos	Identidades de componentes, concentración de componentes, y estados de componentes.
Eléctricos	Carga, corriente, potencial, voltaje, campo eléctrico (amplitud, fase, polarización y espectro), conductividad, y permeabilidad.
Viscosidad	Cristalinidad e integridad estructural.
Magnético	Campo magnético (amplitud, fase, polarización, espectro), flujo magnético, permeabilidad.
Óptico	Amplitud, fase, polarización, espectro de la onda, velocidad de la onda, índice refractivo, emisividad, reflectividad, y absorción.
Térmico	Flujo, calor específico, y conductividad térmica.
Radiación	Tipo, energía, e intensidad.

2.3. Sensores

Una vez definidos los parámetros a medir se necesita un medio por el cual poder medir tal parámetro físico. Es por medio de sensores que podemos transformar un fenómeno físico a una señal eléctrica. Por lo tanto, un sensor es un dispositivo que recibe un estímulo y responde con una señal eléctrica. El término estímulo se refiere a la cantidad, propiedad o condición que es detectada y convertida a una señal eléctrica. Entonces el propósito de un sensor es responder a algún tipo de entrada de una propiedad física y convertirla en una señal eléctrica que sea compatible con circuitos electrónicos. Al decir *la señal eléctrica* se refiere a una señal que pueda ser canalizada, amplificada y modificada por dispositivos electrónicos. La señal de salida de un sensor puede ser en la forma de voltaje, corriente o carga que pueden ser descritos en términos de amplitud, frecuencia, o fase.

Siempre que se realiza una medición con un sensor se está tratando con transferencia de energía del objeto de medición al sensor. No se debe confundir sensor con transductor; un transductor es un convertidor de un tipo de energía a otro tipo de energía. Un sensor únicamente convierte algún tipo de energía a energía eléctrica. Tampoco se debe confundir con actuador que es lo opuesto a un sensor, es decir, convierte energía eléctrica a una acción mecánica [15].

En esta sección se presentarán diversas tecnologías de sensores de acuerdo al

parámetro físico al cual responden. Primero se hará una clasificación breve de los sensores y después se presentarán las tecnologías de acuerdo al parámetro físico. Los parámetros que se mencionan están basados en el análisis de la sección 2.2, aunque se incluyeron algunos otros a fin de ilustrar los alcances de los sistemas de adquisición de datos. Las variables adicionales se mencionarán al final de la sección.

Tabla 2.2: Parámetros físicos a bordo de un satélite [8]

Categoría	Qué se monitoreará	Parámetro monitoreado
Estado de salud	Caja de equipo	Temperatura
	Arreglo de paneles solares	Temperatura, Voltaje, Corriente, posición o desplazamiento
	Propulsores de control de posición	Temperatura
	Piezas de la estructura	Temperatura
	Tanques de combustible	Presión
	Rieles de suministro de energía	Voltaje
	Rieles de suministro de energía	Corriente
	Niveles de carga de baterías	Voltaje
	Ciclo de trabajo de fuente conmutada	Frecuencia
	Estados operacionales	Bit de estado
	Estado de redundancia	Bit de estado
	Mecanismos de despliegue	Bit de estado
	Posición	Sensor de sol
Sensor de Tierra		Señal analógica o digital
Sensor de estrellas		Señal analógica o digital
Giróscopos		Señal analógica o digital
Acelerómetro		Fuerza de aceleración
Información de carga útil	Considerado individualmente por misión	Señales analógicas o digitales

2.3.1. Clasificación de Sensores

La información de un objeto es recolectada por cierto número de sensores, algunos de ellos están posicionados directamente encima o dentro del objeto. Algunos pueden percibir el objeto a distancia sin ningún contacto físico y por lo tanto es llamada un sensor sin contacto. Otros pueden monitorear condiciones dentro del mismo sistema de adquisición de datos [15].

En general hay dos tipos de sensores: directos y complejos. Un sensor directo convierte un estímulo a una señal eléctrica mientras que un sensor complejo necesita además uno o dos transductores de energía antes de poder emplear un sensor directo para generar una salida eléctrica.

Otra clasificación de sensores son los pasivos y los activos. Los sensores pasivos, generan señales eléctricas sin consumo de energía de circuitos electrónicos y genera una respuesta a un estímulo externo, mientras que los activos, requieren energía externa que se denomina señal de excitación. La mayoría de los sensores pasivos son sensores directos [15].

También dependiendo de la referencia, los sensores se pueden clasificar en absolutos y relativos. Un sensor absoluto detecta un estímulo en referencia a una escala física absoluta que es independiente de las condiciones de medición. Un sensor relativo produce una señal que se relaciona a un caso específico.

2.3.2. Voltaje

La detección de voltaje es el parámetro más importante para nuestro sistema ya que la salida de todos los sensores va a ser una amplitud de voltaje [16]. El rango de medición del voltaje puede ser desde varios kV en instalaciones de potencia hasta algunos mV en superficies cargadas electrostáticamente. Medir el voltaje en un punto determina la diferencia de potencial con respecto a otro punto, por ejemplo tierra (GND). La diferencia de potencial entre dos puntos corresponde a la integral de línea del campo eléctrico. Cuando los dos puntos conectados por un conductor eléctrico, que tiene cierta resistencia, y se provee una fuente de corriente, la corriente fluye, y la magnitud es determinada por la ley de Ohm.

En el sistema de monitoreo de parámetros físicos se va a utilizar un convertidor analógico-digital para medir la amplitud de las señales eléctricas que son enviadas al microcontrolador para procesar. El ADC será la interfaz entre la información generada por el medio ambiente en los sensores hacia el procesador. Muchos microcontroladores ya tienen integrado un ADC. El funcionamiento del ADC se desarrollará más a detalle en la sección 3.4.

Una adecuada medición de voltaje es muy importante para el satélite ya que tales mediciones generarán la información de su estado operativo y es en base a ésta información que la computadora de abordaje o el equipo en la estación Terrestre va a tomar decisiones en cuanto al modo de operación del satélite.

2.3.2.1. Bits de estado

Entre las variables mencionadas en la tabla 2.3 se mencionan los bits de estado. Ésta es una señal digital, por lo tanto un nivel de voltaje. Algunos dispositivos entregarán uno o varios bits de información de acuerdo a su estado operativo. Un bit equivale a un 0 o a un 1, el 0 por lo general representa una señal de magnitud 0 V, mientras que un 1 puede ser +3.3, +5, +12 V. Se puede utilizar un ADC para detectar estos bits de información, aunque por lo general se utilizan las entradas *digitales* de los microcontroladores para registrar tales señales.

2.3.3. Corriente

La manera más fundamental de medir corriente está basada en el principio de lo que es la corriente, es decir, el movimiento de portadores de carga. Simplemente hay que contar la cantidad de cargas por unidad de tiempo. Hay que considerar no interrumpir una corriente al medirla. Hay una gran diversidad de maneras de medir corriente, a continuación se presentarán algunas para entender el funcionamiento de los sensores y así poder escoger el adecuado para el sistema [16].

El sensor de corriente va a ser indispensable para poder medir la potencia que se está manejando en el satélite. La energía que provee el subsistema de potencia depende fuertemente de la cantidad de luz solar que incide sobre los paneles solares. Al medir la corriente que están entregando los paneles se podrá determinar que potencia están entregando. Habrá momentos cuando el satélite esté en eclipse y no va a recibir luz solar y se tendrá que utilizar la energía almacenada en el banco de baterías. El ahorro de energía en esta etapa es un asunto muy crítico. Monitorear el consumo de corriente de cada sistema dará la manera de visualizar que sistemas están consumiendo más corriente para así poder controlar que deberá estar encendido o apagado, y además, da la manera de ver que sistema está operando adecuadamente al verificar que los niveles de corriente están a un nivel normal.

2.3.3.1. Shunts (derivaciones)

Utilizada para medir corrientes altas que fluyen a través de un conductor a partir de la medición de una caída de voltaje en un resistor. A frecuencias altas el grosor de la derivaciones crucial ya que la resistencia corresponde a la resistencia óhmica únicamente si su grosor es de igual o menor valor que la profundidad de penetración [16]. Véase la figura 2.2 (a). Dado a que no se van a manejar corrientes altas, tal sensor no será considerado.

2.3.3.2. Al medir la fuerza de Lorentz en el conductor

Dado a que las corrientes eléctricas dan origen a campos magnéticos, hay una fuerza que actúa entre dos conductores portadores de corriente. Esta fuerza puede ser de atracción si la corriente fluye en la misma dirección o de repulsión si fluyen en direcciones contrarias. Existe una ecuación que modela la fuerza entre los dos conductores dependiendo de la corriente que fluye en cada conductor. Para determinar el valor de la corriente se deberá pasar a misma cantidad de corriente por ambos conductores o tener un valor de corriente fijo en uno de los dos conductores [16].

2.3.3.3. Elementos de efecto Hall

El efecto Hall describe la acción de un campo magnético externo con una densidad de flujo dada sobre una corriente en un plato conductor. La fuerza de Lorentz, que actúa sobre los portadores de carga que se mueven a cierta velocidad, es desviada en dirección perpendicular al flujo de corriente. La magnitud del campo magnético resultante es tal que la fuerza electrostática sobre los portadores de carga compensa

la fuerza de Lorentz. El campo eléctrico provoca un voltaje Hall. La magnitud dependerá del grosor del conductor y el coeficiente hall del material. Véase la figura 2.2 (b). Tal sensor es práctico para nuestra aplicación, la presentación de tales elementos es en un encapsulado de circuito integrado (CI), la corriente entra y sale del CI y es generada un voltaje a la salida.

2.3.3.4. Bobinas simples

Corrientes alternas dan inicio a un flujo magnético que alterna en la proximidad de un conductor. Un flujo que está alternando que pasa por una apertura de un lazo conductor induce un voltaje. Esto es expresado en la ley de inducción de Faraday. Un sensor inductivo consiste en una bobina de una o más vueltas con ambos extremos conectados por medio de un resistor de medición, la caída de voltaje en el resistor es proporcional a la corriente alterna. Véase la figura 2.2 (c). Este método es para corriente alterna, por su principio de operación, en el satélite las corrientes que se manejarán serán DC. Tal tecnología no será considerada.

2.3.3.5. Por medio de detectar la energía del campo magnético (Lazo Abierto)

Un anillo conductor que rodea a un conductor portador de corriente contiene flujo magnético. Hay energía almacenada en un anillo con determinado volumen. Cuando este tipo de anillo tiene una interrupción en forma de hueco de aire, la energía almacenada lleva a la generación de una fuerza de atracción entre los polos del hueco. Dependiendo de la corriente, hay diversas maneras de medir esta fuerza; se puede medir la fuerza ejercida en el anillo con un medidor de tensión, un sensor de efecto hall o por medio ópticos [16]. Véase la figura 2.2 (d). Tales sensores pueden ser relativamente baratos, pero por lo general su presentación es robusta y grande, empleado normalmente para medir corrientes grandes. Dado a que no es muy preciso y puede haber fluctuaciones en su medición debido a cambios de temperatura (a los cuales estaría sometido constantemente en un ambiente espacial) tales sensores no son prácticos para el SMPF.

2.3.3.6. Bobinas con núcleos magnéticos (Lazo Cerrado)

Los transformadores de corriente alterna tienen un núcleo magnético con una bobina primaria y secundaria con N_1 y N_2 vueltas cada una. Dada una resistencia lo suficientemente grande en el circuito secundario la corriente del primario puede ser derivada de la caída de voltaje. Los materiales escogidos para transductores de corriente alterna son suavemente magnéticos, con permeabilidad alta y poco corrosivos [16]. Se compone de un generador Hall en el centro de un núcleo magnético, una bobina alrededor del núcleo y un amplificador de corriente. El conductor portador de corriente produce un campo magnético que es proporcional a la corriente. Tal campo es concentrado por el núcleo magnético y es percibido por el generador Hall, el cual está conectado a la entrada del amplificador de corriente que maneja la bobina. La corriente en la bobina produce un campo en oposición debido a la corriente en la

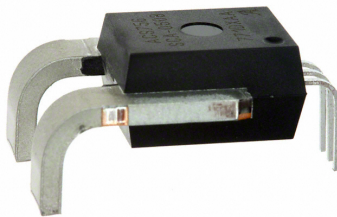
apertura. La salida del sensor es proporcional tanto a la corriente de apertura y al número de vueltas de la bobina. Tal señal es convertida a voltaje al conectar una resistencia entre la salida del sensor y GND. Tales sensores proveen un aislamiento eléctrico, son de respuesta rápida y casi no varía debido a variaciones de temperatura. Su salida de corriente es prácticamente inmune a ruido [17]. Véase la figura 2.2 (e). Tales sensores son más costosos que los de lazo abierto, pero más precisos. Comercialmente se encuentran para medir corrientes altas. Se puede realizar un diseño de tal sensor para corrientes más chicas, como las que se manejarán en el satélite.

2.3.3.7. Bobinas Rogowski

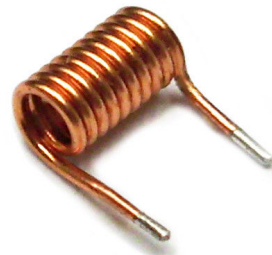
Son bobinas enrolladas sobre un núcleo no magnético que rodean un conductor. La bobina consiste en muchos lazos inductivos perpendiculares al campo magnético. Las ventajas de tales bobinas es que campos extraños son cancelados alrededor de la integral de lazo cerrado y su señal es más alta la de una bobina simple [16]. Véase la figura 2.2 (f). De uso para aplicaciones AC, no serán prácticas para el SMPF, además, las bobinas Rogowski no son muy comerciales.



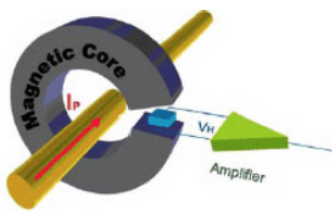
(a) Shunt



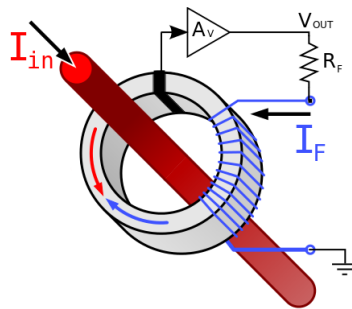
(b) Efecto Hall



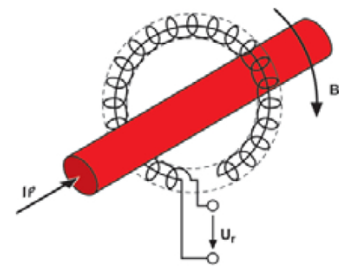
(c) Bobina



(d) Lazo abierto



(e) Lazo cerrado



(f) Bobina Rogowski

Figura 2.2: Sensores de corriente

2.3.4. Temperatura

En los sistemas espaciales es muy necesario medir la temperatura de los diversos componentes, ya que no todos pueden tolerar las condiciones térmicas agresivas del espacio. Muchos componentes tienen un rango de temperatura de operación definido y si éste límite es superado puede dañar o destruir el componente. Los sensores de temperatura permiten monitorear la temperatura de tales componentes y tal información permite tomar las acciones necesarias para poder cuidar de tales componentes al activar mecanismos para control térmico. Para la misión AEMB-F1, medir la temperatura va a ser una cuestión primordial ya que se busca hacer un análisis térmico de la estructura y de algunos de los componentes del sistema.

Tomar la temperatura esencialmente requiere la transmisión de una pequeña porción de la energía térmica del objeto al sensor (sonda), cuya función es convertir esa energía a una señal eléctrica. Cuando un sensor es puesto dentro o encima de un objeto, se lleva a cabo conducción de calor por medio de la interface entre el objeto y la sonda. El elemento sensor en la sonda se calienta o se enfría; esto es, hace un intercambio de calor con el objeto. Cualquier sensor, sin importar que tan pequeño sea, perturbará el sitio de medición y causará un error en la medición de la temperatura. Así, la tarea será minimizar el error por medio de un diseño de sensor apropiado y una técnica de medición adecuada[15]. Un sensor de temperatura de contacto tiene tres componentes principales:

Un elemento sensor: un material que responda al cambio de su propia temperatura. Este elemento deberá tener un calor específico bajo, masa pequeña, alta conductividad térmica y una sensibilidad a la temperatura fuerte y predecible.

Los contactos: son alambres que sirven de interfaz entre el elemento sensor y el circuito electrónico externo. Este material deberá tener la menor conductividad térmica posible así como la menor resistencia eléctrica.

El sobre protector: puede ser una vaina o cubrimiento que separa físicamente el elemento sensor del ambiente. Deberá tener una resistencia térmica baja y alta capacidad de aislamiento eléctrico. También deberá ser impermeable. Existen diversos tipos de sensores de temperatura.

2.3.4.1. Resistencias Detectoras de Temperatura (RTD)

Normalmente utilizado para sensores metálicos fabricados en forma de alambre o cinta delgada. La dependencia a la temperatura de la resistividad de todos los metales y la mayoría de las aleaciones da la oportunidad de utilizarlas para el sentido de temperatura. El metal más utilizado es el platino por su respuesta predecible, estabilidad a largo plazo y durabilidad. Puede medir temperaturas entre -200 y $500^{\circ}C$, su respuesta tarda algunos segundos pero son muy precisos. Véase la figura 2.3 (a). Por su rango de operación, su estabilidad y precisión serían muy útiles para medir temperatura en el espacio.

2.3.4.2. Resistivos de Silicio

Las propiedades conductivas del silicio han sido satisfactoriamente implementadas para la fabricación de sensores de temperatura con características de un coeficiente de temperatura positivo (PTC). Actualmente, los sensores resistivos de silicio son incorporados en estructuras micro-maquinadas para compensación de temperatura o medición de temperatura directa. También hay sensores de silicio discretos. Estos sensores tienen una linealidad bastante buena y estabilidad a largo plazo. Véase la figura 2.3 (b).

2.3.4.3. Termistores

Originario de la unión de las palabras térmico y resistor, este nombre es usualmente aplicado a sensores de óxido de metal fabricados en las formas de gotas, barras, cilindros, hojuelas rectangulares y cintas gruesas. Pertenece a la clase de sensores de temperatura absoluta, se dividen en dos grupos los de coeficiente de temperatura negativa (NTC) y PTC. Para mediciones de temperatura precisas solamente son útiles los termistores NTC. En los de NTC, se reduce la resistencia con el aumento de temperatura. La resistencia del termistor dependerá de las dimensiones físicas del material y la resistividad del material. La relación entre la resistencia y la temperatura del termistor es altamente no lineal por lo que su precisión no es alta y requiere ser calibrado para el rango de temperatura correspondiente. Hay modelos calificados para el ambiente espacial. Véase la figura 2.3 (c).

2.3.4.4. Termopar

También conocidos como sensores termoelectricos de contacto. Para hacer estos sensores se necesitan al menos dos conductores distintos y dos uniones (pares). EL termopar es un sensor pasivo, genera un voltaje en respuesta a la temperatura y no requiere ninguna fuente de excitación externa. Este tipo de sensor pertenece a la clase relativa de sensores porque el voltaje generado depende de una diferencia de temperaturas dos uniones de termopar. Para medir la temperatura con un termopar, a unión servirá de referencia y su temperatura absoluta deberá ser medida por otro sensor o puesta encima de un material que está en un estado de referencia de temperatura conocida. Han sido muy utilizados para misiones espaciales; para algunas aplicaciones van siendo reemplazados por RTDs. Véase la figura 2.3 (d).

2.3.4.5. Semiconductores de unión P-N

La unión P-N de un semiconductor en un diodo o en un transistor bipolar exhibe una fuerte dependencia térmica. Si la unión polarizada en directa es conectada a un generador de corriente constante, el voltaje se vuelve una medida de la temperatura de la unión. Este tipo de sensor tiene una salida altamente lineal. Esto permite un método sencillo de calibración utilizando dos puntos para determinar la pendiente y una intercepción.



Figura 2.3: Sensores de temperatura

2.3.5. Presión

La materia puede ser clasificada en sólidos y fluidos. La palabra fluido describe a algo que puede fluir, esto incluye a líquidos y gases, no existe una distinción definida entre estos dos. Al variar la presión es posible un líquido a gas y viceversa. Cualquier fuerza aplicada a un fluido es tangencial a la presión ejercida en los límites es normal a la superficie. Para un fluido en reposo, la presión puede ser definida como la fuerza F ejercida perpendicularmente sobre el área A de una superficie límite: $p = dF/dA$. La presión no es afectada por la forma de los límites, así, una gran variedad de sensores de presión pueden ser diseñados sin importar el tamaño ni la forma. Si presión es aplicada a uno de los lados de la superficie que confina un fluido, la presión es transferida toda la superficie sin disminuir su valor [15].

La medición de presión es un requerimiento muy común para la mayoría de los sistemas de control para procesos industriales y otros sistemas de medición de presión disponibles. Pero es importante considerar algunos de los términos utilizados para diferenciar entre diferentes tipos de medición de presión. Existen tres tipos principales de medición de presión[18]:

Presión absoluta: es la diferencia entre la presión de un fluido y el cero absoluto de la presión (vacío).

Presión gauge: describe la diferencia entre la presión de un fluido y la presión

atmosférica. (Se puede decir que La presión absoluta es equivalente a la suma de la presión gauge con la presión atmosférica. La presión gauge varía conforme varía la presión atmosférica.)

Presión diferencial: es un término utilizado para describir la diferencia entre dos valores de presión absoluta.

En la mayoría de las aplicaciones, se considera un rango de medición común de 1.013 bar (presión promedio de la atmosfera) hasta 7000 bar. Pero, ¿exactamente qué significa eso? En el sistema internacional de medidas la unidad de presión oficial es el pascal, el cual equivale a 1 Newton de fuerza distribuido uniformemente sobre un metro cuadrado de superficie. También, en sistemas técnicos se utiliza atmosfera, abreviada como atm. Una atmosfera es la presión ejercida sobre un centímetro cuadrado debido a una columna de agua que tiene 1 metro de altura a una temperatura de $+4^{\circ}C$ a una aceleración gravitacional normal. Se puede convertir fácilmente entre unidades con las expresiones 2.1 y 2.2:

$$1Pa = 1.45 \times 10^{-4}lb/in^2 = 9.869 \times 10^{-6}atm = 7.5 \times 10^{-4}cmHg \quad (2.1)$$

En el Sistema Inglés la unidad de presión se define como la presión como una libra por pulgada cuadrada (lb/sq in) o psi y su equivalente al SI es:

$$1psi = 6.89 \times 10^3Pa = 0.0703atm \quad (2.2)$$

El principio de operación de un sensor de presión es basado en la conversión de un resultado de la aplicación de presión sobre un elemento sensible a una señal eléctrica. En prácticamente todos los casos, la presión es un resultado de un desplazamiento o una deformación de un elemento que tiene un área definida. Así, la medición de la presión se reduce a la medida de un desplazamiento o fuerza resultante de un desplazamiento. Existen diversos instrumentos para medir la presión, se presentarán algunas de sus características para después compararlos y determinar cuál es el adecuado para el sistema.

2.3.5.1. A base de Mercurio

Su uso principal es para medir presión de gas. Se sumerge un alambre en forma de U dentro del mercurio que disminuye su resistencia en proporción a la altura de mercurio de cada columna del tubo en forma de U. Las resistencias son conectadas a un puente Wheatstone, el cual permanece en equilibrio siempre y cuando la presión diferencial en el tubo es cero. La presión es aplicada a uno de los brazos del tubo y saca de equilibrio el puente que resulta en la señal de salida. Entre más alta sea la presión del tubo izquierdo será más alta la resistencia de ese tubo y más baja la resistencia del tubo opuesto. El sensor puede ser calibrado. Este sensor tiene algunas desventajas, necesita nivelación precisa, es susceptible a impactos y vibración, es de

tamaño grande y contamina por los gases del mercurio [15]. Es claro que este tipo de sensor no es práctico para una misión espacial por depender de la gravedad. Véase la figura (b).

2.3.5.2. Piezo-resistivos

Para hacer un sensor de presión se necesitan dos componentes esenciales, el primero, es el plato o membrana que tiene un área conocida; el segundo, un detector que responde a la fuerza aplicada. Ambos componentes son fabricados de silicio. Un sensor de presión de diafragma de silicio consta de un diafragma de silicio delgado como material elástico y una resistencia gauge piezo-resistiva hecha de impurezas difusas en el diafragma. Debido a las propiedades elásticas del silicio, casi no se generan errores por histéresis a pesar de las fuertes fuerzas que se le aplican. Se acostumbra fabricar resistencias de strain gauge conectadas como puente de Wheatstone. La salida de tal circuito llega a ser de hasta varios cientos de mili-volts por lo que se requiere un acondicionador de señal para poder dar una salida en formato aceptable. Además, las resistencias de silicio son altamente sensibles a los cambios de temperatura, por lo que un circuito externo deberá incluir compensación de temperatura. Ver figura (c).

Otro método para la detección de presión utiliza el elemento piezo-resistivo como medidor de tensión. Este elemento piezo-resistivo es implantado mediante iones sobre un diafragma de silicio grueso. Una corriente de excitación es pasada longitudinalmente a través de las terminales 1 y 3 del resistor y la presión que se ejerce sobre el diafragma es aplicada en ángulo recto al flujo de la corriente. La tensión establece un campo eléctrico transversal en el resistor que es detectado como voltaje en las terminales 2 y 4 del elemento. Se puede ver esto como la analogía mecánica de un dispositivo de efecto hall. Al utilizar un solo elemento, se elimina la necesidad de emparar cercanamente los cuatro resistores sensibles a la temperatura y a la tensión que forman el puente Wheatstone, esto simplifica los circuitos adicionales necesarios para compensar temperatura y lograr una calibración adecuada. Tal tecnología es útil para muchas aplicaciones, el elemento es sencillo de utilizar y es bastante estable. Como en la misión AEMB-F1 se va a medir presión atmosférica bajo cambios de temperatura, tal sensor es una propuesta atractiva.

2.3.5.3. Capacitivos

Los sensores de presión capacitivos también están basados en el desplazamiento de un diafragma, el cual al desplazarse modula la capacitancia con respecto a un plato de referencia. Son muy efectivos estos sensores para presiones bajas. El sensor puede ser fabricado a partir de un pedazo de silicio sólido. Uno de estos sensores, por su fabricación, puede soportar hasta mil veces su escala completa, esto es útil ya que son utilizados para presiones bajas y de pronto pueden ocurrir presiones de valor mucho más alto que el de la escala completa del sensor [15]. También parecen una tecnología atractiva para la misión AEMB-F1 ya que se presentará un ambiente de muy baja presión y después, al caer a la Tierra, se habrá un rápido aumento de presión; sin embargo tales sensores no son muy comerciales.

2.3.5.4. Tubos de Bourdón

Un tubo de Bourdón también es un transductor de tipo elástico, es barato y se utiliza para medir la presión de fluidos líquidos o gaseosos. Es formado por un tubo de metal flexible con una pieza especial con forma ovalada, el cual está fijo en un extremo y libre de moverse en el otro. Cuando se aplica presión en el extremo fijo y abierto la sección transversal ovalada se vuelve más circular y en consecuencia, hay un desplazamiento en el extremo libre del tubo. Este desplazamiento es medido por algún transductor de desplazamiento. Se utilizan tubos en forma de C, en espiral y helicoidales. Al fabricar los tubos se calibran con aire, si se utiliza para medir la presión ejercida por algún otro fluido podrá producir errores de hasta 6%. Se deberá re-calibrar el tubo si se utiliza con algún otro fluido que no sea aire [18]. Por utilizar fluidos, y dado a que la misión va a estar bajo fuertes fuerzas de aceleración, no es conveniente utilizar este tipo de sensores.

2.3.5.5. Manómetro

El manómetro es un instrumento pasivo que da una indicación visual del valor de alguna presión. El manómetro con tubo-U es el más común. Al aplicarle presión se causa un desplazamiento de un líquido dentro del tubo con forma de U y la lectura de tal medición es hecha al observar la diferencia de altura del líquido en las dos mitades del tubo. La lectura de un manómetro está sujeta a errores ya que es difícil discernir exactamente en dónde están los niveles minúsculos de líquido. Se utilizan para medir valores de hasta 2 bar. Por lo general la interpretación de tales instrumentos es visual, no produce una señal de salida, esto limita la capacidad de procesar digitalmente la lectura, además también utilizan fluidos para funcionar. Véase la figura (a).

2.3.5.6. Dispositivos de alambre resonante

En tal dispositivo, se estira un alambre a través de una cámara que contiene un fluido a una presión conocida sujeto a un campo magnético. El alambre resuena a su frecuencia natural de acuerdo a su tensión, la cual varía con la presión. Así, la presión es calculada al medir la frecuencia de vibración del alambre. Tal medición es llevada a cabo por medio de la electrónica integrada en el dispositivo. Tal dispositivo es de muy alta precisión con $\pm 2\%$ de la escala completa, es poco sensible a las condiciones ambientales y puede medir presiones desde 5 mbar a 2 bar [18]. Tal sensor no es muy comercial.

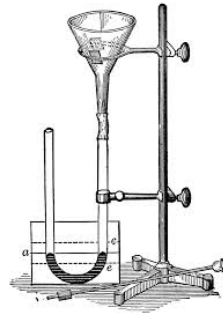
Escoger un instrumento para medir presión dependerá gravemente en que aplicación se va a utilizar.

2.3.6. Posición y desplazamiento

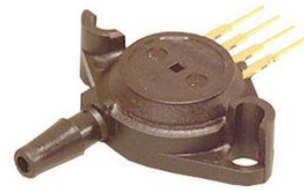
La medición de posición y desplazamiento de objetos físicos es esencial para muchas aplicaciones como: realimentación de procesos para control, evaluación de rendimiento, control de tráfico de transportación, robótica, sistemas de seguridad, entre



(a) Manómetro



(b) Mercurio



(c) Piezo-resistivo

Figura 2.4: Sensores de presión

otros. En un sistema espacial puede servir, por ejemplo, para determinar si los paneles solares se han desplazado y están en la posición correcta o para saber si las antenas están en la posición adecuada. La posición se refiere a las coordenadas de un objeto con respecto a cierta referencia. El desplazamiento se refiere al moverse de una posición a otra para una distancia o ángulo específico, la referencia será la posición anterior del objeto. También podemos incluir el concepto de proximidad, similar a la posición indica la distancia de un objeto a partir de cierto punto de referencia. Hay que considerar varios criterios para seleccionar un sensor de posición o de desplazamiento. Por ejemplo: ¿Qué tan grande será el desplazamiento? ¿Qué precisión requiere la medida? ¿De qué material está hecho el objeto a medir? ¿Qué tanto desgaste físico tendrá el sensor? Entre otras consideraciones [15].

2.3.6.1. Potenciómetro

Un transductor de posición o de desplazamiento puede ser hecho a partir de un potenciómetro lineal o rotatorio. Si la posición de un objeto controla la longitud del alambre que determina el valor de la resistencia, se puede hacer un sensor de desplazamiento al proveerle una señal de excitación. Se realiza la medición al determinar la caída de voltaje en la resistencia. EL voltaje presente en la resistencia es proporcional al desplazamiento realizado por el objeto. Para que este tipo de sensor sirva, el voltaje de referencia deberá ser muy estable ya que si varía es una fuerte fuente de error [15]. Si se cuenta con una fuente de voltaje estable a bordo del sistema espacial, es una buena opción para medir desplazamiento en ambiente espacial debido a la tolerancia de temperatura del material.

2.3.6.2. De gravitación

El elemento principal del transductor es un flotador, un dispositivo cuya densidad es menor que la del agua. Normalmente es adherido a una válvula para mantenerla abierta o cerrada dependiendo de cuanta agua contiene el tanque. Es obvio que este tipo de sensor no puede funcionar en la ausencia de gravedad (en una estación espacial,

por ejemplo) y es susceptible a los movimientos de la superficie del agua. Al depender de la gravedad no es útil para sistemas espaciales. Véase la figura (a).

2.3.6.3. Capacitivo

Se utilizan como los bloques principales de otros sensores (fuerza, presión, temperatura, etc.). Su habilidad de poder detectar casi cualquier material los hace una opción atractiva. El principio de operación de un medidor de capacitancia está basado en el poder cambiar la geometría (por ejemplo, distancia entre placas capacitivas) o variaciones de capacitancia en la presencia de materiales conductores o dieléctricos. Al cambiar la capacitancia, se puede convertir en una señal eléctrica variable. También estos sensores pueden ser mono-polos (un solo capacitor) o diferenciales (utilizando dos capacitores), también se puede utilizar un puente capacitivo (cuatro capacitores). Al ser más de un capacitor, uno o dos capacitores pueden ser fijos o variables con fase opuesta.

2.3.6.4. Magnéticos e Inductivos

Una de las ventajas de utilizar campos magnéticos para detectar posición o distancia es que cualquier material no-magnético puede ser penetrado por el campo sin pérdida de precisión de posición. Al no ser afectados el campo por la naturaleza del material, se pueden utilizar materiales inertes que no sean afectados por las condiciones severas o corrosivas. Hay diversas tecnologías a partir de este principio [15]. Véase la figura (d).

2.3.6.5. LVDT y RVDT

Posición y desplazamiento pueden ser detectados por métodos de inducción electromagnética. El acoplamiento de flujo magnético entre dos bobinas puede ser alterado por el movimiento de un objeto y después convertido en un voltaje. Sensores inductivos que utilizan un medio ferro-magnético no magnetizado para alterar la reluctancia (resistencia magnética) del camino del flujo son transductores de reluctancia variable. El arreglo básico de un transductor de inducción múltiple contiene dos bobinas: primaria y secundaria. La primaria lleva la señal de excitación que induce un voltaje ac estable en la bobina secundaria. La amplitud inducida dependerá del acoplamiento de flujo entre bobinas. Hay dos maneras de cambiar el acoplamiento. Uno es al mover un objeto de material ferro-magnético dentro del camino de flujo (LVDT – Transformador Lineal Diferencial Variable y RVDT – Transformador Diferencial Rotatorio Variable). El otro método es mover físicamente una bobina con respecto a la otra.

El LVDT es un transformador con un núcleo mecánicamente activado. En la bobina primaria existe una onda sinusoidal con amplitud estable. Una señal ac es inducida en los núcleos secundarios, los núcleos secundarios están conectados con fase opuesta. Cuando el núcleo está posicionado en el centro magnético del transformador, las salidas de las bobinas secundarias es cancelada y no hay voltaje de salida. Al mover el núcleo se desequilibra el flujo magnético entre las bobinas secundarias generando una salida. En estado estable la amplitud del voltaje inducido es proporcional al

desplazamiento del núcleo y así se puede medir el voltaje para determinar el desplazamiento. EL LVDT provee dirección y magnitud del desplazamiento. Véase la figura (f). El RVDT funciona bajo el mismo principio excepto que se utiliza un núcleo ferro-magnético rotatorio. Tales sensores figuran una buena opción para aplicaciones espaciales si se busca medir una distancia corta, la distancia que miden es limitada.

2.3.6.6. Transverso Inductivo

Es útil para medir desplazamientos relativamente pequeños de materiales ferro-magnéticos, se utiliza para medir la distancia a un objeto que altera el campo magnético de una bobina. La inductancia de la bobina es medida por un circuito electrónico externo. El principio de auto-inducción es el principio de operación de tal transductor. La ventaja de este tipo de sensor es que el único contacto con el objeto es a través de un campo magnético, su limitante es que es útil únicamente para materiales ferro-magnéticos a distancias relativamente cortas.



Figura 2.5: Sensores de posición y desplazamiento

2.3.7. Aceleración

La aceleración es una característica dinámica de un objeto debido a que requiere la aplicación de una fuerza. El único dispositivo capaz de medir aceleración es el acelerómetro. Los acelerómetros tienen una respuesta en frecuencia entre cero y un

valor alto y su salida puede ser utilizada para dar mediciones de velocidad y desplazamiento. Se utilizan para mediciones de movimiento en general y para medir choques y vibraciones mecánicas. Un acelerómetro requiere de un componente especial cuyo movimiento se retrasa con respecto a su encapsulado, adherido al objeto en estudio. Se puede utilizar un transductor de desplazamiento para generar una señal eléctrica como función de la aceleración. A tal componente se le llama masa inercial. La meta del dispositivo es la detección del desplazamiento de masa con respecto al encapsulado. Existen diversos acelerómetros a base de distintas tecnologías [15, 18].

Debido a que en la misión AEMB-F1 se busca registrar la información con respecto a los parámetros físicos que afectan al sistema, es importante conocer que fuerzas de aceleración van a estar actuando sobre el sistema durante el manejo, lanzamiento, vuelo, y caída. Los sistemas espaciales también utilizan los acelerómetros para el sistema de control y estabilización del aparato espacial.

2.3.7.1. Capacitivo

Contiene al menos dos componentes: el primero es una placa estacionaria (adherida al encapsulado) y el segundo una placa adherida a la masa inercial que tiene libertad de movimiento dentro del encapsulado. Tales placas forman un capacitor cuyo valor es una función de la distancia entre placas. Tal distancia raramente sobrepasa los 20 μm . Usualmente se le agrega un capacitor adicional, de similar valor y está sujeto a cambios con un desplazamiento de fase de 180° . Entonces la aceleración puede ser representada por la diferencia entre los valores de los dos capacitores. Se puede observar la estructura interna del sensor capacitivo en la figura 2.6 y su presentación comercial en la figura 2.10 (c).

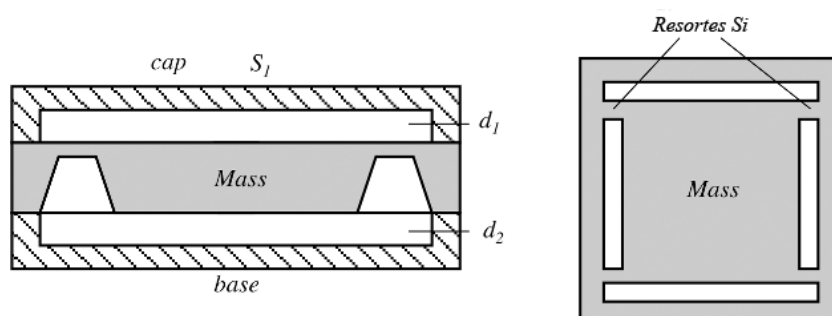


Figura 2.6: Acelerómetro Capacitivo[15]

2.3.7.2. Piezoresistivo

Tal sensor incluye galgas que miden tensión en resortes que soportan una masa. La tensión puede ser correlacionada con la magnitud y tasa de desplazamiento, por lo tanto, una aceleración. Detectan frecuencias desde DC hasta 13 kHz, pueden soportar hasta 10,000 g con un diseño apropiado. Sin embargo, tienen coeficientes de temperatura de salida indeseables debido a su método de fabricación. Al ser microfabricados en obleas de silicio tal problema es prácticamente eliminado. Cuando se

aplica aceleración el eje sensible, gira la masa inercial alrededor de la bisagra, los medidores alrededor de la visagra permiten el giro de la masa generando compresión en un medidor y tensión en el otro generando grandes cambios en valor resistivo. Véase la figura 2.10 (b).

2.3.7.3. Piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico tiene una aplicación natural de sensar vibración y aceleración. Es la conversión directa de energía mecánica a energía eléctrica en un material cristalino compuesto de varios dipolos eléctricos. En su límite inferior, operan desde los 2 Hz y hasta 5 kHz en su límite superior. Son altamente lineales y toleran temperaturas hasta los 120°C. El cristal (normalmente un material cerámico) y la masa inercial que ejerce una fuerza proporcional a la aceleración son apretados dentro del empaque. Véase la figura 2.10 (a).

2.3.7.4. Efecto Hall

Para la medición de desplazamiento y posición, un sensor de efecto Hall necesita que se le provea una fuente de campo magnético y un circuito electrónico. El campo magnético tiene dos características importantes para tal aplicación: la densidad de flujo y la polaridad u orientación. La señal de salida es una función de la densidad de flujo, tal señal es bi-nivel. Cuando el flujo de campo magnético excede cierto umbral se provoca una transición de de estado apagado a estado encendido. Estos sensores tienen cierta histéresis, la cual elimina oscilaciones desactivando la acción después de que el nivel de umbral ha sido pasado. Tales sensores son fabricados como circuitos integrados de silicio monolítico encapsulados en paquetes epóxicos o cerámicos pequeños [15].



Figura 2.7: Acelerómetros

2.3.8. Humedad

Se va a monitorear humedad en la misión AEMB-F1 debido a las condiciones atmosféricas. Se utilizará como un medio indirecto para determinar la humedad y

como medio para correlacionar cortos circuitos (en el caso de que suceda alguno) debido a la humedad en el ambiente. No hay una aplicación específica para estos sensores a bordo de un sistema espacial debido a la ausencia de agua.

La cantidad de agua en el aire contribuye fuertemente al bienestar de los seres humanos y animales. El nivel de confort es determinado gracias a la combinación de dos factores: la humedad relativa y la temperatura ambiental. Podrás estar mucho más cómodo a -30°C si la humedad es mínima que si hay una cantidad substancial de humedad y la temperatura ambiental es de 0°C [15].

Los instrumentos de medición de humedad utilizan ciertos términos de acuerdo a qué tipo de medición pueden realizar. En general hay dos maneras de expresar la humedad medida la primera, la humedad absoluta es la densidad del componente de vapor de agua, es decir, es la masa de vapor de agua por unidad de volumen de gas húmedo ($dW = m/v$). Se expresa en gramos por metro cúbico y es una función de la presión atmosférica. No es muy utilizada en ingeniería. El segundo término es la humedad relativa que se refiere a la proporción de la presión del vapor del aire a cualquier temperatura con respecto a la saturación máxima de presión del vapor a la misma temperatura. Es definida como: $H = 100 (PW/PS)$, donde PW es la presión parcial del vapor de agua y PS es la presión del vapor de agua saturado a dada temperatura. H representa el contenido de vapor como un porcentaje de la concentración necesaria para provocar la saturación de vapor, o bien, que se formen gotas de agua o rocío. Ahora comparemos algunas de las tecnologías existentes para la medición de la humedad.

2.3.8.1. Sensores Capacitivos

Un capacitor lleno de aire puede servir como un sensor de humedad relativa dado a que la humedad en la atmósfera cambia la permitividad eléctrica del aire. En lugar de aire, el espacio entre las placas puede ser llenado con un aislante apropiado cuya constante dieléctrica cambia significativamente al estar sujeta a la humedad. Se puede alcanzar una precisión de 2% dentro de un rango de 5% – 90% de humedad relativa con los sensores capacitivos. Algunas versiones comerciales convierten el valor capacitivo a un voltaje, ésta es una considerable ventaja. Véase la figura 2.8 (a).

2.3.8.2. Sensores de conductividad eléctrica

La resistividad de muchos conductores no-metálicos depende grandemente de su contenido de agua. Este fenómeno es la base del sensor de humedad resistivo. El sensor contiene un material de relativamente baja resistividad que cambia significativamente bajo las condiciones variantes de humedad. El material es depositado encima de dos electrodos para proveer un área de contacto grande. Cuando las moléculas de agua son absorbidas por la capa superior, la resistividad entre los electrodos cambia y puede ser medida mediante por medio de un circuito eléctrico. Se utilizan materiales como los poli-electrolitos dado a que su conductividad varía con la humedad. También se puede fabricar un sensor de humedad de estado-sólido a partir de sustrato de silicio. El silicio debe ser de alta conductancia, lo cual provee un camino del vacío del electrodo

de aluminio depositado en la superficie. Se forma una capa de óxido encima de la capa de aluminio conductora. La capa de aluminio es anodizada de tal manera que forma una superficie de óxido poroso. La dimensión de la sección transversal media de los poros es suficiente para permitir la penetración de moléculas de agua. La cantidad de absorción es proporcional a la presión parcial del vapor de agua e inversamente proporcional a la temperatura absoluta [15].

2.3.8.3. Sensor de conductividad térmica

Al utilizar la conductividad térmica del gas se puede medir la humedad por medio de un sensor basado en termistores. Dos minúsculos termistores están sujetos por alambres muy delgados para minimizar la pérdida de conductividad térmica hacia el encapsulado. El primer termistor es expuesto al gas externo por medio de hoyos de ventilación y el segundo termistor está herméticamente sellado en aire seco. Ambos termistores están conectados a un circuito puente, polarizado por algún voltaje. Los termistores generan auto-calentamiento dado al paso de corriente eléctrica. Su temperatura puede subir a 170°C sobre la temperatura ambiente. Inicialmente el puente es balanceado en aire seco para establecer un punto de referencia cero. La salida del sensor incrementará gradualmente al aumentar la humedad relativa desde cero, después llega a un punto de saturación y disminuirá con un cambio de polaridad. Véase la figura 2.8 (b).

2.3.8.4. Higrómetro óptico

Dado al problema de histéresis que presentan la mayoría de los sensores de humedad, el método más eficiente de calcular humedad relativa o absoluta es por medio de la temperatura del punto de rocío. El punto de rocío es la temperatura a la cual las fases líquida y gaseosa del agua (o de cualquier fluido) están en equilibrio. Así, la humedad relativa puede ser medida a partir de esta temperatura siempre y cuando se conozca la presión. La desventaja de un sistema de este tipo es su incremento en costo. La idea detrás de este dispositivo es el uso de un espejo cuya superficie es regulada térmicamente al umbral de la formación de rocío. Una muestra de aire es pasado encima de la superficie del espejo y si la temperatura del espejo cruza el punto de rocío, libera humedad en forma de gotas de agua. Las propiedades reflexivas del espejo cambian con la condensación del agua ya que las gotas esparcen los rayos de luz. Esto puede ser detectado por un fotodetector apropiado. Tal sistema no es muy comercial.

2.3.9. Flujo

Éste es el primer parámetro adicional incluido para ilustrar el alcance de los sistemas de adquisición de datos. El uso de estos sensores en una aplicación espacial es muy poco probable, pero quizá pueda ser utilizada para controlar algún fluido utilizado en algún sistema de control térmico.

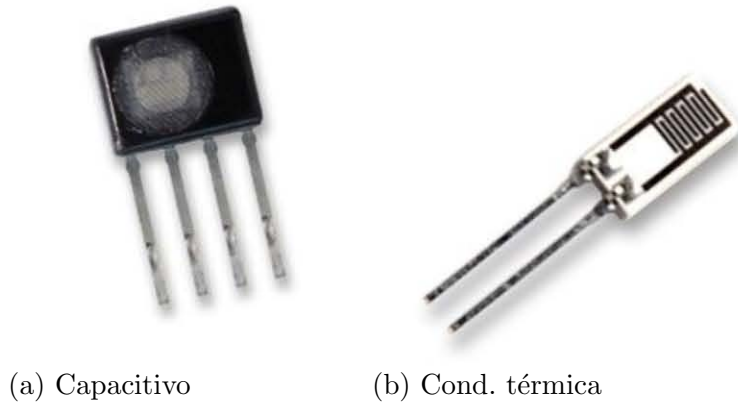


Figura 2.8: Sensores de humedad

Una de las leyes fundamentales de la física es que la masa es una cantidad conservada. No puede ser creada ni destruida, si no se escapa o se agrega masa, su cantidad permanecerá igual a pesar de las barreras. Sin embargo, si existe flujo de entrada o flujo de salida de masa en la barrera, la suma de flujo entrante y saliente es igual a cero. Toda masa que entre, deberá salir. Con un flujo constante, la velocidad es constante un punto dado en el tiempo. Al medir la velocidad por medio de un sensor cuyas dimensiones son mucho más chicas que las del tubo, se deberá considerar la posibilidad de detección errónea de velocidad muy alta o muy baja, mientras que la promedio esta en algún lugar entre estos dos. A esta velocidad promedio se le llama taza de flujo y en el SI se mide en metros cúbicos por segundo. Para determinar la taza de flujo es necesario conocer la sección transversal del área del tubo. Hay una gran variedad de sensores que pueden medir la velocidad de flujo por medio la taza de desplazamiento de masa o volumen. No es una tarea sencilla, es necesario considerar el medio, la forma de las pipas y el material de las pipas. A continuación algunas técnicas utilizadas para medir la velocidad de flujo [15].

2.3.9.1. Técnica de gradiente de presión

Esta técnica requiere de la introducción de una resistencia al flujo. Al medir el gradiente de presión entre una resistencia conocida es posible calcular la taza de flujo. Es una analogía a la ley de Ohm. El material resistivo puede ser: tapones porosos, orificios o tubos de Venturi. Esto lleva a que haya un material poroso o que el canal se haga más angosto. Un sensor de presión diferencial se pone entre los dos extremos de la resistencia. Cuando la masa en movimiento entra al área de mayor resistencia, su velocidad incrementa en relación al incremento de la resistencia. Se deberá llevar a cabo calibración con un fluido específico en un rango de temperatura de operación completo. Para obtener una salida lineal es necesario calcular la raíz cuadrada lo cual deberá ser hecho por un microprocesador [15].

2.3.9.2. Sensores ultrasónicos

El flujo puede ser medido mediante ondas ultrasónicas. El medio en flujo causa una variación en la frecuencia o en la fase de la señal emitida, detectar esta variación es el principio de medición. Un método es por medio del efecto Doppler y el otro depende de la detección del incremento o reducción de la velocidad del sonido en el medio. Una onda de sonido viajando en contra flujo tendrá una velocidad efectiva más pequeña y una onda viajando en el sentido del flujo tendrá una velocidad efectiva más alta. Dado a que la diferencia entre las dos velocidades es exactamente dos veces la velocidad del medio esto nos permite determinar la velocidad del flujo. Se utilizan cristales piezo-eléctricos que pueden actuar tanto como generadores y receptores de señales ultrasónicas. Para mediciones de tipo Doppler, se pueden utilizar ondas ultrasónicas continuas. Tal como en un receptor de radio Doppler, tanto frecuencias transmitidas como recibidas son mezclados en un circuito no lineal. La señal es filtrada por un filtro paso-banda seleccionando las armónicas diferenciales. La frecuencia diferencial es directamente proporcional a la velocidad del flujo. La ventaja de esta técnica es que se puede medir el flujo sin tener contacto con el fluido [15]. Véase la figura 2.9 (c).

2.3.9.3. Fuerza de arrastre

Es una técnica práctica cuando el movimiento del fluido es esporádico, turbulento y multidireccional. En el sensor de flujo, un objeto sólido conocido como elemento de arrastre u objetivo está expuesto al flujo del fluido. La fuerza ejercida por el fluido sobre el elemento de arrastre es medida y convertida a un valor de velocidad del flujo. Tal sensor puede medir el flujo en dos y hasta tres direcciones así como la velocidad del flujo. La operación del sensor está basada en la medición del esfuerzo que deforma una viga de hule elástico, aunque el elemento ideal es un disco plano para que el coeficiente de arrastre sea independiente de la tasa de flujo. La medición del esfuerzo ejercido puede ser medida con medidores de tensión que deberán estar físicamente protegidos de la interacción con los fluidos en movimiento [15]. Véase la figura 2.9 (b).

2.3.9.4. Rotores de Efecto Hall

Al pasar un líquido a través del cuerpo rígido, el rotor magnético gira a una tasa proporcional al flujo. Esto causa una serie de campos magnéticos que excitan el sensor de efecto hall, produciendo una serie de pulsos de voltaje. La amplitud de los pulsos es igual al nivel de voltaje con la cual es polarizado el sensor y su frecuencia será proporcional a la tasa de flujo [19]. Véase la figura 2.9 (a).

A partir de un sondeo de mercado se observó que los sensores de flujo son costosos, implementar este tipo de sensor deberá ser considerado bajo la aplicación que se le va a dar para poder ser justificado. Es poco común que se suban fluidos a un satélite, en tales casos es un gas y se utiliza la medición de presión para monitorearlo. No es necesario implementar un sensor de flujo en un satélite. Todos los sensores cotizados tienen una precisión buena y miden intervalos similares.

Los sensores ultrasónicos pueden medir la mínima variación de flujo, mientras que los demás requieren un flujo ya elevado para poder comenzar a medir; pero la velocidad máxima que miden es reducida comparada con los demás sensores. El sensor de fuerza de arrastre es impráctico ya que necesita que alguien lo monitoree. Dado a que el sistema estará en un lugar remoto, no se puede utilizar este sensor.

Los sensores a base de un rotor son prácticos para acoplar a la tubería de un sistema y su rango de medición es amplio. Pueden generar una señal digital o analógica. Utilizar un sensor que genere una señal digital es ventajoso ya que no requerirá de acondicionamiento.



Figura 2.9: Sensores de flujo

2.3.10. Sensores Ópticos

La ventaja de los sensores de tecnología óptica es su simplicidad, la ausencia del efecto de carga y relativamente largas distancias de operación. No son afectados por campos magnéticos o interferencias electroestáticas que los hace adecuados para aplicaciones sensibles. Por lo general se requiere de tres elementos para un sensor óptico de posición: una fuente de luz, un foto-detector y una guía de luz (lentes, espejos, fibra óptica, etc.) [15].

2.3.10.1. Puente óptico

Un foto-detector de cuatro cuadrantes consiste en cuatro detectores de luz conectados en circuito puente. El objeto deberá tener contraste óptico de fondo. Las partes opuestas del detector son conectadas a las entradas correspondientes de los amplificadores diferenciales. Cada amplificador produce una señal de salida proporcional al desplazamiento de la imagen del centro óptico del sensor a lo largo del eje correspondiente. Cuando la imagen está perfectamente centrada, ambos amplificadores generan una señal de salida cero. Véase la figura 2.10 (a).

2.3.10.2. Sensor de fibra óptica

Pueden ser utilizados efectivamente como detectores de proximidad y de nivel. Para hacer un detector de nivel se utilizan dos fibras y un prisma. Se utiliza la diferencia entre los índices refractivos del aire y del líquido medido. Cuando el sensor esta sobre el nivel del líquido, la fibra transmisora envía la mayoría de la luz a la fibra receptora debido a una reflexión total dentro del prisma. Cuando el prisma llega al nivel del líquido el ángulo de reflexión interno cambia debido a que el índice refractivo del líquido es más alto que el del aire, esto provoca una mayor pérdida de intensidad de luz que puede ser detectada por la fibra receptora. La intensidad de la luz es convertida en una señal eléctrica por un foto-detector adecuado. Véase la figura 2.10 (c).

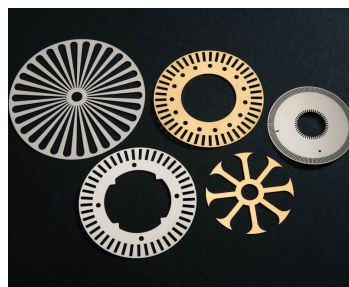
2.3.10.3. Sensores de rejilla

Un transductor de desplazamiento puede ser fabricado con dos rejillas sobrepuestas que funcionan como moduladoras de la intensidad de la luz. El rayo de luz llega a la primera rejilla permitiendo que atraviese aproximadamente la mitad de la luz hacia la segunda rejilla en movimiento. Cuando los sectores opacos de la rejilla en movimiento están alineados con los sectores transmisores de la primera rejilla la luz será bloqueada completamente. Así se puede modular la cantidad de luz transmitida de un 0 % a un 50 % de la intensidad original. El rayo transmitido es enfocado en la superficie sensible de un foto-detector que convierte luz a una corriente eléctrica.

Este principio también se utiliza en codificadores rotantes o lineales donde una máscara móvil (normalmente fabricada en forma de disco) tiene sectores transparentes y opacos. El disco codificador funciona como un interruptor del rayo de luz dentro de un opto-acoplador. Cuando una sección opaca del disco interrumpe el rayo de luz el detector es apagado generando un cero digital, pero cuando la luz pasa por un sector transparente el detector es encendido generando un uno digital. Normalmente se utilizan emisores y detectores infrarrojos. Véase la figura 2.10 (b).



(a) Puente óptico



(b) Rejillas



(c) De fibra óptica

Figura 2.10: Sensores ópticos

2.3.11. Sensores Ultrasónicos

Las ondas ultrasónicas son ondas mecánicas acústicas con un rango de frecuencias por encima de los 20 KHz. Cuando tales ondas inciden sobre un objeto, parte de su energía es reflejada. En casos prácticos, la energía ultrasónica es reflejada de manera difusa, esto es, sin importar de que dirección venga la energía, es reflejada casi uniformemente dentro de un ángulo sólido amplio, aproximándose a los 180°. Si el objeto se mueve, la frecuencia de las ondas reflejadas será diferente a las ondas transmitidas, a lo cual se le llama efecto Doppler. Tales sensores no son efectivos en el espacio ya que no hay aire para transmitir las ondas que generan.

La distancia puede ser calculada conociendo la velocidad de las ondas ultrasónicas en un medio y su ángulo y el tiempo que tarda la onda en viajar del transmisor ser reflejada en un objeto y regresar al receptor. La ventaja de las ondas ultrasónicas con respecto a las microondas es que se propagan a la velocidad del sonido que es mucho más lento que la de la luz (velocidad de las microondas). Así, el tiempo que tarda la onda ultrasónica en ser reflejada es mucho menor y se puede realizar la medición de tiempo de manera más sencilla. Se pueden ver algunos ejemplos de tales sensores en la figura 2.11.



Figura 2.11: Sensores ultrasónicos

2.4. Acondicionamiento de señales adquiridas

El acondicionamiento de señales es un término utilizado generalmente para describir el pre procesamiento requerido para convertir las señales eléctricas recibidas de los transductores a señales que el hardware de adquisición de datos puede aceptar [12]. Éste es el siguiente paso. Una vez seleccionados los sensores que se van a utilizar, algunos de ellos van a necesitar cierto acondicionamiento, más adelante se explicará porque. En esta sección se presentarán algunos métodos para realizar tal acondicionamiento. Cada sensor necesitará un acondicionamiento específico, por lo que es importante determinar que características presenta la señal proveniente del sensor para poder aplicar el acondicionamiento adecuado.

La señal eléctrica proveniente de los sensores no siempre es ideal para ser muestreada. Algunos de los transductores nos entregan una variación de resistencia o capacitancia la cual hay que transformar a un valor equivalente de voltaje. Algunos sensores pueden tener cierta cantidad de ruido en la señal que entregan, por lo que hay que identificar que frecuencias están afectando al sensor y diseñar un filtro capaz de eliminar tales interferencias. Hay sensores cuya amplitud de salida es muy pequeña. Al ser tan pequeña es difícil tomar una muestra con una resolución adecuada para su procesamiento por lo que se recomienda amplificar dicha señal. Algunas veces es el caso contrario, la señal es demasiado grande para ser muestreada por la escala completa del ADC así que se procede a atenuar la señal. Al amplificar o atenuar una señal hay que tener cuidado con los valores de offset – un valor de DC que no es resultado de la medición de una variable sino de la misma electrónica de un sensor. Algunos sensores tienen una señal de offset por su diseño interno o por mala calibración, hay que reducir este valor o atenuar (dependiendo del caso) tal valor para que no afecte los resultados del procesamiento. Stark [8] nos provee de algunas recomendaciones de primera aproximación para acondicionar las señales analógicas. El primer paso para acondicionar datos analógicos es escalar la información a una escala completa común, normalmente 0 a +5.12V. Esto se realiza en la fuente de la información y redondeará el escalonamiento de las conversiones de 10 bits a 5 mV. Si existe algún componente con frecuencias mayores a la mitad de la velocidad de muestreo necesitan ser removidas mediante un filtro paso bajas para prevenir errores de aliasing. Es buena práctica incluir un filtro paso bajas en cada línea analógica. Partiendo de esto se propondrán circuitos eléctricos capaces de acondicionar las señales entrantes al sistema.

Las funciones fundamentales del equipo que acondiciona las señales son: amplificación, filtrado, aislamiento, aterrizaje, excitación y linealización. La aplicación de cada tipo de acondicionamiento dependerá de los transductores y sus diversas necesidades [12].

2.4.1. Amplificación

La amplificación es útil para incrementar la resolución de la medición de alguna señal, si una señal es muy pequeña comparada con la escala completa de con ADC habrá una gran pérdida de precisión. Si se amplifica la señal se podrá incrementar su resolución. Otra función de la amplificación es la de incrementar la relación señal a ruido, si el transductor está puesto en un lugar muy alejado del procesador y la señal tiene que atravesar un ambiente ruidoso para llegar a él, las señales pequeñas pueden ser afectadas por tal ruido. Si estas señales son amplificadas antes de ser transmitidas son menos propensas a ser afectadas por ruido incrementando así su relación señal a ruido. Si se amplifica una señal pequeña después de pasar por un ambiente ruidoso, también se amplificará el ruido y se corre el riesgo que la señal de información sea perdida entre el ruido que lleva a mediciones imprecisas y sin sentido.

Para poder llevar a cabo una amplificación, normalmente se requiere de una impedancia de entrada alta para que el efecto de carga sobre la señal en la salida del transductor sea mínima, también requerirá en algunos casos una respuesta en fre-

cuencia alta para evitar distorsionar la lectura a la salida.

El amplificador operacional es un dispositivo electrónico que tiene dos terminales de entrada y una terminal de salida, las dos terminales son conocidas como inversora y no-inversora respectivamente. Dependiendo de la configuración en la cual se utilice, el amplificador operacional podrá llevar a cabo diversas funciones de amplificación y hasta operaciones matemáticas [18].

En la configuración más sencilla (figura 2.12) para amplificar o atenuar la señal de voltaje proveniente del transductor es por medio de conectar la señal a la terminal inversora, por medio de la resistencia R_1 , y la terminal no inversora conectada a tierra. Se provee un camino de realimentación desde la terminal de salida y a través de la resistencia R_2 hacia la terminal no-inversora. Asumiendo que las características del amplificador operacional son ideales, la señal procesada en la terminal de salida es relacionada a la señal de entrada por medio de la expresión 2.3 y simplificada en la expresión 2.4.

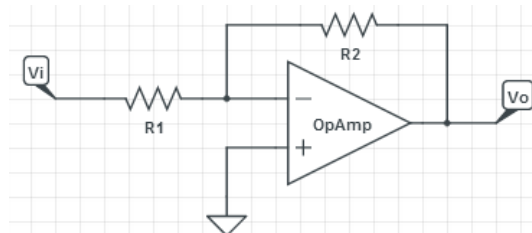


Figura 2.12: Amplificador inversor

$$V_o = -\frac{R_2 \times V_i}{R_1} \quad (2.3)$$

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_i \quad (2.4)$$

La cantidad de amplificación está entonces definida por los valores relativos de R_1 y R_2 . La proporción entre R_1 y R_2 en la configuración del amplificador es conocida como la ganancia del amplificador. Esta configuración se puede utilizar como atenuador utilizando la proporción adecuada. La figura 2.12 mostró la configuración del amplificador inversor. Utilizar un amplificador operacional como atenuador podrá ser más caro que un simple potenciómetro o divisor de voltaje, pero no es afectado por el circuito que tiene a su salida, es pequeño y consume poca energía. La figura 2.13 muestra la configuración para amplificar una señal DC, tal configuración es práctica para DC porque no invierte la señal. Su salida está determinada por la ecuación 2.4, sin embargo, en la práctica el voltaje de salida será limitado por el voltaje de polarización ya que por experimentación se podrá notar que el valor máximo de una señal DC amplificada será de aproximadamente el 0.73 del valor de polarización del amplificador operacional. Tal configuración se ilustra en la figura 2.13.

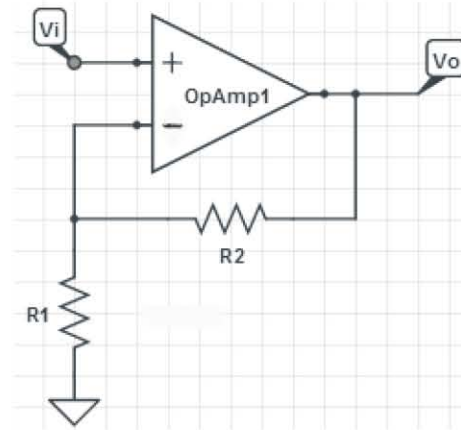


Figura 2.13: Amplificador DC no-inversor

2.4.1.1. Amplificador Diferencial

En un sistema de telemetría algunas veces es necesario poner un sensor a una distancia bastante alejada del sistema de monitoreo siendo necesario utilizar cables largos para hacer la conexión, esto puede provocar que ruido sea introducida en la señal que atraviesa el cable. Si se utiliza un par trenzado para hacer la conexión cada cable puede ser conectado a cada terminal diferencial del amplificador operacional y cualquier ruido que haya sido introducido será rechazado por la capacidad de rechazo en modo común del amplificador. La configuración diferencial es utilizada para amplificar la pequeña diferencia que puede existir entre dos señales de voltaje. También se utiliza para remover voltajes de ruido en modo común[18]. Se ilustra la configuración en la figura 2.14, y la expresión 2.5 modela su voltaje de salida.

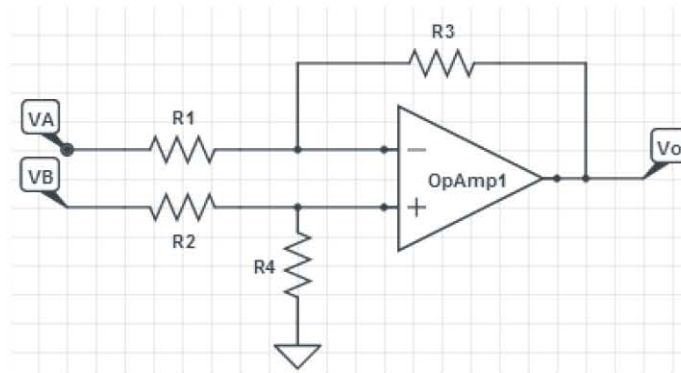


Figura 2.14: Amplificador diferencial

$$V_o = \frac{R_3}{R_1} \times (V_B - V_A) \quad (2.5)$$

2.4.1.2. Amplificador de Instrumentación

Eliminar el ruido ambiental por par trenzado, la característica de rechazo a modo común o amplificar la pequeña diferencia de voltaje entre dos señales también se logra con el amplificador de instrumentación mediante tres amplificadores operacionales. El amplificador de instrumentación es un amplificador diferencial con acoplamiento. Los amplificadores operacionales a la entrada actúan como buffers o seguidores de voltaje dando una impedancia mucho más alta evitando el cálculo de acoplamiento de impedancias. Tiene una impedancia de entrada mucho más alta que un amplificador operacional estándar lo que hace que su capacidad de rechazo en modo común sea mucho mejor. En general esta configuración tiene mayor precisión y estabilidad. La figura 2.15 muestra el esquema de esta configuración y la expresión 3.1 el comportamiento de la señal en la salida [20].

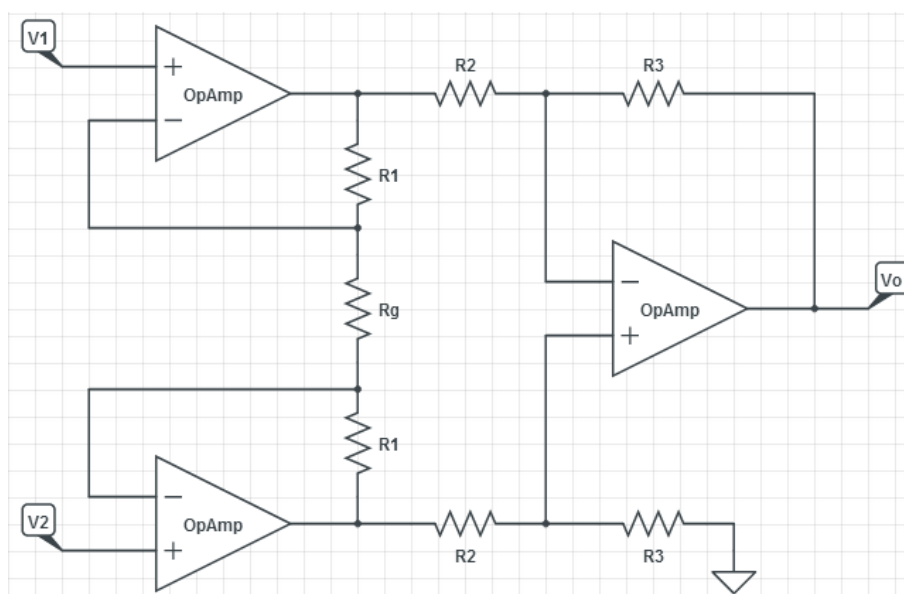


Figura 2.15: Amplificador de Instrumentación

$$V_o = (V_2 - V_1) \times \left(1 + \frac{2R_1}{R_g}\right) \times \frac{R_3}{R_2} \quad (2.6)$$

2.4.1.3. Eliminación de voltaje de polarización

Algunas veces debido a la naturaleza de de la medición del transductor o como resultado de otras operaciones de acondicionamiento de la señal, existe voltaje de polarización en la señal de salida. Se puede remover tal voltaje de polarización por medio de un amplificador diferencial en el cual se utiliza un potenciómetro para proveer un voltaje variable igual al de polarización en la señal antes mencionada. La acción del amplificador diferencial remueve el voltaje de polarización [18].

2.4.1.4. Seguidor de voltaje

Conocido también como preamplificador (figura 2.16), es un circuito que da ganancia unitaria. Tiene una impedancia de entrada muy alta y es útil para reducir la carga sobre el sistema medido, además tiene una impedancia de salida muy baja útil para aplicaciones de acoplamiento de impedancias.

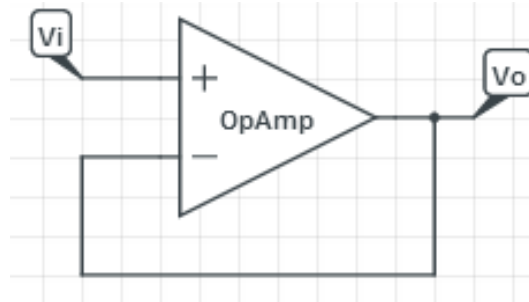


Figura 2.16: Seguidor de voltaje

2.4.2. Filtrado

El filtrado elimina ruido no deseado de las mediciones de las señales antes de ser amplificadas y convertidas a formato digital. El filtrado se puede llevar a cabo mediante software, esto es al tomar muchas muestras de la señal y promediar el valor filtrando así el ruido que aparece en la entrada. Cuando no hay manera otra opción para filtrar, filtros analógicos son la opción más barata. Hay dos tipos principales de filtros analógicos, los pasivos y los activos. Los filtros pasivos utilizan únicamente componentes pasivos, los filtros activos utilizan además de componentes activos, amplificadores operacionales [12].

Idealmente los filtros deberían ser capaces de eliminar cualquier información en frecuencias fuera del rango de frecuencias especificadas. Los filtros prácticos no son ideales y normalmente no eliminan todos los componentes de amplitud de las frecuencias fuera del rango especificado. Para poder entender ciertas características de los filtros se definirán algunos atributos:

Frecuencia de corte: es la frecuencia de transición a la cual el filtro toma efecto. Puede ser frecuencia de corte superior o inferior y se define como la frecuencia a la cual la ganancia normalizada es atenuada 3 dB debajo de la unidad.

Pendiente: es la pendiente en la gráfica de amplitud contra frecuencia en la región de la frecuencia de corte. Esta es la característica que distingue un filtro ideal de uno práctico. Tal pendiente es normalmente medida en una escala logarítmica en unidades de decibeles.

Factor de calidad Q: Esta variable es una característica ajustable de un filtro

sintonizado y determina la ganancia del filtro a su frecuencia de resonancia.

Los filtros activos son usados más frecuentemente por su estabilidad y mejor pendiente. De la figura 2.17 a la figura 2.22 se ilustrarán las características de transferencia de cada circuito considerando su respuesta ideal y real así como su diagrama eléctrico tanto para el caso pasivo como activo [12].

2.4.2.1. Filtro paso bajas

Los filtros paso bajas permiten pasar las componentes de frecuencia baja de una señal y filtrar los componentes por encima de una frecuencia especificada (Figuras 2.17 y 2.18).

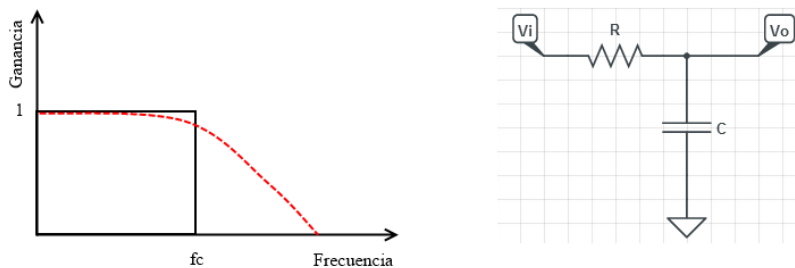


Figura 2.17: Respuesta ideal y real de un filtro paso bajas y su circuito pasivo

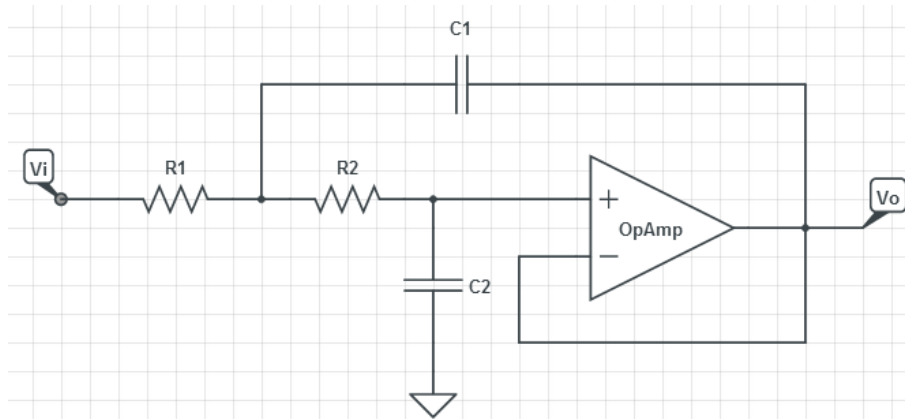


Figura 2.18: Topología Sallen-Key de un filtro paso bajas

2.4.2.2. Filtro paso altas

Los filtros paso altas dejan pasar las frecuencias altas y filtran frecuencias bajas comenzando a una frecuencia baja específica (Figuras 2.19 y 2.20).

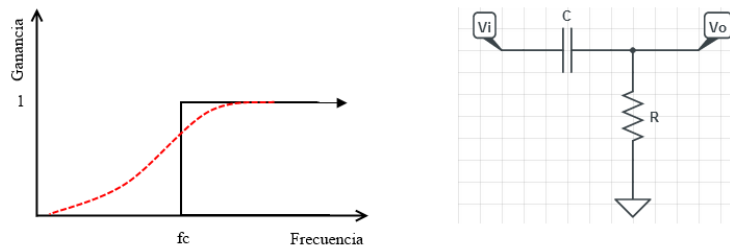


Figura 2.19: Respuesta ideal y real de un filtro paso altas y su circuito pasivo

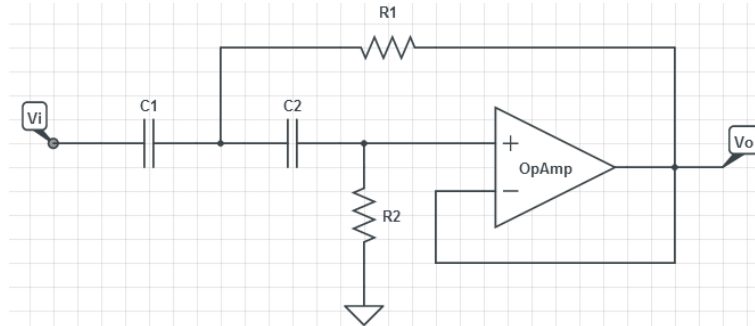


Figura 2.20: Topología Sallen-Key de un filtro paso altas

2.4.2.3. Filtro paso banda

El filtro paso banda es un filtro selectivo, solo deja pasar frecuencias dentro de cierto rango especificado por una frecuencia de corte baja y una frecuencia de corte alta. Para su circuito activo se pueden poner un filtro paso altas activo seguido por un filtro paso bajas, se dice que están en cascada (Figura 2.21).

2.4.2.4. Filtro rechaza banda

Estos filtran cierto rango de frecuencias especificadas por una frecuencia de inicio y fin, y deja pasar todas las demás frecuencias. Estos combinan un filtro paso bajas y paso altas en paralelo, ambos sintonizados a las frecuencias de corte superior e inferior respectivamente. Al igual que el rechaza banda, para hacer un filtro rechaza banda activo hay que poner un filtro paso bajas y un filtro paso altas en cascada (Figura 2.22).

2.4.3. Aislamiento y Aterrizaje

Un acondicionador de señal aislante pasa la señal de su fuente al dispositivo de medición sin una conexión galvánica o física. Los métodos de aislamiento de circuitos más comunes los opto-acopladores, y los de aislamiento magnético y capacitivo. Los opto-acopladores son utilizados principalmente para señales digitales. Los aislantes magnéticos y capacitivos son utilizados para señales analógicas, modulando la señal para convertirla de un voltaje a una frecuencia y transmitiendo la señal de frecuen-

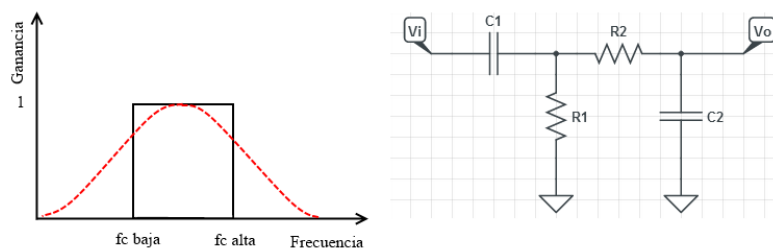


Figura 2.21: Respuesta ideal y real de un filtro paso banda y su circuito pasivo

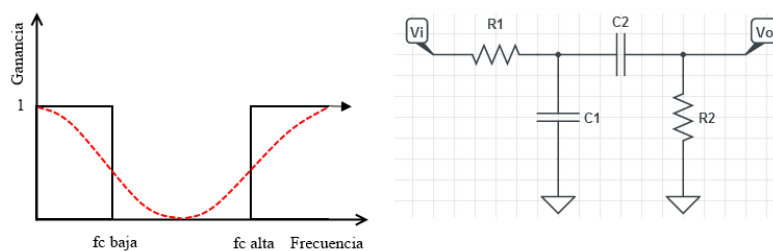


Figura 2.22: Respuesta ideal y real de un filtro rechaza banda y su circuito pasivo

cia por un transformador o capacitor sin una conexión física directa antes de ser convertido en un voltaje nuevamente [12].

El aislamiento es una función importante para la seguridad al proteger equipo caro dentro del sistema de adquisición de datos de transitorios de voltajes altos debido a descargas eléctricas o electrostáticas. Otra función importante es no permitir los bucles de tierra o voltajes de modo común. Los bucles de tierra son causados por la diferencia de potencial entre la tierra física y la referencia a tierra del dispositivo de medición o algún otro circuito eléctrico, esto puede causar inexactitud en la señal medida, al aislar los módulos de acondicionamiento se elimina el bucle de tierra. Las señales de voltaje en modo común son aquellas que aparecen en cada entrada de un sistema de medición, pueden causar diferencias de potencial en la referencias a tierra, se generan cuando existe una diferencia de potencial entre dos puntos de tierra [21].

Hay que asegurarse que un sistema, incluyendo todos los sensores y componentes electrónicos, tienen un solo punto de referencia. La clave está en aterrizar todo el equipo a un solo punto, el punto de tierra común.

2.4.4. Cables y Escudos

La manera en que los cables son conectados puede tener un impacto significativo en la cantidad de ruido en una señal. Las señales de niveles de voltaje menores 100 mV son especialmente susceptibles. Hay algunos principios que pueden ayudar a mantener los niveles de ruido bajos: (1) mantener los cables de conexión lo más cortos posibles, (2) mantener los cables de conexión alejados de fuentes de ruido, (3) utilizar un escudo de cable y tierra adecuada y (4) trenzar pares de cables.[21]

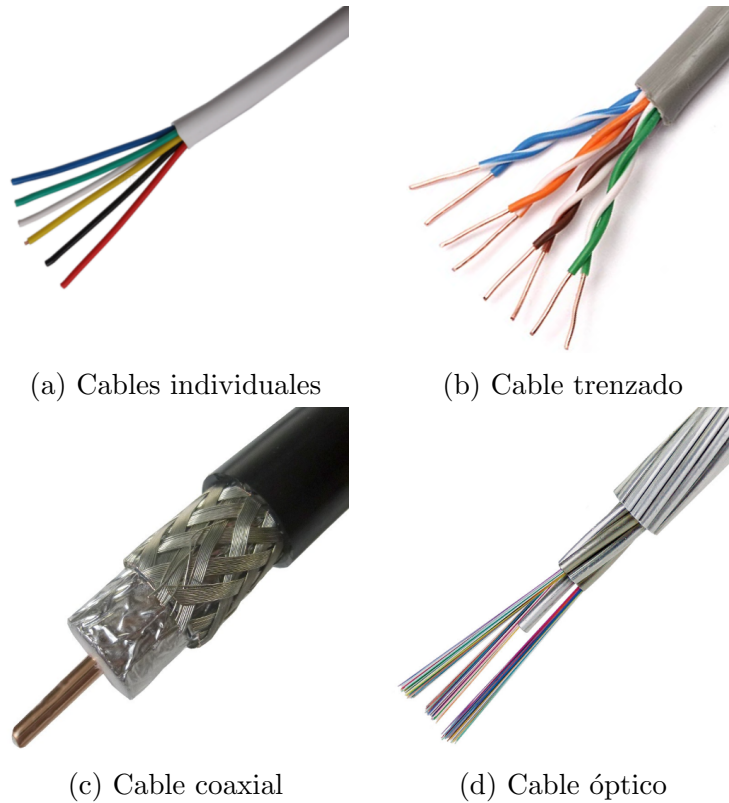


Figura 2.23: Tipos de cables

Los cables largos actúan como antenas y recogen señales de campos eléctricos cercanos. El más común siendo el de la línea de AC. Los escudos eléctricos son efectivos contra tal ruido. Un escudo es un pedazo de lámina de metal o trenzado de alambre, envuelto alrededor de los cables de señal y conectado a tierra. Se previene crear un bucle de tierra al aterrizar el escudo a un solo punto, normalmente a la señal de tierra del transductor.

Existen diversos tipos de cables: cables individuales (a), pares trenzados (b), cable coaxial(c) y cable óptico(d) como se pueden ver en la figura 2.23. Los cables individuales son recubiertos para un aislamiento eléctrico y se puede conseguir en forma de cable plano (una tira de varios conductores acomodados en paralelo). Se utilizan para transmitir señales del orden de 1 V o superiores, no deberá ser utilizado para señales más pequeñas. No hay escudos para este tipo de cables. Los pares trenzados son dos conductores eléctricamente aislados trenzados entre sí. Se utiliza para conectar transductores y equipo. El estar trenzados ofrece algo de inmunidad al ruido siendo más efectivo al aumentar el número de vueltas por unidad de longitud. Se puede escudar este tipo de cables y es la mejor opción para aplicaciones que emplean señales de bajo nivel y altas tasas de información. El cable coaxial es un conductor individual eléctricamente aislado, rodeado de otro conductor hecho de cable trenzado y un escudo de lámina. La corriente fluye en una dirección a lo largo del cable interno, y en dirección opuesta a lo largo del cable externo. Cualquier campo magnético generado será cancelado. Se utiliza para señales de bajo nivel y de alta frecuencia y se puede transmitir

a distancias largas por medio del cable con pocas pérdidas. El cable óptico se utiliza para enviar señales de bajo nivel distancias muy largas. Tal cable puede tener una o más tiras de fibra óptica dentro de un escudo de poliestireno. Se debe convertir la señal de voltaje a luz infrarroja y tal luz es transmitida por el cable hacia un receptor que lo vuelve a convertir a una señal de voltaje de bajo nivel. Prácticamente no le afecta el ruido y es muy ligero [21].

El material con el cual están recubiertos los cables también afecta su desempeño para sobrevivir ambientes hostiles. En el primer capítulo se mencionaron características del medio ambiente espacial, no todos los materiales con los cuales están hechos los cables soportan tales condiciones. Los cables recubiertos de PTFE (Politetrafluoroetileno), también conocido como Teflón. Se utilizan comúnmente en los sistemas espaciales porque no se gasifica, además, toleran un amplio rango de temperatura (desde -200 a 200°C). El teflón es un excelente aislante eléctrico y muy flexible, no es alterado por luz [22, 23].

2.4.5. Linealización

Algunos transductores presentan en su salida una relación no lineal con respecto al fenómeno que están midiendo dentro de un rango de entrada dado. Es el software de sistema de adquisición de datos el que realiza la linealización de tales señales [18]. Es posible convertir una señal no lineal a una lineal mediante configuraciones especiales de amplificadores operacionales que tengan una relación de igual no-linealidad pero opuesta entre las terminales de entrada y salida del amplificador.

2.5. Procesamiento de la información

Hasta ahora se ha transformado la energía de diversas variables físicas a una señal de voltaje por medio de los sensores correspondientes, después se acondicionó tal señal para poder ser procesada adecuadamente. El siguiente paso en el diseño del sistema de adquisición de datos es realizar el procesamiento de la información, lo cual incluye: un sistema de multiplexaje, el convertidor analógico digital, un procesador y un bus de datos. Primero se van a introducir los distintos tipos de procesadores, ya que algunos de ellos ya incluyen un sistema de multiplexaje y un ADC. Una vez seleccionado el procesador hay que determinar que tipo de esquema de muestreo se va a utilizar para determinar a que extensión se van a utilizar los multiplexores. Definido el sistema de multiplexaje, es necesario muestrear cada canal en una determinada secuencia. Como se mencionó, el ADC podrá estar integrado en el procesador o no, si no lo está hay que escoger uno de acuerdo a la resolución y velocidad de muestreo necesarias. Si viene integrado, hay que estar conscientes de las capacidades de tal ADC. Después de definir el esquema de muestreo hay que considerar que procesamiento se le va a hacer a la señal muestreada y se deberá aplicar tal algoritmo. Una vez procesada la información hay que prepararla para almacenamiento o envío, esto implica la generación de los marcos de telemetría que serán enviados a la estación Terrestre (en la misión AEMB-F1 únicamente se va a almacenar la información), cuya estructura deberá seguir un

protocolo que también necesita ser definido. Después, hay que definir en que tipo de memorias se va a guardar la información y que bus o elementos van a ser necesarios para lograr eso.

Dado a que la información que proviene de los sensores será muestreada y convertida a una señal digital, se va a utilizar un sistema PCM (Modulación por Pulsos Codificados) por su capacidad de procesamiento de valor agregado aplicado a la señal y los medios de adquirir la información. Su principal desventaja es el ancho de banda requerido[5]. De acuerdo con lo que dice Wertz [7], una precisión de 1 % es suficiente, y un convertidor analógico – digital (ADC) de 8 bits es suficiente para obtener esta precisión [8].

En los sistemas analógicos, las señales no son procesadas, o bien la salida de los sensores modula directamente al transmisor [5]. Tales señales son continuas tanto en tiempo como en amplitud. La señal analógica será limitada en tiempo de acuerdo al periodo de interés definido por las necesidades del sistema de datos del usuario.

Una manera de adquirir las señales de los sensores es dedicar un canal y frecuencia de transmisión específico para cada sensor. Sin embargo, esto no es muy eficiente, especialmente cuando la cantidad de sensores es grande. Una manera de mejorar tal transmisión de datos es por medio de muestrear cada canal en el sistema y transmitir las muestras dándole a cada muestra una porción de tiempo de manera periódica, así, la transmisión se vuelve multiplexada. A tal proceso también se le denomina como conmutación de señales [5]. Para realizar estos muestreos y procesamientos es necesario un dispositivo que pueda coordinar estas acciones y realizar los procesamientos requeridos, tal dispositivo es un microprocesador.

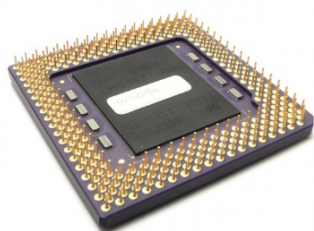
2.5.1. Microprocesadores y Microcontroladores

Un microprocesador (μP) es el circuito integrado más complejo de un sistema informático, es el sistema central o “cerebro” de una computadora. Se le denomina como la Unidad Central de Procesamiento (CPU). Para poder realizar algunas funciones mínimas necesita algunos otros dispositivos, necesitará: memoria (de programa y volátil), bus de datos, y algún periférico de entrada y/o salida. Todo dispositivo que comparta información con el μP será conectado mediante el bus de datos, se puede variar el tamaño del banco de memoria de programa o de acceso aleatorio de acuerdo a las necesidades del sistema. Además existen una gran cantidad de dispositivos que pueden servir como entradas o salidas del sistema, por ejemplo, se puede agregar un módulo ADC para poder procesar señales analógicas, algún tipo de pantalla para desplegar información, un teclado para ingresar datos, un puerto serial para enviar o recibir información, etc. La ventaja de estos sistemas es su alta flexibilidad para adaptarse a necesidades muy específicas de un sistema, en contraparte, dado a que cada módulo adicional agregado va a aumentar el costo y el consumo energético total [24].

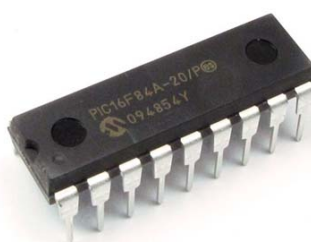
Los microcontroladores (μC) fueron creados para reducir el costo económico y el consumo energético de un sistema de procesamiento en particular. Son sistemas computacionales autónomos que incluyen un CPU, memoria, periféricos de entrada y salida, y un ADC todo dentro de un solo paquete, un circuito integrado. La des-

ventaja es que los recursos de tales dispositivos llegan a ser limitados y su unidad de procesamiento por lo general es de menor capacidad y más lenta [25].

Con cualquiera de estos dos tipos de procesadores se podrá realizar el procesamiento necesario, uno requerirá de módulos adicionales y el otro no, pero para los dos, el procesamiento que podrán llevar a cabo será limitado por la cantidad de instrucciones que pueden realizar en determinado tiempo, su capacidad de almacenamiento de información y la cantidad de puertos de entrada y salida que manejan. Hay que seleccionar un procesador que se adecúe bien a las necesidades de nuestra misión. Se muestra un ejemplo de cada uno en la figura 2.24.



(a) Microprocesador Cyrix / IBM 9314



(b) Microcontrolador Microchip PIC16F84A

Figura 2.24: Microprocesador y microcontrolador

2.5.2. Modulación por Pulsos Codificados

La base detrás de PCM es poder muestrear una señal en tiempo y en amplitud. La señal analógica original es convertida a una señal muestreada. Hay dos variables a considerar para un sistema PCM: la tasa a la cual son tomadas las muestras y la cantidad de niveles de conversión se van a utilizar para representar la señal. La cantidad de niveles de conversión podrá generar una pequeña cantidad de picos en las muestras, pero tal efecto se puede mitigar al utilizar un número grande de niveles de conversión. Ya que las señales de amplitud hayan sido convertidos a niveles digitales por turnos, los niveles digitales pueden ser multiplexados para su transmisión por el canal de datos, así, la transmisión consiste en una trama de números o palabras digitales y no niveles de amplitud [5].

2.5.3. Cuantificación

Para poder convertir una señal analógica en digital y poder darle un formato digital PCM, se requieren de dos etapas: muestreo y conversión. Hay dos etapas del muestreo, la primera, implica adquirir y retener la amplitud de la señal analógica mientras que la segunda etapa convierte la amplitud a una representación digital. La cuantificación en los sistemas de telemetría se lleva a cabo de manera uniforme. La cuantificación uniforme toma el rango de voltaje pico a pico completo y lo divide en un número determinado de niveles. Cada nivel tiene un ancho de cierto voltaje, esta

es la distancia entre cada nivel de cuantificación [5]. La figura 2.25 compara una señal analógica con su cuantificación.

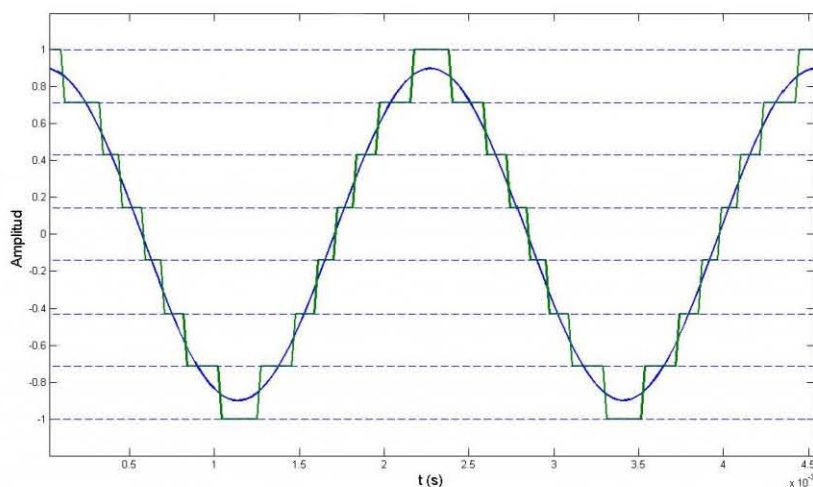


Figura 2.25: Niveles de cuantificación

2.5.4. Conmutación

Como se ha mencionado el sistema normalmente tendrá que muestrear varios canales analógicos para formar la trama de datos PCM. El proceso de tomar muestras progresivamente se denomina conmutación. El control de tal, es hecho por un procesador y no tiene que ser igual para cada canal, la estrategia de conmutación puede ser definida por la tasa de Nyquist de cada canal. Para asistir el proceso se utilizan multiplexores para permitir el muestreo de varios canales por un solo dispositivo. Si el sistema tiene varios dispositivos conmutadores, los resultados pueden ser sincronizados en un formato de división por tiempo que permitirá al usuario separar los canales de lo cual se encarga la estructura del marco de telemetría [5].

2.5.5. Hardware de muestreo

En la mayoría de los sistemas, el tiempo de conversión de una señal analógica a una digital es crucial ya que determinará la cantidad de muestras de diversos tipos podrá tomar en un determinado tiempo. Los factores a considerar para tal conversión incluyen: t_{mux} – que es el tiempo que tarda en conmutar y propagar la señal a través del MUX, t_{acq} – el tiempo de asentamiento, t_{SHA} – el tiempo de muestreo y retención, t_{setup} y t_{conv} – son los tiempos de configuración y de conversión del ADC. El tiempo de conversión deberá ser acoplado a la tasa de muestreo para prevenir aliasing y asegurar que se le de servicio a todos los canales analógicos en el tiempo de conmutación deseado [5].

2.5.6. Muestreo y Retención

Sample-and-Hold en inglés, es un bloque del hardware de muestreo previo al ADC. Su función es de rastrear la señal y al ser dada la instrucción, retener el último valor estable para que el hardware del ADC lo pueda medir y después regresar a modo de rastreo. Comúnmente se utiliza un capacitor integrador o de almacenamiento para mitigar algún ruido en el resultado [5].

2.5.7. Convertidor Analógico-Digital

Hay varios métodos para realizar la función de conversión analógica-digital. Hay dos tipos básicos: los de aproximaciones sucesivas y los paralelos o flash. El microcontrolador que se escogió contiene un ADC de aproximaciones sucesivas[26]. Se entrará un poco en detalle sobre este método de conversión [5].

2.5.8. ADC de Aproximaciones Sucesivas

Es uno de los ADC más ampliamente utilizado, lo que trata de hacer es sintetizar la señal de entrada dentro del convertidor. La señal sintetizada se utiliza para eliminar la señal de entrada. El ADC puede realizar el proceso de cuantificación en N ciclos de reloj, donde N es el número de bits de salida. Si la suma resultante es menor a que el voltaje de entrada, se mantiene el valor; si excede el valor de entrada, se remueve el último valor. La figura 2.26 muestra un diagrama a bloques de lo que sucede en el convertidor [5].

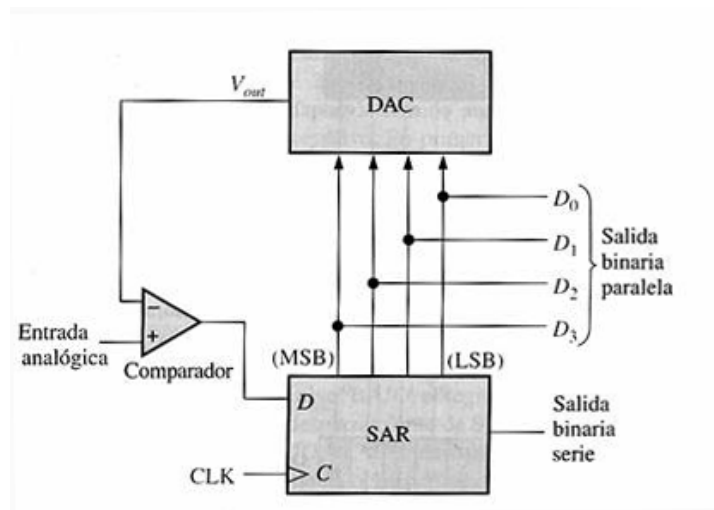


Figura 2.26: ADC de Aproximaciones Sucesivas

El ADC que contiene el microcontrolador, como se mencionó, utiliza el método de aproximaciones sucesivas. Tiene 10 bits de resolución y tiene un tiempo de conversión entre 13 y 260 μs esto permite que se hagan hasta 15 mil muestras por segundo (a máxima resolución). El convertidor tiene seis canales de entrada multiplexados al bloque de muestreo y retención y después al convertidor. Entonces, el ADC convierte

la entrada analógica a un valor de 10 bits por medio de aproximaciones sucesivas. El valor mínimo representa GND y el valor máximo representa el valor utilizado como referencia (AREF) menos 1 LSB [26]. El resultado de la conversión es determinado por la ecuación 2.7.

$$V_{ADC} = \frac{V_{in} \times 1024}{V_{ref}} \quad (2.7)$$

Una vez que el ADC realiza la conversión, el resultado es guardado en un registro temporal, tal resultado deberá ser guardado a alguna variable dentro de alguna localidad de memoria, como la memoria RAM, para continuar su procesamiento.

2.5.9. Algoritmos de procesamiento

El resultado obtenido del ADC simplemente equivale a un valor de voltaje proporcional a lo que está entregando un sensor. Este valor “crudo” podría no significar nada para el usuario. Es necesario tomar el valor obtenido y procesarlo de tal manera que por medio de una operación matemática de un resultado útil para el usuario en unidades relacionadas a la variable en cuestión. Para tal procesamiento es necesario haber realizado una caracterización de los señores y así generar un modelo matemático que relacione la salida en voltaje del sensor a una unidad significativa de la variable física en cuestión. Tales modelos matemáticos servirán de algoritmos de procesamiento para los valores resultantes de la conversión analógica-digital. El resultado de tal procesamiento es más fácil para la interpretación de información que tiene que hacer el usuario.

2.5.9.1. Formato de la Información

Antes de poder enviar la información recopilada, la trama de datos PCM necesita cierta estructura para que al ser recibida la información, se pueda sincronizar con el receptor y se pueda interpretar la información contenida en la trama recibida. En el estándar del Modelo de Referencia de Interconexión para Sistemas Abiertos (OSI) (véase la figura 2.27) el marco de información de telemetría es de nivel II llamado Capa de Enlace de Datos. En el nivel II se intercambian Unidades de Datos con Protocolo (PDU). El PDU contiene la estructura de datos necesaria, revisión de errores y la gestión contable necesarios para apoyar la transmisión de información. A este PDU de nivel II se le denomina marco y un marco está definido como:

la secuencia de bits contiguos incluyendo y delimitados por secuencias de banderas de inicio y fin. Un marco normalmente consiste de un número específico de bits entre secuencias de banderas y normalmente incluye un campo de dirección, un campo de control y una secuencia de revisión de marco. Los marcos usualmente son una representación de la información original a ser transmitida, junto con otros bits que pueden ser utilizados para detección de errores y control. En la estructura multiplexada de

sistemas PCM, un arreglo de ranuras de tiempo en las cuales la posición de cada dígito puede ser identificado por una referencia a una señal de alineación de marco. En un sistema de multiplexaje por división de tiempo, es un grupo repetitivo de señales que resultan de una muestra de todos los canales, incluyendo cualquier información del sistema requerida, como señales de sincronización adicionales.[5]



Figura 2.27: Niveles OSI

Los marcos fueron diseñados para apoyar al esquema de Multiplexaje por División de Tiempo (TDM) para enviar la información de los sensores en una configuración punto a punto con enlaces pocos fiables. Por la calidad pobre de los enlaces, hay la posibilidad de caídas de la señal en momentos inapropiados y se necesitará re-sincronización rápida si la señal es perdida. Se utiliza un formato de división por tiempo estricto con una estructura con lugares bien definidos para la información de cada sensor relativos a las marcas de sincronización utilizadas. La razón de utilizar tales marcas de sincronización es para permitir al receptor re-sincronizarse en un tiempo razonable [5].

2.5.9.2. Marco Menor

Un marco menor es un bloque de información, de longitud fija, proveniente de los sensores a la cual se le agregan marcas de sincronización e información de manejo. La estructura que parte el marco menor en: marcas de sincronización, información y parámetros de manejo se mantienen fijos de un marco menor al siguiente [5].

2.5.9.3. Marco Mayor

Un marco mayor es formado por una número entero de marcos menores de tal manera que cada parámetro de telemetría es muestreado al menos una vez. No es necesario que en el marco menor se tome una muestra de cada sensor, pero al unir todos los marcos menores en un marco mayor, si es necesario que cada sensor haya sido muestreado. La IRIG establece como límite para el marco mayor, 256 marcos menores. El marco mayor puede ser visto como una matriz donde cada fila es un marco menor, y cada columna la diversas partes de la estructura del marco menor. Véase la figura 2.28.

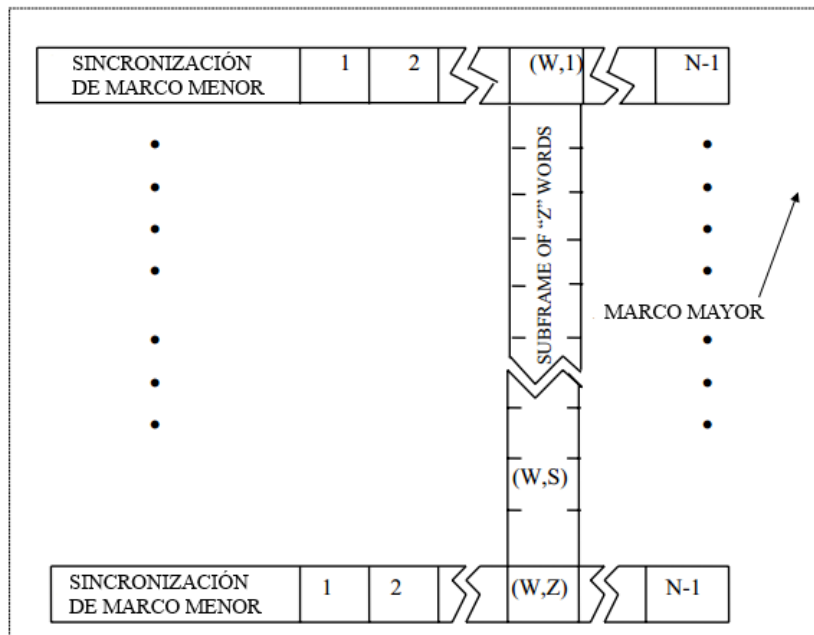


Figura 2.28: Estructura de marco PCM[27]

2.5.9.4. Cantidad total de información transmitida

Para tener una idea de la magnitud de la situación, hay que considerar que cada vez que un sensor es muestreado se generan N cantidad de bits a una tasa de R_s muestras por segundo. La tasa de datos para la iteración i está representada por la ecuación 2.8. Si el sistema de adquisición de datos tiene M sensores, entonces la cantidad total de bits por segundo generadas será R_T expresado en la ecuación 2.9.

$$R_i = R_s N \quad (2.8)$$

$$R_T = \sum_{i=1}^M R_i \quad (2.9)$$

2.5.10. Protocolos de transmisión de información

Existe un Comité Consultivo para Sistemas de Datos Espaciales (CCSDS) cuyo fin es discutir y desarrollar estándares para sistemas de datos y sistemas de información espaciales. Tiene una validez internacional con once agencias miembro y veintiocho agencias observadoras, además de 140 socios industriales. El trabajo de CCSDS es apoyar a la colaboración e interoperabilidad entre agencias miembro a través del establecimiento de estándares de sistemas de información.

Se consultó el estándar CCSDS 102.0-B-5 del *libro azul* que trata sobre telemetría por paquetes [28]. El fin de consultar tal estándar es definir la estructura de los marcos de telemetría para así saber que formato darle a la información que generará el sistema de monitoreo de parámetros físicos. El sistema de telemetría tomará tales datos y los incluirá en la generación de marcos.

La esencia de la telemetría por paquetes es permitir que múltiples procesos de aplicación que funcionan a bordo puedan crear unidades de información que se acomoden mejor a cada fuente de información para que el sistema de datos de abordaje pueda transmitir estos datos por un canal de comunicación espacio-a-tierra de tal manera que el sistema terrestre pueda recuperar unidades de datos individuales con alta confiabilidad.

Se establecen dos estructuras de datos: Paquetes Fuente y Marco de Transferencia. Se utiliza un proceso de multiplexación para intercalar el Paquete Fuente de diversas procesos de aplicación en un Marco de Transferencia. El marco de transferencia puede incluir otros tres tipos de paquetes: Datagramas de Protocolo de Red SCPS, Datagramas del Protocolo de Internet v4, y un Paquete de Encapsulado.

2.5.10.1. Paquetes Fuente

Los Paquetes Fuente permiten que cada proceso de aplicación en una fuente de información optimice el tamaño y estructura de su conjunto de datos dentro de las restricciones mínimas impuestas por el sistema de transporte de nave-a-tierra. Por lo tanto cada fuente de información puede definir su organización de datos de manera independiente de otras fuentes de información. El *header* del Paquete Fuente contiene un identificador de proceso de aplicación, información de la longitud, secuencia y otras características del paquete. Un header opcional secundario es provisto para etiquetas de tiempo estándar.

El Paquete Fuente (figura 2.29) contiene dos campos principales con posición contigua en el siguiente orden: header principal del paquete (48 bits) y el campo de datos del paquete (tamaño variable). Deberá contener al menos 7 y a lo más 65542 octetos. Una serie de Paquetes Fuente generados consecutivamente por el mismo proceso de aplicación puede ser designado como un grupo de Paquetes Fuente.

El header Primario del Paquete contiene cuatro campos contiguos en el siguiente orden: Número de Versión (3 bits), Identificación de Paquete (13 bits), Control de Secuencia del Paquete (16 bits), Longitud de Datos del Paquete (16 bits). El campo de identificación de paquete está compuesto por tres sub-campos: tipo de identificador (1 bit), bandera del header secundario del paquete (1 bit), y el identificador del proceso

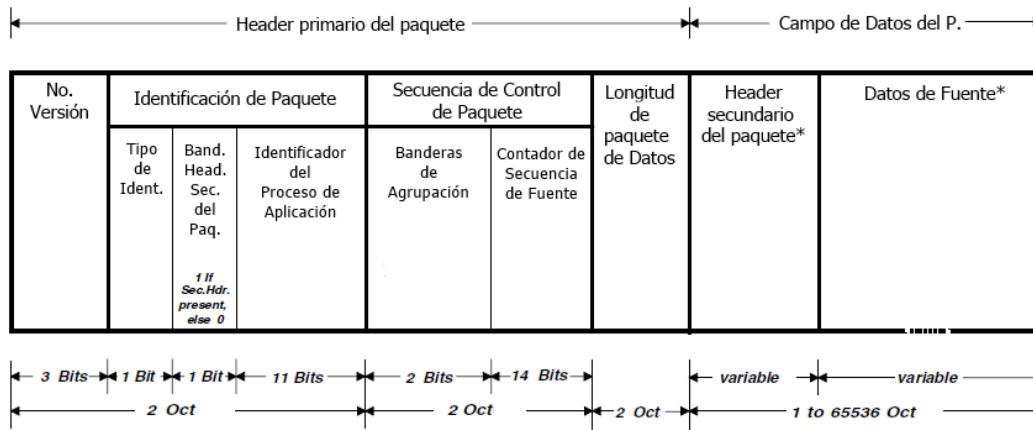


Figura 2.29: Formato del Paquete Fuente

de aplicación (11 bits). El campo de control de secuencia del paquete está compuesto por dos sub-campos: banderas de agrupación (2 bits) y el contador de secuencia de fuente (14 bits).

El campo de datos del paquete seguirá, sin espacios, al header primario del paquete. Deberá contener al menos uno de los dos siguientes campos, contiguos, en la siguiente secuencia. Header secundario del paquete (longitud variable), campo de datos de fuente (longitud variable).

El campo de datos de fuente seguirá, sin espacios, ya sea al header secundario del paquete o el campo de longitud de datos del paquete. Contendrá datos de origen de una aplicación de proceso o información *idle*. Su longitud es variable pero deberá contener una cantidad entera de octetos. La longitud del campo deberá estar contenido en el campo de longitud de datos del paquete, se podrá especificar una longitud entre 0 y 65535 octetos.

2.5.10.2. Marco de Transferencia

El Marco de Transferencia provee un sobre para transmitir datos empaquetados a través de un canal espacio-a-tierra ruidoso. El header del primario contiene información que permite al sistema terrestre dirigir los Marcos de Transferencia a su destino. El Marco de Transferencia es de longitud definida, es compatible con la Recomendación para la Codificación de Canal de Telemetría (incluyendo sincronización), logrando así, la recuperación de la información con alta confiabilidad. El header primario provee los elementos necesarios para permitir que los Paquetes Fuente de longitud variable puedan ser multiplexados a una secuencia de marcos de longitud fija. Dado a que un paquete puede iniciar y comenzar en cualquier lugar dentro de un marco, todo el campo de datos de cada marco puede ser utilizado para llevar datos; no hay necesidad de modificar el tamaño los paquetes o su orden de ocurrencia para ajustar los marcos.

2.6. Almacenamiento de la información

Un elemento fundamental del sistema es el dispositivo de almacenamiento de información, es fundamental porque no se podrá estar enviando información a la estación terrestre constantemente. En el caso de *Quetzal*, el tiempo durante el cual se podrá enviar información dependerá de la órbita que tenga, como tal tiempo es corto y normalmente pasan varias horas antes de poder enviar toda la información almacenada se necesitará un dispositivo con gran capacidad de memoria. Para el caso AEMB-F1 no habrá ninguna oportunidad de enviar información a la Tierra, toda la información generada deberá ser almacenada, también se necesitará un dispositivo con gran capacidad de memoria. Para ambos casos tener una gran capacidad de memoria es un requisito.

La primera opción es la memoria interna de la unidad de procesamiento del sistema, todos los sistemas computacionales tienen memoria y su capacidad varía de acuerdo al modelo. Si se utiliza la memoria interna de la computadora o microcontrolador el tiempo de transmisión y almacenamiento de datos será muy corto, normalmente con una sola o con pocas funciones se puede almacenar información en la memoria interna.

La segunda opción es utilizar un banco de memoria externa no-volátil. Existen diversos tipos de memorias cada una con capacidades distintas y distintos protocolos de comunicación. Esto implica que el procesador se va a tener que comunicar con la memoria y después enviar la información que se va a almacenar, esto tarda más tiempo, pero existen protocolos con tasas de transferencia de información muy altos. Algunos ejemplos de memoria no-volátil de tipo ROM se muestran en la tabla 2.3 se mencionarán algunos otros tipos de memoria después.

Tabla 2.3: Memorias no-volátiles de tipo ROM [29]

Siglas	Definición	Descripción
ROM	Read-Only Memory	El contenido de la memoria es definida durante su manufactura y no es modificable.
EPROM	Erasable Programable ROM	La memoria es borrada mediante exposición a luz UV y es programada eléctricamente.
EEPROM	Electrically Erasable Programable ROM	La memoria puede ser borrada y programada eléctricamente. El uso de <i>EE</i> implica borrado por bloques y no borrado por bits.
E^2 PROM	Electrically Erasable Programable ROM	La memoria puede ser borrada y programada eléctricamente. El uso de E^2 implica la alteración de bits y no un borrado por bloques.

La memoria EEPROM es utilizada principalmente para almacenar pequeñas cantidades de información. Para guardar grandes cantidades de información se vuelve

muy costoso utilizar este tipo de memoria. Para programar o borrar una EEPROM no deberá ser retirada del dispositivo en el cual se encuentra como la EPROM, simplemente al aplicar señales de programación específicas realizará la función. Actualmente se pueden realizar un millón de ciclos de escritura y borrado a este tipo de memoria [30].

Además de esta clasificación general o evolución de memorias, existen las memorias de tipo Flash que son un desarrollo de las memorias EEPROM, donde sólo un arreglo dentro de la memoria o la memoria entera puede ser borrada a diferencia de la EEPROM donde únicamente se puede borrar la memoria completa y no sólo una parte. Hay muchas variantes de Flash, las dos principales son: NAND Flash - orientado hacia aplicaciones de almacenamiento por bloques y NOR Flash - que es adecuada para el almacenamiento direccionable para código y palabras. Esta memoria tiene un límite de ciclos de escritura/borrado, se podrán realizar 100,000 ciclos de E/B antes de comenzar el deterioro. Este tipo de memorias van acompañadas de controladores para llevar a cabo control de uso y corrección de errores. Se apilan varios chips para alcanzar capacidades mayores, tales chips son de tamaños estrictamente en múltiplos binarios. Se han alcanzado capacidades de hasta 256 GB. Es mucho más rápida su velocidad de lectura que de escritura [31].

Otro tipo de NVRAM es la FRAM (RAM Ferroeléctrica), es similar a la DRAM (RAM Dinámica) pero utiliza una capa ferroeléctrica en lugar de una capa dieléctrica para alcanzar la *no-volatilidad*. Tiene la misma funcionalidad que la memoria de escritura. Su ventaja sobre Flash es un menor consumo de potencia, un tiempo de escritura más rápido, y un número mayor de ciclos de E/B (10^{16}); pero su desventaja es que tiene una densidad de almacenamiento mucho menor y un costo más elevado [32].

Capítulo 3

Diseño del Sistema de Monitoreo

En el capítulo anterior se analizó la metodología de diseño del sistema de monitoreo, se propusieron diversos parámetros que se podrían monitorear así como los diversos tipos de sensores que se podrían utilizar para medir tales variables en nuestro sistema. En este capítulo se seleccionarán los sensores que se utilizarán para realizar el monitoreo y a partir de estos se diseñarán circuitos de acondicionamiento de señal para que tales señales puedan ser adquiridas y procesadas por el micro-controlador. Se presentará el desarrollo de los algoritmos para procesar las señales adquiridas y los métodos que se utilizarán para almacenar y transmitir la información.

El caso de diseño se enfocará hacia el desarrollo del prototipo que voló a bordo de AEMB-F1, para tener una idea de cuanto tiempo se tuvo para llevar a cabo el diseño e integración de este proyecto se puede hacer referencia a la figura 3.1. Se presentó la misión el 28 de Mayo de 2013 y se tendría que enviar el prototipo terminado a más tardar el 29 de Julio. Esto da un tiempo total de 9 semanas (65 días) para: diseño, compra de componentes, fabricación y pruebas. Pero debido a las pruebas que se deberían realizar al prototipo completo, se reduce el tiempo a 58 días. En la figura 3.1 a nuestro sistema se le refiere como: SubPLQ electronics.

3.1. Determinación de parámetros a monitorear

Como en todo sistema de adquisición de datos, primero hay que identificar cuáles son los parámetros de interés que se busca monitorear.

El objetivo principal de nuestro vuelo, AEMB-F1, es monitorear el comportamiento térmico de la estructura y de los diversos subsistemas presentes a fin de hacer un análisis térmico de la estructura de acuerdo a la ubicación de los diversos subsistemas. Tal información servirá para el mejoramiento de futuras versiones de todos los sistemas. Temperatura va a ser una de las variables más importantes a monitorear, para la selección del sensor hay que tener en cuenta el rango de temperatura que puede medir, cuanta potencia consume, que tan fácil es medir la señal que entrega y el precio.

Como parte del sistema de adquisición de datos, es importante monitorear la cantidad de potencia que se está consumiendo para saber que sistemas están funcionando.

	27/5	3/6	10/6	17/6	24/6	1/7	8/7	15/7	22/7	29/7	5/8	12/7
Task	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
Main mechanical structure and I/F NATA profile	D	D	D	P	C					D E L I V E R Y	R O U T E & I N T E G R A T I O N	L A U N C H
Mechanical structure SubPLQ	D	D	P	P	C							
Mechanical I/F main mech structure & SubPLQ mech structure	D											
ON/OFF	D	D										
Power Supply I/F	D	D										
LVFI + LVFI harness	D	D/P	D/P	C/P	C	F						
CPD	D	P	C/S	S	S	S						
MR.1 + TB1 + TB2 + TB3 + SENSORS + THERMISTORS + harness					C	C	C/F	F(TB)				
MR.2	D	P	C/S	S	S	S						
SubPLQ electronics	D	D/C	C	C	C	F						
ON/OFF hard field device		D	P	C								
E.C. External Control Computer	D	P/S	S	S	S	S						
ON/OFF query button	D	D	P	C	C							
Thermal architecture	D/C	C/F1			D/C	C/F2						
Thermal tests		X						X				
Vibration tests								X				
EMC tests									X			
Integration						X	X	X				
Payload Delivery / packaging									X			
Start mission at Fort Summers												

Figura 3.1: Cronograma de la misión AEMB-F1

Para hacer esto, se recurre a medir la cantidad de corriente que se está consumiendo. La medición de corriente, conociendo los niveles de voltaje en cada pista, permitirá calcular la potencia consumida. El sensor a utilizar deberá ser lo suficientemente sensible para monitorear corrientes menores a 1 Ampere ya que los sistemas consumirán niveles de corriente menores a esto, previendo que el sistema no deberá rebasar medio Ampere de corriente.

Por las restricciones impuestas con respecto a la emisión de señales de RF, no se podrá agregar un GPS al sistema. La función de tal dispositivo es determinar la posición del sistema, especialmente en la componente de altura, para hacer una comparación de los efectos atmosféricos sobre el sistema. Se buscó una alternativa para poder determinar la altura, se propuso medir la presión. Tomando como base bibliografía que describe la variación de la presión atmosférica de acuerdo a la altura en una tabla, se hará un cálculo indirecto de la presión. Los sensores de presión necesitan ser capaces de medir presiones muy cercanas al vacío.

Como complemento al monitoreo de la presión se ha determinado monitorear, además, la humedad. Medir la condensación presente en el sistema ayudará al monitoreo de la altura evaluando los diversos niveles de la atmósfera que va atravesando. Además servirá de indicador en caso de que haya un corto en el sistema, por las grandes posibilidades de acumulación de humedad que podrían generar un corto circuito entre pistas.

El equipo que realiza el diseño del sistema de control y estabilización de Quetzal solicitó que se integrara un acelerómetro al sistema, y así poder validar el funcionamiento de cierto modelo en condiciones similares a las del espacio.

3.2. Selección de sensores

Como se describió en la sección 2.3, existe una gran variedad de sensores capaces de medir el mismo parámetro. Después de analizar los diversos tipos de tecnologías que hay se propondrá aquél que mejor se adapte a las necesidades y características del sistema. Pero antes, es necesario determinar que parámetros físicos se van a monitorear.

La sección 2.2 sirve de guía para tener un panorama amplio de las diversas variables que se pueden medir con un sistema de adquisición de datos en general y en específico para un DAQ que estará a bordo de un satélite. De acuerdo a los objetivos de la misión para el vuelo AEMB-1 se monitorearon las siguientes variables:

- Temperatura
- Corriente
- Humedad
- Presión
- Aceleración

3.2.1. Temperatura

El fin de monitorear la temperatura es para hacer un análisis detallado de la estructura y de diversos componentes electrónicos relevantes (térmicamente hablando). Se necesitará un sensor de bajo costo, ya que se utilizará una gran cantidad de ellos. El sensor deberá ser capaz de funcionar dentro del rango de variación de temperaturas a las cuales va a estar expuesto así como poder medir el valor de la temperatura en ese rango. Para darnos una idea con respecto a qué tipo de condiciones ambientales se va a enfrentar el sistema conforme va atravesando la atmósfera ha que analizar la figura 3.2.

Comenzando a nivel del mar con una temperatura ambiental de aproximadamente 20°C , la temperatura comenzará a descender gradualmente conforme aumenta la altura. Al llegar al límite entre la tropósfera y la estratósfera se espera una temperatura de -60°C y al alcanzar la altura máxima para globos aerostáticos se espera un incremento de temperatura ambiental hasta los -30°C . Por supuesto, esta no es la temperatura que se espera medir directamente en el sistema; la colocación de paneles solares cercanos al sistema, las fuentes de potencia del sistema, los reguladores de voltaje, y algunos otros componentes electrónicos generarán calor. Se ha registrado que algunos de los componentes del sistema han llegado hasta los 40°C . Así, al considerar que sensores de temperatura serán los más adecuados para el sistema, habrá que considerar que puedan operar dentro del rango -60°C a 40°C . En la tabla 3.1 se presenta una muestra de diversos tipos de sensores de temperatura y algunas de sus características.

Los termopares tienen el mejor rango de temperaturas sin embargo, su costo por unidad es alto en comparación con los demás sensores. Su respuesta es muy lineal dentro de su rango de medición pero su sensibilidad es muy baja (del orden de $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$) y requerirá de un circuito amplificador. La desventaja de esto es que al agregar otro conductor a las terminales del termopar tal unión también generará un efecto termopar y habrá que calcular compensaciones. Los termistores y los RTDs tienen un rango de medición similar, siendo el de los RTDs más amplio, ambos requieren de circuitos adicionales similares, por ejemplo, un puente de Wheatstone. El rango de precio es medio y su velocidad de respuesta varía.

Tres de los cuatro tipos de sensores de temperatura requieren de un circuito adicional para poder interpretar las variaciones de la temperatura por medio de un voltaje, los termistores y los RTD requieren de un puente de wheatstone mientras que los termopares un circuito de amplificación; los de material semiconductor no requieren de ningún circuito adicional para entregar un valor interpretable. Tener que agregar un circuito adicional incrementa el costo y el espacio necesario para diseño.

Los sensores de temperatura de material semiconductor son baratos y su porcentaje de error es bajo (menor al dos por ciento). Su rango de medición de temperatura es aceptable (entre -50°C y -40°C). Se decidió utilizar el modelo LM60CIZ (figura 3.3(a)), además de sus características al ser de tipo semiconductor, por su respuesta en bajas temperaturas y su amplio rango de voltaje de polarización. El sensor que se escogió tiene las siguientes características:

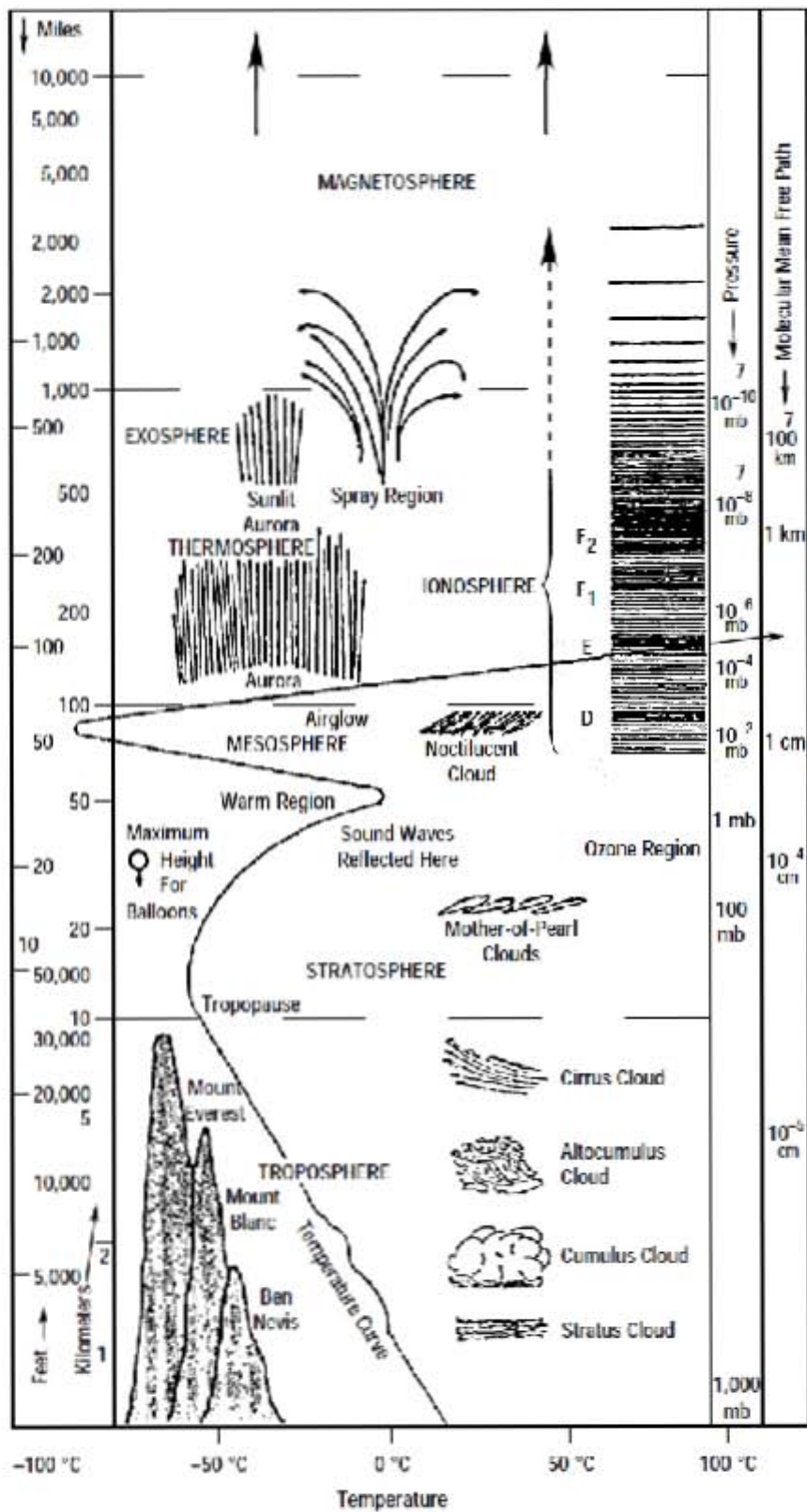


Figura 3.2: Presión y Temperatura Atmosférica [33]

Tabla 3.1: Análisis de sensores de temperatura

Tipo	Marca	Modelo	Rango [°C]	Presición	Tiempo de respuesta	Voltaje de suministro	Corriente suministro	Circuito adicional	Precio
RTD	Honeywell	700-102AAC-B00	-70 a 500		0.15 s		0.1 mA	Sí	\$6.65
RTD	Honeywell	HEL-777-A-T-0	-75 a 540	$\pm 2.0^\circ$	< 10 s		2 mA	Sí	\$14.71
RTD	VISHAY	PTS 0603	-55 a 155		< 2 s		0.2 mA	Sí	\$2.80
RTD	IST	P0K1.161.1E.B.200	-50 a 150				1 mA	Sí	\$21.08
Termistor	Honeywell	135-504QAG-J01	-60 a 300	$\pm 10\%$				Sí	\$1.65
Termistor	Honeywell	135-504QAG-J01	-60 a 125	$\pm 10\%$	10 s			Sí	\$4.00
Termistor	Honeywell	192-102DEW-A01	-60 a 150	$\pm 10\%$	15 s			Sí	\$4.45
Termistor	VISHAY	238161553472	-40 a 150	$\pm 5\%$				Sí	\$0.39
Termistor	Betatherm	30K6A1B	-80 a 150	$\pm 0.1^\circ C$				Sí	\$4.98
Termistor	Measurement Spec.	44004RC	-55 a 150	$\pm 1\%$				Sí	\$14.28
Termopar	TME	KA01	-50 a 250	$\pm 1.5^\circ C$	0.1 s			Sí	\$12.16
Termopar	Labfacility	CT-Z4-PFA-K-2	0 a 250					Sí	\$33.35
Termopar	Labfacility	C-K	-200 a 1372	$\pm 0.2^\circ$				Sí	\$68.09
CI	Microchip	MCP9701A	-40 a 150	$\pm 1^\circ C$	1.3 s	3.1 V - 5.5 V	$6\mu A$	No	\$0.31
CI	TI	LM35DZ	-55 a 150	$\pm 0.4^\circ C$		4 V - 30 V	$91.5\mu A$	No	\$1.57
CI	Analog Devices	AD22100ATZ	-50 a 150	$\pm 4^\circ C$		5 V	$500\mu A$	No	\$5.31
CI	ST microelectronics	LM335AZ	-40 a 100	$\pm 1^\circ C$	10 s		10 mA	No	\$1.22
CI	Nat. Semiconductor	LM60CIZ	-40 a 125	$\pm 3^\circ C$		2.7 V - 10 V	110 mA	No	\$0.87

Fabricante	National Semiconductor
Modelo	LM60CIZ del fabricante
Rango de medición	-40°C – 125°C
Precisión	±3°C
Sensibilidad	6.25 mV/°C
Rango de operación	-40°C – 125°C
Potencia	50 mW
Precio	\$1.01 USD

3.2.2. Corriente

Para monitorear el estado operativo de un satélite, conocer el nivel de corriente de diversos sistemas es esencial. Por medio de medir la corriente se puede monitorear el consumo en cada subsistema, dependiendo en donde se coloque el sensor, y así determinar la potencia que está demandando. Al conocer el nivel de consumo se puede determinar si un subsistema, componente o fuente está funcionando adecuadamente. Si la demanda es muy alta, es muy probable que se haya generado un corto; si la demanda es muy baja o nula, quizá lo monitoreado dejó de funcionar. Al monitorear corriente es importante asegurar que el sensor no interfiera con el flujo de ella. Si se llega a dañar el sensor es posible que se abra el circuito y por ende nada en esa línea funcionará. Es preferente utilizar un sensor que sea sensible a las líneas del campo electromagnético generadas por el paso de corriente. La principal desventaja de este tipo de sensores es la sensibilidad. Por el efecto que utilizan para poder hacer el monitoreo, a bajos niveles de corriente es muy débil la señal. La mayoría de los sensores son sensibles a variaciones mayores a un Ampere, esto da variaciones del orden de mili Volts por Ampere. La tabla 3.2 muestra diversos modelos de sensores de corriente.

Comercialmente podemos encontrar sensores de tipo: lazo cerrado, lazo abierto, de efecto hall y de campo. Por lo general los sensores de corriente están fabricados para medir valores de corriente mucho mayores a 1 A con valores hasta de 2000 A. Este tipo de sensores no nos son útiles ya que las corrientes que estaremos midiendo a bordo del satélite, considerando que genere entre 10 y 20 W a 12 V, a lo máximo serán de valores entre 0.8 A y 1.67 A. Si el rango de medición del sensor es demasiado grande la sensibilidad para valores muy bajos será casi imperceptible. Es importante considerar un sensor cuya sensibilidad sea adecuada para esta aplicación. Por lo general se monitorea la energía que está generando el arreglo de celdas solares, la energía que está entregando el banco de baterías, la magnitud de la corriente en un riel de voltaje específico o el consumo de un subsistema o instrumento en particular.

La practicalidad de los sensores de tecnología de lazo cerrado, lazo abierto y de efecto de campo es que el alambre puede ser simplemente pasado a través del sensor sin necesidad de incorporar el cable o pista por donde pasa la corriente al circuito del sensor. Esto permite cierta flexibilidad para mover el sensor de un alambre a otro. Se puede hacer un acoplador para tener una flexibilidad similar con los sensores de efecto Hall. Si el sensor de efecto Hall se daña, no habrá problema dado a que la pista que transporta la corriente está aislada del elemento sensor, por lo que aunque el sensor se dañe por alguna descarga, la pista que transporta la corriente no será dañada y

Tabla 3.2: Análisis de sensores de corriente

Tipo	Marca	Modelo	Rango [A]	Precisión	Salida	F de op [Hz]	T respuesta	I suministro	V suministro	Precio
Lazo Abierto	F.W. Bell	NA25	0 - 25	±1 %	22.5 - 62.5 mV			7 mA		14.91
Lazo Abierto	F.W. Bell	CS-150	1 - 150		Switch	6 - 100	250 ms			138.44
Lazo Abierto	Honeywell	CSLH3A45	±45	±0.06 %	18.5 mV N		3 μ s	11 mA	4.5 - 10.5	7.45
Lazo Cerrado	F.W. Bell	CLSM-100LA	±200	±0.5 %		DC - 200k	50 ns	15 mA	15 - 18	34.28
Lazo Cerrado	LEM	LTS 25-NP	±80	±0.2 %	25 mV/A	DC - 100k	400 ns	30 mA	4.75 - 5.25	24.09
Lazo Cerrado	Multicomp	QL100A	±150	±0.3 %		DC - 150k	2 μ s	9 mA	±12 - ±15	20.36
Efecto Hall	Honeywell	CSDA1BA	0.25 - 1		Analógico		100 μ s	12 mA	6 - 16	30.6
Efecto Hall	Honeywell	CSLA1CD	±57	±0.2 %	49.6 mV N		3 μ s	19 mA	8 - 16	17.71
Efecto Hall	Honeywell	CSLA2CD	±72	±0.2 %	32.7 mV N		3 μ s	20 mA	6 - 12	16.88
Efecto Hall	Multicomp	TH5A	3 - 30		Analógico	DC - 50k	5 μ s	12 mA	±14.25 - ±1575	10.03
Efecto Hall	Pololu	ACS714	±30		66 mV/A			13 mA	5	8.95
Efecto Hall	Allegro	ACS756SCA-100B-PFF-T	±100	±1 %		120 kHz		14 mA	3 - 5	6.44
Efecto Hall	Allegro	ACS712ELCTR-05B-T	±5	±1.5 %	185 mV/A	80 kHz	5 μ s	10 mA	5	3.72
Efecto de Campo	LEM	FHS 40-P/SP600	0 - 100	±1 %	50 mV/A	105 kHz	3 μ s	15 mA	5	6.58

no se producirá un circuito abierto. En cuanto a sensibilidad hay integrados con un rango más reducido, permitiendo una sensibilidad mayor, esto es esencial para medir corrientes menores a un ampere.

Los sensores de efecto de campo son los más seguros y flexibles por la posibilidad de simplemente aproximarlos a la pista de corriente que se quiere medir. La desventaja es que la medición varía de acuerdo a la distancia a la que es tomada la lectura, por un milímetro de variación puede variar en un 100 % la lectura. La estabilidad del sensor será clave para asegurar una lectura completa. En la tierra es posible fijar tal sensor, pero debido a las vibraciones a las que se enfrentará al viajar al espacio, es muy probable que se pueda mover si el sensor está solamente sobrepuesto o pagado. También habrá que integrarlo al circuito para asegurar una buena lectura. Es necesario que el campo generado sea de un valor alto para que se genere una salida medible ya que la sensibilidad de estos sensores es baja.

De acuerdo a los sensores analizados, se optará por un sensor de efecto Hall, el modelo será el ACS712ELCTR-05B-T(figura 3.3(b)) de la marca Allegro. Tiene la mejor sensibilidad entre los sensores analizados y su costo es el más bajo del grupo. Se necesitará diseñar un circuito que acondicione la señal de salida para mejorar la lectura y su conversión a un valor digital. Sus especificaciones son las siguientes:

Fabricante	Allegro
Modelo	ACS712ELCTR-05B-T
Rango	± 5 A
Precisión	± 1.5 %
Sensibilidad	185 mV/A
Rango de operación	$-40^{\circ}\text{C} - 85^{\circ}\text{C}$
Potencia	50 mW
Precio	\$3.72 USD

3.2.3. Presión

En una situación similar a la de los sensores de humedad, debido al caso AEMB-F1 y sus restricciones no se podrá utilizar ningún aparato que se comunique vía radio, anulando así, la oportunidad de utilizar un GPS. Esto genera una gran interrogante ¿cómo se va a determinar la posición del sistema durante el vuelo? Se pretende medir la presión atmosférica conforme el sistema va subiendo, haciendo correlación con valores tabulados de la altura/presión atmosférica y así determinar la altura del sistema por medio de una medición indirecta.

Una característica en común de sensores a base de mercurio, los tubos de Bourbón y los manómetros es que utilizan algún fluido como elemento sensible y ese mismo fluido como indicador. Esto lleva a que estos instrumentos sean voluminosos y susceptibles a derrames. Es poco probable que resistan las pruebas de vibración necesarias para poder ser enviados al espacio. Y en tierra necesitan estar bien niveladas y requieren de algún operador para poder interpretar la información. Aunque no necesiten suministro de energía, son poco prácticos para nuestro sistema. El dispositivo de alambre resonante es una propuesta interesante, poco propensa a cambios ambientales y de alta precisión, sin embargo, poco comercial. Debido a que tiene un fluido en

su interior, es posible que en alguna prueba de vibración el sensor se pueda descalibrar. Los sensores piezo-resistivos tienen un rango amplio de medición de presión y pueden ser modificados para medir ya sea presión: absoluta, gauge o diferencial. Son económicos y al ser hechos prácticamente de una sola pieza es muy probable a que puedan aprobar una prueba de vibración. Su costo es bajo y son altamente comerciales. Presentan una salida en voltaje equivalente a la presión medida y pueden ser fácilmente acondicionadas para ser procesadas. Analicemos algunos modelos de estos sensores en la tabla 3.3.

Dentro de la gran variedad de sensores de presión existentes, hay tanto de salida analógica como digital. Los sensores de salida digital son prácticos ya que entregan un valor digital sin necesidad de hacer ningún tipo de procesamiento, pero son hasta tres veces más caros que los sensores de salida analógica.

Se espera una variación de presión desde 3 mbar hasta 1 bar. Un sensor piezo-resistivo internamente tiene una membrana que se dobla de acuerdo a la presión que hay en cada uno de sus dos lados, en el sensor de tipo absoluto una de los lados de la membrana tiene una presión muy cercana al vacío. El sensor de presión absoluto nos servirá para medir las presiones muy bajas esperadas. Dentro de los sensores analizados en la tabla 3.3 se escogió el siguiente (figura 3.3(c)), especialmente por su tamaño comparado con los demás sensores de presión:

Fabricante	Freescalle
Modelo	MPXM2102AT1
Rango	20kPa – 100kPa
Sensibilidad	0.4 mV/kpa
Rango de operación	-40°C – 125°C
Potencia	60 mW
Precio	\$8.90USD

3.2.4. Humedad

Considerando el caso AEMB-F1 se ha determinado necesario monitorear los niveles de condensación dentro de la estructura. Debido a que el sistema atravesará aproximadamente treinta kilómetros de atmósfera, siendo expuesto casi directamente a las condiciones atmosféricas, habrá una variación en los niveles de condensación; tal condensación podrá provocar un corto circuito en alguna de las placas del sistema si las condiciones necesarias se presentan. El sensor de humedad ayudará a determinar cuáles fueron las condiciones dentro de la estructura si en dado momento se presenta una falla en el sistema. Al cuantificar el valor de la humedad se podrá determinar si habrá sido un factor influyente en el caso de haber una falla y determinar la tolerancia del sistema a la humedad. Comercialmente, es más común encontrar sensores de humedad capacitivos y de conductividad eléctrica. Los ópticos son demasiado caros y su precisión elevada no es necesaria para nuestro sistema. En la tabla 3.4 se compararán diversos modelos de sensores de humedad.

De acuerdo a la comparación, existe una variedad mucho más amplia de sensores de humedad capacitivos. De hecho, no se encontró ninguno de conductividad térmica.

Tabla 3.3: Análisis de sensores de presión

Tipo	Marca	Modelo	P min	P max	Sensibilidad	Salida	Resolución	I suministro	V suministro	Empaque	Precio
Diferencial	Freescale	MPX10D	0 kPa	10 kPa	3.5 mv/kPa	V. Analógico		6 mA	6	SIP	\$8.50
Diferencial	Freescale	MPX10DP	0 kPa	10 kPa	3.5 mv/kPa	V. Analógico		6 mA	6	SIP	\$7.98
Gauge	Freescale	MPX10GP	0 kPa	10 kPa	3.5 mv/kPa	V. Analógico		6 mA	6	SIP	\$8.50
Diferencial	Freescale	MPX2050D	0 kPa	50 kPa	0.8 mV/kPa	V. Analógico		6 mA	10 - 16	SIP	\$11.94
Diferencial	Freescale	MPX2050DP	0 kPa	50 kPa	0.8 mV/kPa	V. Analógico		6 mA	10 - 16	SIP	\$11.94
Gauge	Freescale	MPX2050GP	0 kPa	50 kPa	0.8 mV/kPa	V. Analógico		6 mA	10 - 16	SIP	\$11.94
Absoluto	Freescale	MPX2102ASX	0 kPa	100 kPa	0.4 mV/kPa	V. Analógico		6 mA	10 - 16	SIP	\$8.51
Gauge	Freescale	MPX2102GP	0 kPa	100 kPa	0.4 mV/kPa	V. Analógico		6 mA	10 - 16	SIP	\$11.94
Gauge	Freescale	MPX2202GP	0 kPa	200 kPa	0.2 mV/kPa	max 40 mV		6 mA	10 - 16	SIP	\$9.79
Absoluto	Honeywell	ASDXACX015PA2A5		15 psi		I2C - SPI	12 bits	3.5 mA	5	DIP	\$33.83
Absoluto	Honeywell	ASDXACX100PA7A5		100 psi		I2C - SPI	12 bits	3.5 mA	5	DIP	\$43.35
Absoluto	Honeywell	HSCMAND015PASA5	0 psi	15 psi		I2C - SPI	12 bits	2 mA	5	SMT	\$56.44
Absoluto	Honeywell	HSCSANN150PA2A5	0 psi	150 psi		I2C	12 bits	2 mA	5	SIP	\$37.96

Tabla 3.4: Análisis de sensores de humedad

Tipo	Marca	Modelo	Capacitancia	Precisión	respuesta [s]	Salida	resolución	I suministro	V suministro	Empaque	Precio
Capacitivo	Honeywell	HCH-1000-001	300-330-360	$\pm 2\%$	15	Capacitancia				TH	\$4.59
Capacitivo	General Electric	CHIPCAP-D	100-220-470	$\pm 2\%$		Digital (manchester)	8 bits	0.5 mA	5	SOP 14	\$39.53
Capacitivo	Honeywell	4010-001		$\pm 3\%$	5	0.7 - 3.5 V		0.2 mA	5.8	SIP	\$17.16
Capacitivo	Honeywell	4000-001		$\pm 3\%$	15	V analógico		0.5 mA	5.8	SIP	\$20.05
Capacitivo	Honeywell	HIH-6130-021-001		$\pm 4\%$	6	I2C - SPI	14 bits	0.65 mA	2.3 - 5.5	SOIC - 8	\$16.66
Capacitivo	Honeywell	HIH-6121-021-001		$\pm 4\%$	6	I2C - SPI	14 bits	0.65 mA	2.3 - 5.5	SIP - 4	\$23.28
Capacitivo	Humirel	HS1101	177-180-183	$\pm 1.5\%$	5	Cto ext			5	TH	\$8.99
Cond. Eléctrica	Multicomp	HCZ-H8-B		$\pm 3\%$		Resistencia		0.2 mA	1	TH	\$1.85

La precisión de los sensores es buena, en promedio todos tienen un valor de 2.8 % que es aproximadamente lo que indicaba la teoría de dichos sensores. Aún así, sí existe un rango de precios diverso, es evidentemente mucho más barato el sensor a base de conductividad eléctrica, pero hay que recordar que habrá que implementar un circuito externo para poder medir un voltaje proporcional a la variación de humedad. La ventaja de los capacitivos es que la mayoría entregan un voltaje proporcional. Para los que entregan un valor de capacitancia habrá que diseñar o comprar algún circuito capaz de medir esa capacitancia, es más complicado realizar esta medición y si se compra también tal circuito será más costoso. Entonces volviendo a los sensores capacitivos que entregan un voltaje proporcional, éstos parecen ser los más adecuados para nuestro sistema. No requieren ningún circuito externo y tampoco gran acondicionamiento de la señal.

Por esto se propone utilizar el sensor de humedad de tipo capacitivo de la marca Honeywell, modelo: 4010-001 (figura 3.3(d)). Tal sensor produce una señal de salida de voltaje proporcional a la humedad relativa, su respuesta está entre las más rápidas de los sensores comparados y su rango de precio es medio y su precisión es buena. Tal sensor no requiere de un circuito externo y su acondicionamiento es mínimo. Sus especificaciones son las siguientes:

Fabricante	Honeywell
Modelo	HIH-4010-001
Rango	0 %RH - 100 %RH
Sensibilidad	$\pm 3\%$
Rango de operación	$-40^{\circ}\text{C} - 85^{\circ}\text{C}$
Potencia	1 mW
Precio	\$25.76 USD

3.2.5. Aceleración

Como parte del futuro diseño del sistema de control y estabilización del satélite *Quetzal*, se busca validar el funcionamiento de algún dispositivo capaz de medir variaciones de fuerzas de aceleración. En el vuelo AEMB-F1 se utilizará para monitorear las fuerzas que se ejercen sobre la estructura. El equipo de diseño del sistema de control y estabilización ha sugerido un sensor para tal propósito, el sensor que se va a utilizar es el siguiente (figura 3.3(e)):

Fabricante	Freescale
Modelo	MMA7361L
Rango	$\pm 1.5\text{g} \ \& \ \pm 6\text{g}$
Sensibilidad	800mV/g
Rango de operación	$-40^{\circ}\text{C} - 85^{\circ}\text{C}$
Potencia	2.5 mW
Precio	\$240MXN

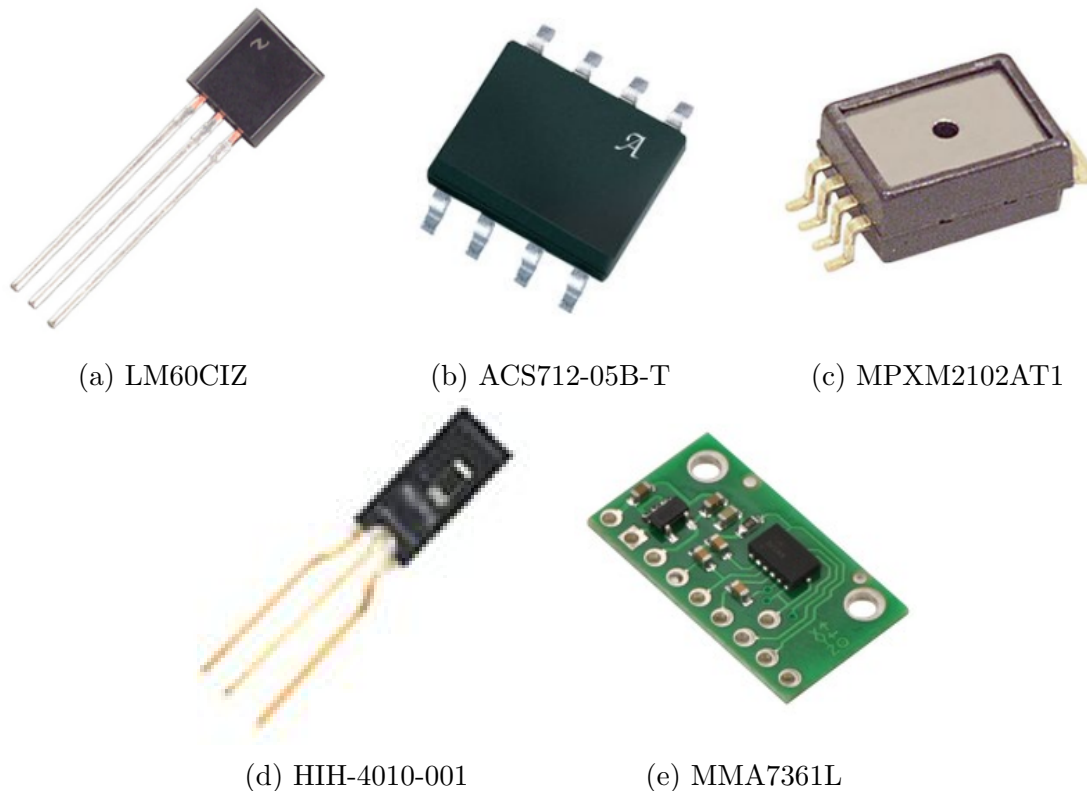


Figura 3.3: Sensores seleccionados

3.3. Desarrollo de circuitos para acondicionamiento de señales

3.3.1. Diseño de Filtro

Todos los sensores que se van a utilizar en el sistema entregan una señal DC, su variación depende de la rapidez en el cambio del parámetro que monitorean, los cambios que se esperan son muy graduales. Con esta base se analizó el espectro en frecuencia de los diversos sensores para determinar qué tan susceptibles son al ruido y poder acondicionar la señal a su salida.

Todos los sensores tienen ruido en frecuencias altas, aunque la magnitud de las componentes espectrales fue en general menor, la potencia del ruido cercano a la componente DC en los sensores de corriente y presión comienza a aproximarse mucho a la fundamental, esto genera variaciones ligeras en la señal DC lo cual es perceptible por el ADC. Filtrar las frecuencias mayores a la componente fundamental ayudará a eliminar tal ruido para obtener una señal mucho más plana. Considerando que el espectro resultante de todos los sensores es similar y todos trabajan en DC, se diseñó un solo filtro para los diversos sistemas.

Antes de diseñar el filtro hay que considerar dónde será ubicado el filtro en el sistema. Dado a que es impráctico y costoso poner un filtro por cada sensor (considerando que serán 43), se pondrán a la salida de los multiplexores (6 en total).

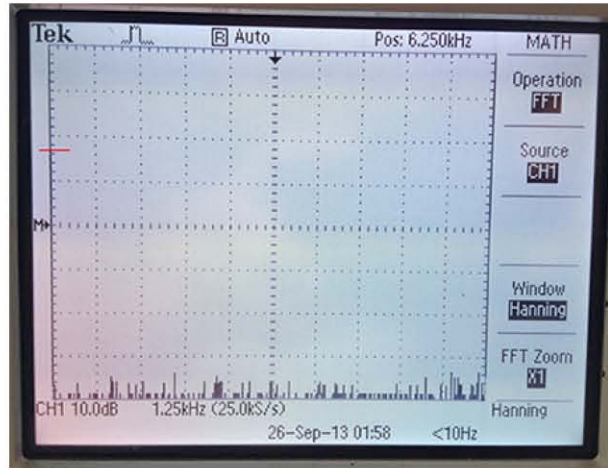


Figura 3.4: Espectro en frecuencia del sensor de temperatura 1.25 kHz/div

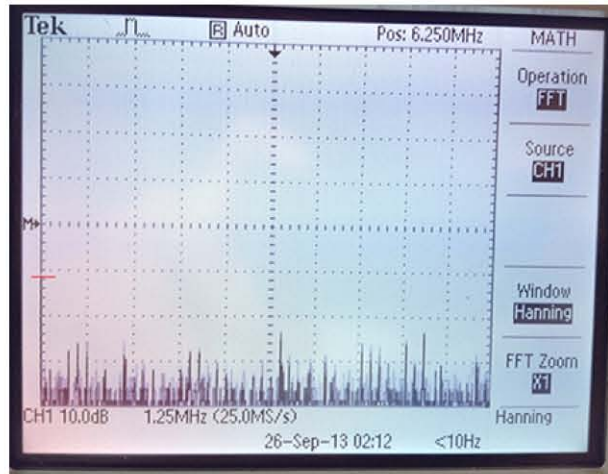


Figura 3.5: Espectro en frecuencia del sensor de corriente 1.25 MHz/div

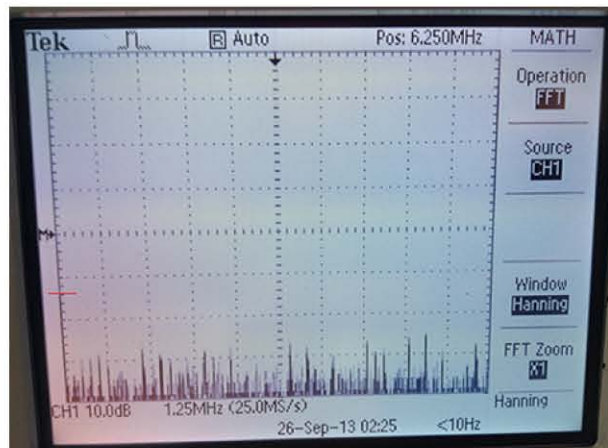


Figura 3.6: Espectro en frecuencia del sensor de presión 1.25 MHz/div

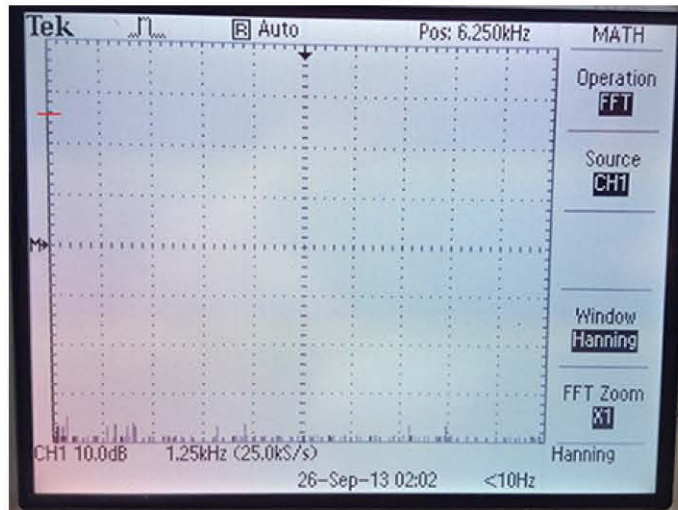


Figura 3.7: Espectro en frecuencia del sensor de humedad 1.25 kHz/div

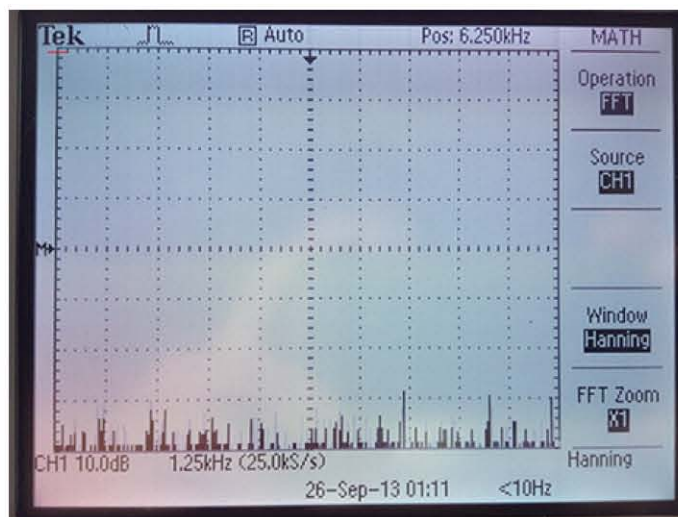
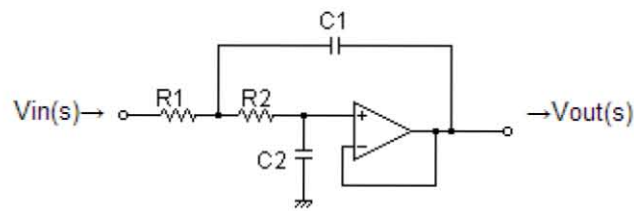


Figura 3.8: Espectro en frecuencia del acelerómetro 1.25 kHz/div

Para este caso, el filtro que se necesita es de tipo paso bajas, ya que se estará trabajando con la componente de directa. Para evitar cualquier tipo de interferencia por señales de ruido, se propuso diseñar el filtro a 1 Hz, así, no se afectará la variación natural de la señal y al actuar señales de frecuencias superiores, por la acción de la función del filtro, éstas estarán suprimidas.

Hay diversas respuestas en frecuencia de filtros activos, por ejemplo, Butterworth, Chebyshev y Bessel. Estos filtros se pueden implementar en una topología de tipo Sallen-Key o de Realimentación múltiple. Se decidió utilizar la configuración de Sallen-Key. Las ventajas de ésta configuración son la sencillez de su diseño, cálculo simple, su caída es de segundo orden y permite una ganancia unitaria. Por medio de diversas consideraciones se puede simplificar mucho el diseño del filtro, por ejemplo, al considerar del mismo valor las resistencias y los capacitores.



Transfer Function

$$G(s) = \frac{100}{s^2 + 20s + 100}$$

Cut-off frequency

$$f_c = 1.59154943092[\text{Hz}]$$

Figura 3.9: Configuración del filtro

Buscando implementar un filtro paso bajas para DC, se diseñó uno a 1 Hz. Utilizando valores de componentes comerciales se obtuvo el circuito de la figura 3.9. Los valores de los componentes son: $R1 = R2 = 100 \text{ k}\Omega$ y $C1 = C2 = 1 \mu\text{F}$ a fin de simplificar los cálculos. Se puede observar el diagrama del circuito en la figura 3.9, también se muestra la función de transferencia y la frecuencia de corte de acuerdo a los valores comerciales utilizados.

3.3.2. Acondicionamiento para el sensor de temperatura

El sensor de temperatura LM60-CIZ tiene un rango de operación entre los -40°C y los 125°C , esto genera una señal de 174 mV hasta 1205 mV. Dado a que la sensibilidad por grado centígrado es de 6.23 mV y el ADC percibe cambios de 4.88 mV fácilmente se pueden detectar cambios de un grado. Se podría amplificar el rango completo cuatro veces resultando en un sistema cuyo rango varía de 0.696 V hasta 4.82 V que permitiría lecturas de aproximadamente un cuarto de grado, pero implicaría agregar un amplificador y los demás dispositivos que se utilizan para configurarlo. Es un desperdicio de espacio en la placa, y detectar variaciones tan pequeñas no es requisito para esta misión.

Otro factor a considerar es la ubicación de estos sensores. Se busca determinar el comportamiento térmico de la estructura y de diversos dispositivos importantes, para poder monitorear tales puntos hay que colocar al sensor directamente sobre el punto de interés y para esto es necesario tener una conexión física del sensor al sistema de adquisición de datos. El sensor va a necesitar tres conexiones: VCC, GND, y la señal de información; esto es, tres cables con longitudes desde los 10 cm hasta 63 cm cada uno. Es por medio de estos cables sueltos que se puede meter ruido a la señal de información. Para prevenir, en la medida de lo posible este fenómeno, se trenzarán los cables de cada sensor y se mantendrán de la longitud más corta posible.

3.3.3. Acondicionamiento para el sensor de corriente

El sensor de corriente está construido de tal manera que el circuito sensor y la corriente que atraviesa a través de él para ser monitoreada están completamente aislados por la tecnología que utiliza (efecto Hall). Esto va a prevenir fallas, si el sensor deja de funcionar no afectará el paso de la corriente y el circuito no será abierto. El modelo ACS712ELCTR-05B-T, por ser un sensor que utiliza el efecto Hall para funcionar, genera una variación en la salida del sensor muy pequeña, del orden de 185 mV/A, esto es, 18.5 mV por cada 100 mA. Aunque el sensor soporta corrientes de hasta 5 A dando un rango completo de 0 V - 925 mV, las corrientes que el sistema monitorea por lo general están por debajo de los 100 mA permitiendo un rango de cuantificación de aproximadamente 19 mV, resultando en una resolución muy baja al hacer la conversión con el ADC. La manera de solucionar esto es con unos amplificadores de señal. Hay que tomar en cuenta el valor de corriente máximo esperado y a partir de este valor determinar la ganancia máxima que se le puede dar a la señal. Existe un inconveniente de hacer tal operación con este sensor en particular, el sensor tiene un offset con valor de la mitad de su voltaje de polarización. Al amplificar la señal, también se amplificará el offset, rebasando el valor máximo del ADC (5V) rápidamente; si se polariza al sensor con 5 V habrá un offset de 2.5 V (la mitad de VCC), al amplificar por dos ya habrá superado el valor máximo que permite el ADC. Hay que encontrar la manera de reducir o eliminar el offset.

Una manera práctica de eliminar el offset es con un amplificador de instrumentación. Como tal configuración tiene un alto rechazo al modo común, la señal a su salida resta las dos señales entrantes y amplifica la diferencia. Con el amplificador, si a la señal que genera el sensor le restamos un valor equivalente al offset, el offset se eliminará y se podrá amplificar el verdadero incremento de la señal directamente.

Observando el comportamiento del amplificador de instrumentación por medio de la expresión 3.1, antes de determinar que ganancia dar al circuito hay que determinar cuáles son las dos señales que van a entrar al amplificador. De acuerdo a la expresión, V_2 deberá ser mayor que V_1 para que se pueda realizar la resta y no generar un valor negativo (región donde no funcionará el circuito amplificador). Si lo que se busca es eliminar el offset, una de las señales entrantes deberá ser de la magnitud del offset generado por el sensor, si el sensor se polarizará con 5 V y el offset es la mitad, se espera un offset de 2.5 V. Entonces, retomando la expresión 3.1 se determinan las señales V_1 y V_2 como se ve en la expresión . La señal que proviene del sensor, V_{in} , está compuesta en parte por la variación de voltaje debida a la corriente detectada y en parte por el offset (expresión 3.2).

Se pueden utilizar resistencias para hacer un divisor de voltaje pero por los valores de las tolerancias de las resistencias es difícil hacer un divisor preciso y como se va a trabajar con una variación de señal muy pequeña, fácilmente se puede perder la señal útil al restar voltaje de más o generar información errónea al ser un valor menor. Se puede generar tal voltaje mediante un potenciómetro en configuración de divisor directamente al voltaje de polarización, el valor es más estable y hay modelos muy precisos.

Con valores de corriente de 1 A se generará una señal de 0.185 V en la salida

del sensor. Debido a las limitaciones de los amplificadores operacionales, al amplificar señales de DC, estos solo son capaces de entregar un valor amplificado equivalente a aproximadamente al 73 % de su voltaje de polarización, es decir, si se polariza con 5 V entregará un valor máximo de 3.65 V. Utilizando la simplificación de la expresión 3.1, donde $R_1 = R_3$, $R_4 = R_5$ y $R_6 = R_7$ y todas con un valor de 100 k Ω , y con una resistencia de ganancia (R_2) con valor de 10 k Ω (ver expresión 3.3 y figura 3.10), el circuito genera una ganancia de 21 (ver expresión 3.4) generando un valor máximo de 3.885 V, un valor dentro del rango del ADC capaz de generar buena resolución. Aunque al medir 1 A se saldría del rango del amplificador operacional, se está considerando que en el sistema de monitoreo no habrá valores de corriente mayores al 80 % de 1 A, se utilizará ésta consideración para la expresión 3.5. Tal consideración resulta como un valor máximo de 3.108 V a la salida del amplificador como en la expresión 3.6.

$$V_o = (V_2 - V_1) \times \left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right) \times \frac{R_4}{R_6} \quad (3.1)$$

$$V_{in} = (\text{var. sensor}) + (\text{offset}) \quad (3.2)$$

$$V_o = (V_{in} - 0.5V_{cc}) \left(1 + \frac{200k}{10k}\right) \left(\frac{100k}{100k}\right) \quad (3.3)$$

$$V_o = (V_{in} - 0.5V_{cc}) (21) \quad (3.4)$$

$$V_o = \{[(0.8 \times 0.185) + 2.5] - 2.5\} (21) \quad (3.5)$$

$$V_o = 3.108[V] \quad (3.6)$$

Aunque el circuito funciona, si el divisor no está exactamente al valor del offset no funcionará adecuadamente el circuito, considerando que la precisión lograda con los potenciómetros es muy pobre, se propuso una modificación. La configuración del circuito es igual, con la misma ganancia, se intercambiaron las fuentes de voltaje. Ahora el divisor tendrá un valor igual al offset sumado con el valor máximo que entregará el sensor, conforme aumente el voltaje a la salida del sensor ira disminuyendo el valor en la salida, esto da la ventaja de poder ser más flexibles con el valor de DC que eliminará el offset. Aunque se pase del valor definido, no se perderá la señal del sensor y se podrán hacer las correcciones necesarias después. Las figura 3.11 muestra el nuevo comportamiento del sistema. La magnitud del voltaje del offset determinará desde que valor va a ir disminuyendo el voltaje de salida del circuito. En la tabla 3.5 se comparan las diferencias entre las dos configuraciones presentadas.

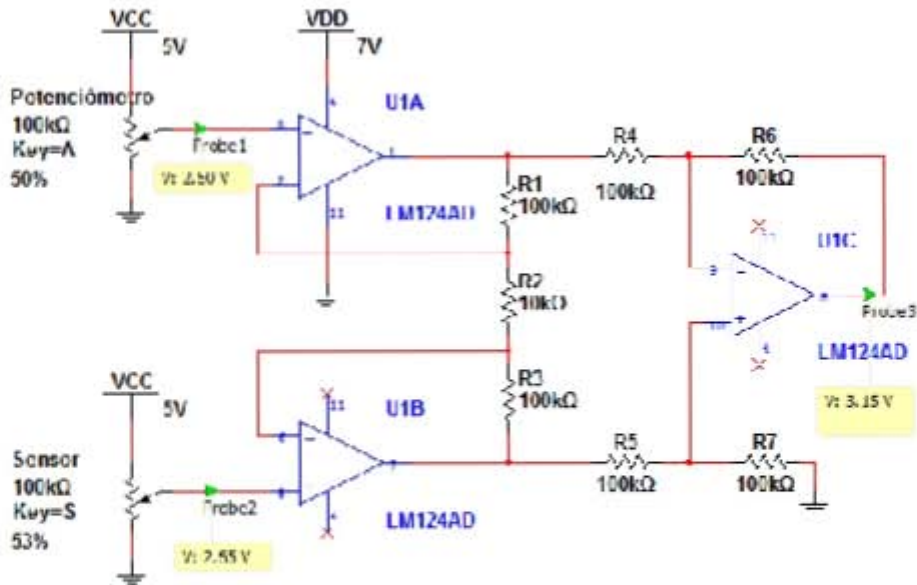


Figura 3.10: Circuito de acondicionamiento del sensor de corriente ($i = 0.8 \text{ A}$)

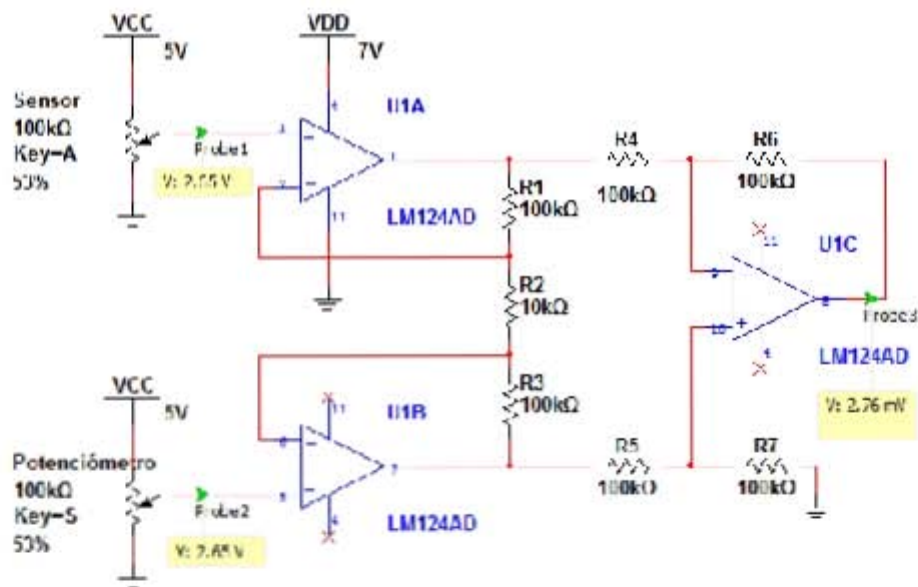


Figura 3.11: Circuito de acondicionamiento del sensor de corriente ($i = 0.8 \text{ A}$) 2

3.3.4. Acondicionamiento para el sensor de presión

La salida del sensor de presión, a diferencia de los demás sensores, es diferencial. Se podría decir que el modelo MPXM2102AT1 tiene dos salidas y se genera una pequeña diferencia de voltaje al variar la presión. Probablemente cada salida refleja la posición de un lado de la membrana al ir variando a consecuencia de la presión ejercida sobre ella. El orden que entregan cada una de estas terminales es de aproximadamente la mitad del voltaje de polarización del sensor como offset y un voltaje pequeño

de diferencia en cada uno (aproximadamente entre 5 y 6 V dependiendo del valor de polarización). Al medir la diferencia de potencial entre las dos terminales conoceremos obtendremos el valor correspondiente a la variación de presión. El rango del voltaje diferencial que será medido está definido desde los 0 V hasta 40 mV, permitiendo una lectura desde 0 hasta 100 kPa como se ve en la figura 3.12.

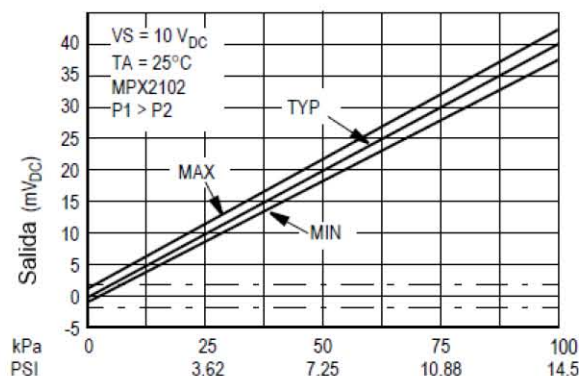


Figura 3.12: Caracterización del sensor de presión

Siempre es recomendable aumentar la resolución posible de la señal, al generar un voltaje máximo de 40 mV este sensor va a necesitar amplificación, pero al ser una salida diferencial no se puede amplificar como se amplifica cualquier otra señal, hay que amplificar la señal por medio de una configuración que pueda amplificar tal diferencia. De nuevo, la configuración necesaria es un amplificador de instrumentación. Al darle una ganancia de 100 se podrá alcanzar un valor máximo de 4 V, suficiente para aumentar considerablemente la resolución y con una operación matemática sencilla regresarla al valor original para su interpretación.

Haciendo la consideración de que los 3 pares de resistencias $R_1 = R_3$, $R_4 = R_5$, y $R_6 = R_7$ son del mismo valor entre sí, la expresión que describe al amplificador de instrumentación se simplifica a la expresión 3.1. La ganancia de 100 que se propone se logrará calculando variando los valores de R_1 con R_3 y R_2 (que es la resistencia de ganancia), por lo que habrá que considerar una relación de 1 a 100 para el valor de tales resistencias. Se recomienda utilizar valores de resistencia altos para evitar demandas de corriente por lo que se definirá a R_1 y R_2 con el valor de 1 M Ω . Por la relación descrita, R_2 deberá ser del orden de 10 k Ω . Hay que considerar que R_1 está siendo afectada por un 2 (como se ve en la expresión), habrá que compensar el

Tabla 3.5: Comparación entre los dos circuitos de acondicionamiento para el sensor de corriente

Config.	Fuente	V_1	Fuente	V_2	V_o
1	Potenciómetro	2.5 V	Sensor	2.5 V	2.76 mV
1	Potenciómetro	2.5 V	Sensor	2.65 V	3.15 V
2	Sensor	2.5 V	Potenciómetro	2.65 V	3.15 V
2	Sensor	2.65 V	Potenciómetro	2.65 V	2.76 mV

valor de R_2 por un factor de 2 también, dando un valor de R_2 del orden de 20 k Ω . No hay resistencias comerciales con el valor de 20 k Ω , las opciones más cercanas son 18 k Ω y 22 k Ω . Si se considera el valor de 22 k Ω , la señal resultante estará debajo del valor de 4 V propuesto, con 18 k Ω estará un poco sobrado pero aprovechará de mejor resolución y se mantendrá dentro del límite de voltaje aceptado por el ADC. Las resistencias R_4 y R_6 se proponen de 100 k Ω . La ganancia del sistema será de 112.11 descrito en la expresión 3.9 en base a la simplificación de la configuración descrita en la expresión y se tendrá un voltaje de 4.48 V a la salida cuando el voltaje diferencial alcance su valor máximo de 40 mV.

$$G = \left(1 + \frac{2 \times R_1}{R_g}\right) \times \left(\frac{R_3}{R_2}\right) \quad (3.7)$$

$$G = \left(1 + \frac{2 \times 1 \times 10^6}{18 \times 10^3}\right) \times \left(\frac{100 \times 10^3}{100 \times 10^3}\right) \quad (3.8)$$

$$G = 112.11[\text{factor de ganancia}] \quad (3.9)$$

La figura 3.13 muestra el esquema del circuito propuesto utilizando tres de los cuatro amplificadores operacionales contenidos en el circuito integrado LM124 y las resistencias correspondientes. Tal circuito fue simulado y se obtuvo el comportamiento característico descrito en la figura 3.14. Para que este circuito funcione adecuadamente hay que considerar que cada terminal que compone la salida diferencial entrega un voltaje de magnitud cercana a los 6 V. Si los amplificadores operacionales no están polarizados con un valor suficientemente grande no funcionará adecuadamente el circuito, después de algunas pruebas se consideró que lo más recomendable es utilizar un valor equivalente al doble de lo que entregan las terminales, es decir, con el mismo valor con que se polarizó el sensor. El modelo LM124 soporta hasta 32 V para ser polarizado.

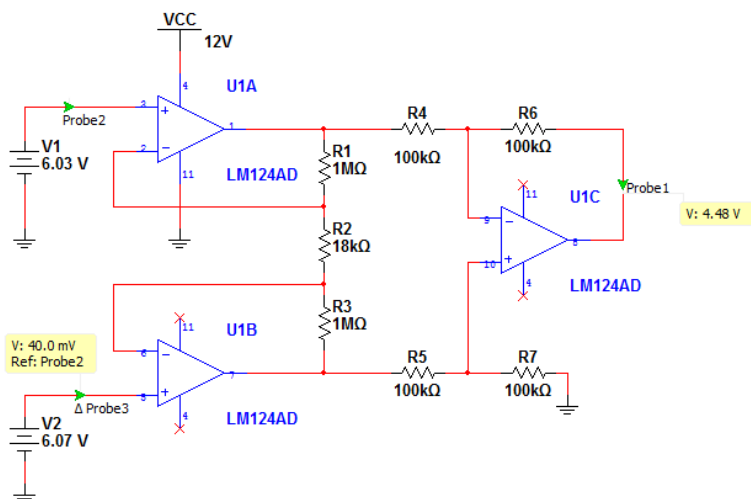


Figura 3.13: Acondicionamiento para el sensor de presión

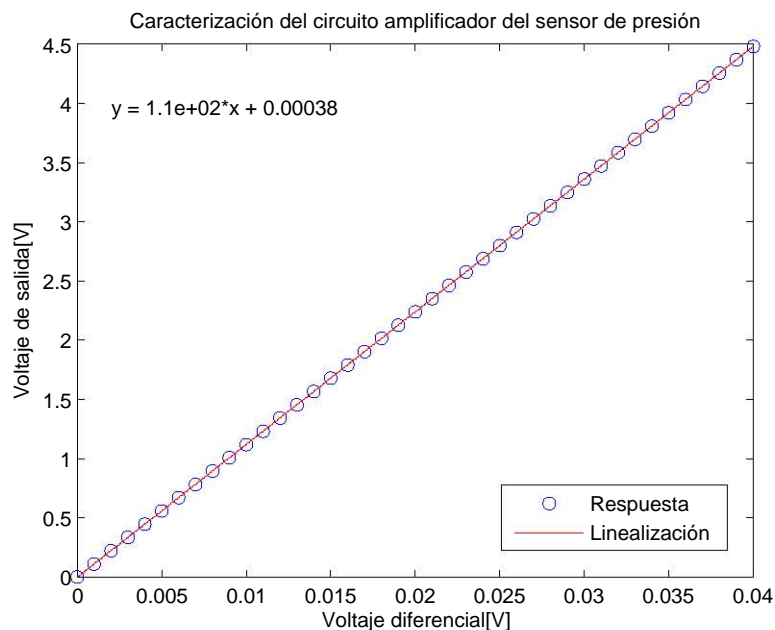


Figura 3.14: Caracterización del circuito de acondicionamiento del sensor presión

3.3.5. Acondicionamiento para el sensor de humedad

El sencillo de usar HIH-4010-001, entrega a la salida un rango de voltaje desde aproximadamente 0.7 V hasta los 3.8 equivaliendo a un rango de 0 a 100 % de humedad relativa. La señal de tal sensor está ideal para ser procesada por el ADC, permitiendo buena resolución. Similar a los sensores de temperatura, los sensores de humedad serán colocados en diversos puntos del sistema. Habrá que tomar las precauciones necesarias al utilizar cables largos (cables lo más cortos posibles, pares trenzados, etc.). Tal sensor no necesitará de acondicionamiento especial, con buena conexión a tierra y el filtro adicional está listo para entregar una señal útil.

3.3.6. Acondicionamiento para el sensor de aceleración

El sensor entrega una señal equivalente a la magnitud de las fuerzas de aceleración que actúan sobre el en tres ejes (x, y, z). Se genera muy poco ruido en el sensor, la componente fundamental tiene una magnitud mucho mayor que las de ruido y dado a que estará montado directamente a la placa, es poco susceptible a ruido externo. No necesitará un filtro adicional. El rango completo es de 0 a 3.3 V, un valor aceptable para ser procesado por el ADC. Tal sensor no necesitará circuitos adicionales.

3.4. Procesamiento de la información

3.4.1. Procesamiento de la señal de temperatura

De acuerdo a las pruebas que realiza el fabricante, la función que determina la salida del sensor se expresa en la expresión 3.10. Nos interesa saber el factor que genera tal salida, la temperatura que mide, definida por T . Despejando T obtenemos la expresión 3.11. Sin embargo el valor que obtendremos del ADC será un valor digital y en la escala de volts. Hay que transformar el valor obtenido por el ADC a un valor compatible con las unidades de la expresión 3.10. Para transformar el valor digital se utiliza la regla de tres para convertir el valor de la escala digital a un valor voltaje, después convertir ese valor de volts a mili-volts. Haciendo estas operaciones llegamos a la expresión 3.12. Con la expresión 3.12 podemos procesar directamente la señal obtenida por el sistema de adquisición de datos a un valor entendible con $^{\circ}\text{C}$ como unidad.

$$V_o = \left(6.25 \frac{mV}{^{\circ}C} \right) + 424mV \quad (3.10)$$

$$T = \frac{V_o - 0.424}{0.00625} \quad (3.11)$$

$$T = \frac{V_{ADC} - 86.8352}{1.2288} \quad (3.12)$$

Se realizaron pruebas de caracterización en el laboratorio con el fin de modelar el comportamiento del sensor bajo condiciones controladas (figura 3.15). La temperatura fue variada desde los 0°C a los 70°C . La figura 3.16 muestra el comportamiento del sensor comparado con un termómetro. La caracterización obedece el comportamiento de la expresión 3.13. Se determinó utilizar la expresión 3.15 como base del algoritmo de procesamiento para el sensor de temperatura.

$$T = \frac{V_o - 0.42}{0.0061} \quad (3.13)$$

$$T = \frac{\frac{V_{ADC} \times 5}{1024} - 0.42}{0.0061} \quad (3.14)$$

$$T = \frac{V_{ADC} - 86.016}{1.29024} \quad (3.15)$$

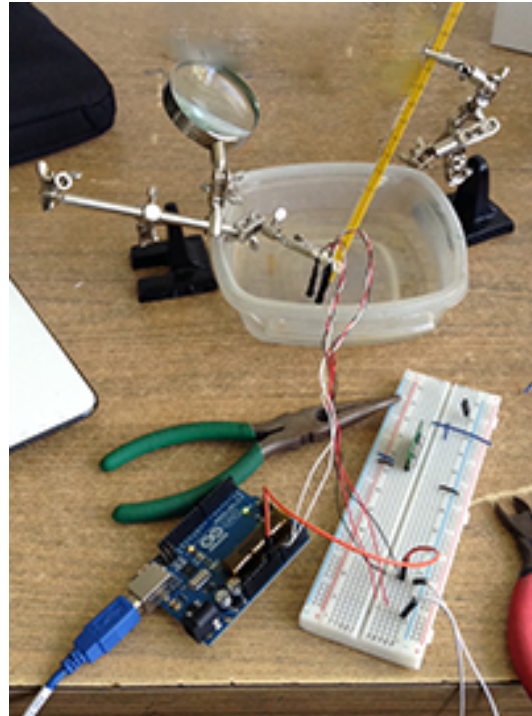


Figura 3.15: Prueba de caracterización para el sensor de temperatura

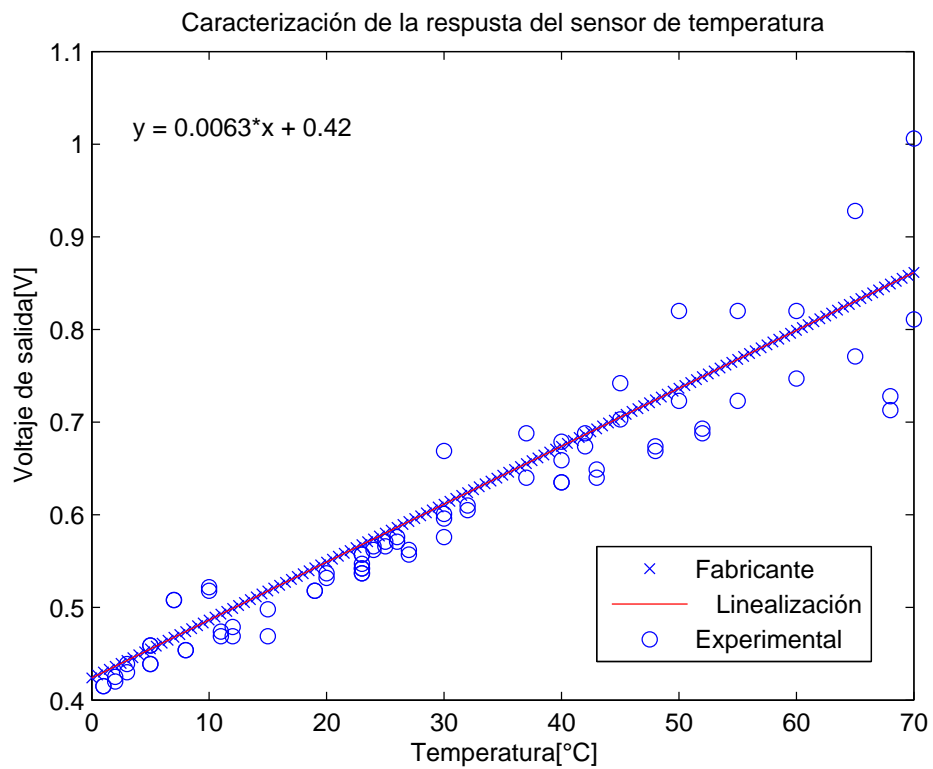


Figura 3.16: Caracterización del sensor de temperatura LM60-CIZ

3.4.2. Procesamiento de la señal de corriente

Aunque el fabricante nos da la relación de la respuesta esperada del sensor de corriente (185 mV/A) hay que considerar que se le agregó un circuito adicional para su acondicionamiento.

Se realizó una prueba detallada de la respuesta del sensor de corriente. La figura 3.17 vemos la respuesta del sensor de corriente al hacer variar la magnitud de la corriente que lo atraviesa. Por medio del método de regresión lineal se determinó la expresión 3.17 que modela el comportamiento del sensor. Para poder hacer el procesamiento con el valor entregado por el ADC, se podrá emplear la expresión 3.18.

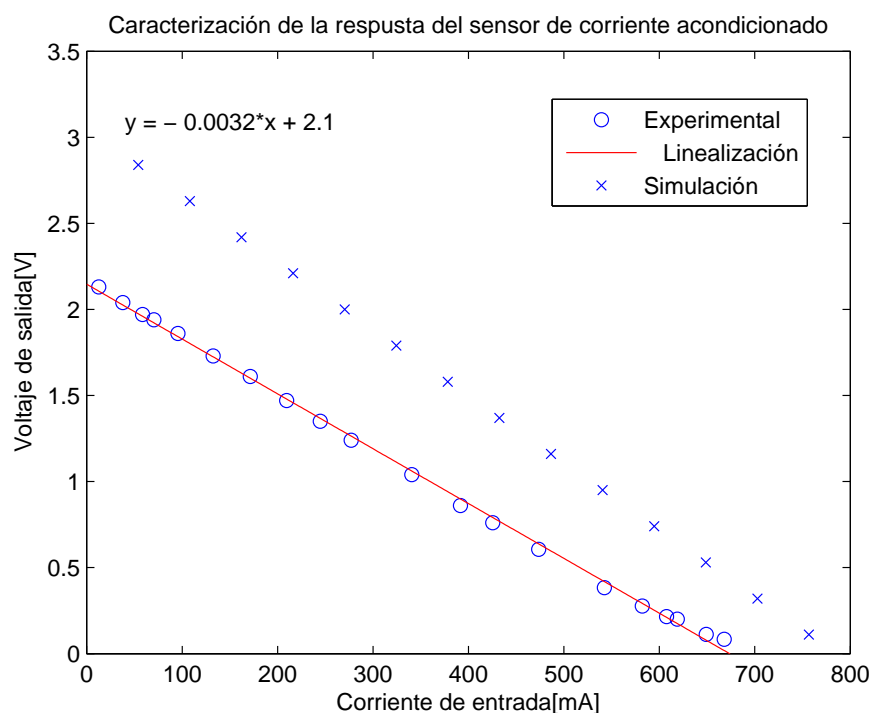


Figura 3.17: Comparación entre la implementación del circuito acondicionador del sensor de corriente y su simulación

$$i_{in} = \frac{V_o - 2.1}{-0.0032} \quad (3.16)$$

$$i_{in} = \frac{\frac{V_{ADC} \times 5}{1024} - 2.1}{-0.0032} \quad (3.17)$$

$$i_{in} = \frac{V_{ADC} - 430.08}{-0.65536} \quad (3.18)$$

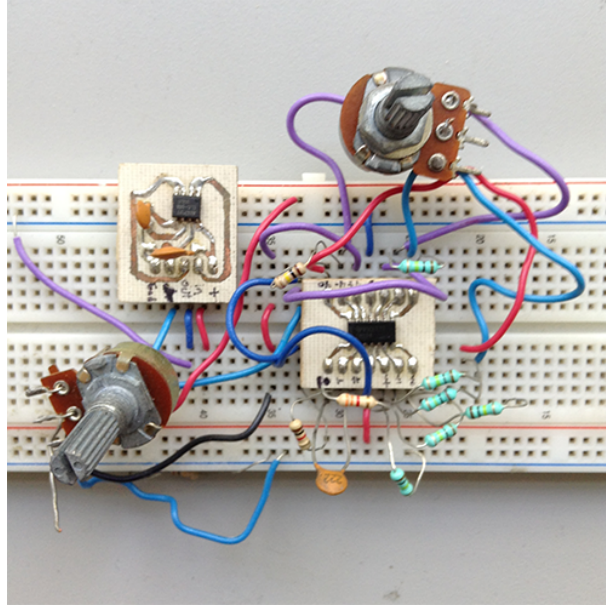


Figura 3.18: Prueba de caracterización para el sensor de corriente

3.4.3. Procesamiento de la señal de presión

Se diseñó un circuito que acondiciona la señal diferencial que entrega el sensor de corriente, pero ahora hay que caracterizar tal salida con respecto a la señal original, la presión. El fabricante provee una caracterización de su sensor (véase la figura 3.12, se observa que tiene un comportamiento lineal, al igual que la respuesta de salida. Hay que igualar las ecuaciones que modelan el comportamiento del sensor y del circuito acondicionador para tener la relación entre presión medida y el voltaje de salida. La expresión 3.19 describe el comportamiento del sensor, la expresión 3.20 representa la respuesta característica del circuito de acondicionamiento. Si se sustituye la expresión 3.19 en la expresión 3.20 se obtiene la expresión 3.21, con esta igualdad ya tenemos una relación entre las variables de la presión [P] y el voltaje a la salida del circuito acondicionador [V_o]. Dado a que es de interés para nuestro sistema entregar un valor de presión, se despejó la variable de presión como se ve en la expresión 3.22 y se sustituyó el valor del voltaje de salida por la cuantización que realiza el ADC, resultando en la expresión 3.23. Esta última es la igualdad que se podrá utilizar para el algoritmo de procesamiento en el sistema. Se puede observar la respuesta del circuito de presión en la figura 3.19

$$V_{dif} = \frac{1}{2500}P \quad (3.19)$$

$$V_o = 110V_{dif} + 0.00038 \quad (3.20)$$

$$V_o = 0.044P + 0.00038 \quad (3.21)$$

$$P = \frac{V_o - 0.00038}{0.044} \quad (3.22)$$

$$P = \frac{V_{ADC} - 0.77824}{9.0112} \quad (3.23)$$

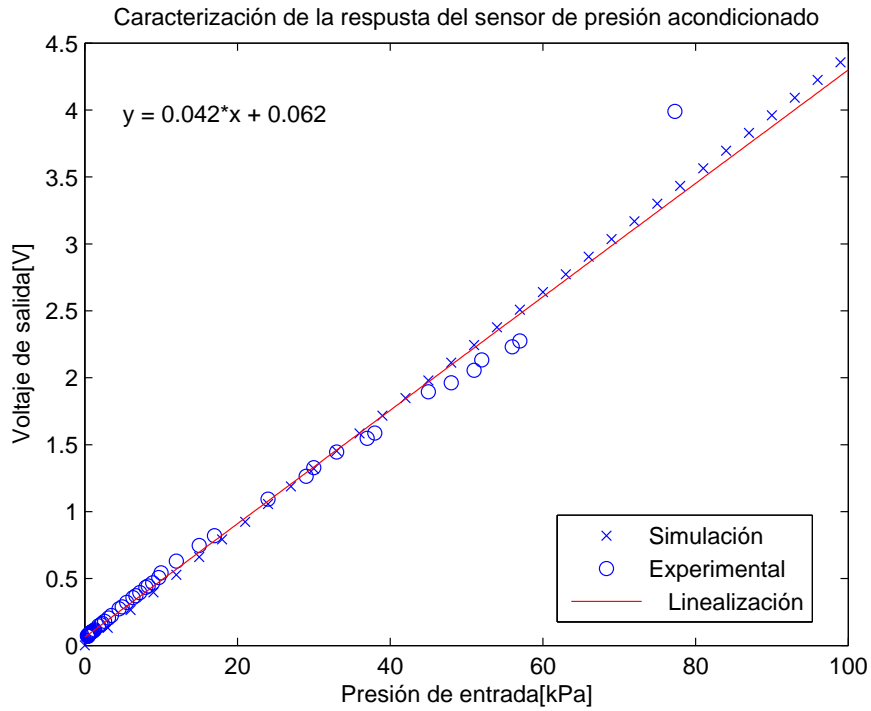
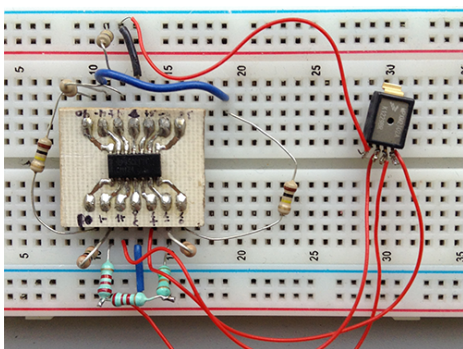
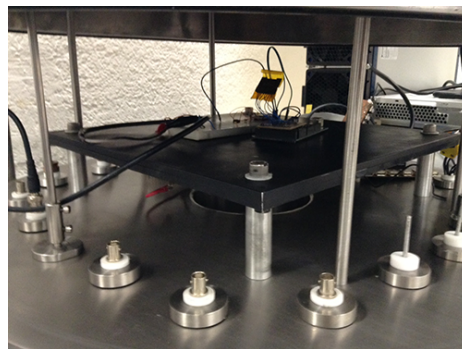


Figura 3.19: Caracterización del sensor de presión acondicionado



(a) Circuito de prueba



(b) Dentro de la cámara de vacío

Figura 3.20: Prueba de caracterización para el sensor de presión

3.4.4. Procesamiento de la señal de humedad

No se realizó una caracterización detallada del sensor de humedad en el laboratorio debido a la dificultad de tal tarea al no tener un control adecuado sobre el ambiente. El algoritmo se basará puramente en la caracterización realizada por el fabricante. Como se observa en la figura 3.21 sacada de la hoja de especificaciones del fabricante, el comportamiento es prácticamente lineal. El fabricante también provee el offset del dispositivo y la pendiente, así se puede estructurar la expresión 3.24. Para hacer el procesamiento con el valor entregado por el ADC se utilizará la expresión 3.25.

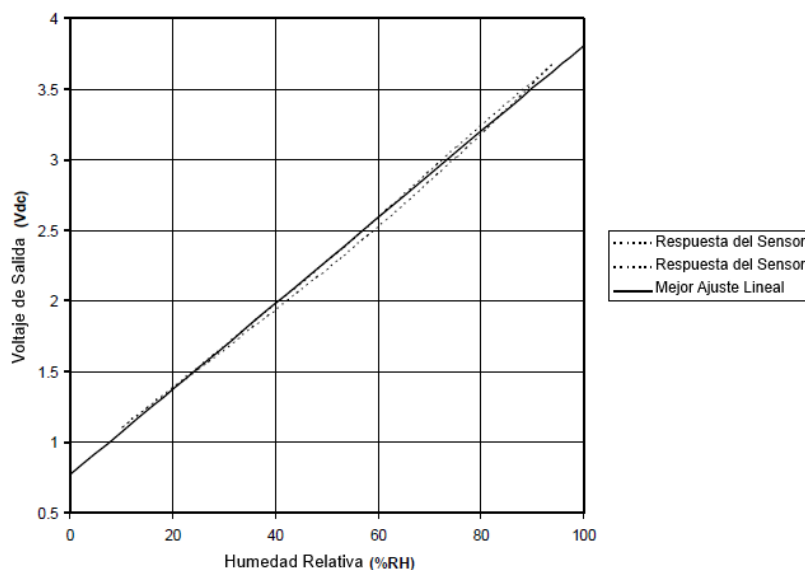


Figura 3.21: Caracterización del sensor de humedad

$$V_o = HR \times pendiente + offset$$

$$HR = \frac{V_o - 0.958}{0.0307} \quad (3.24)$$

$$HR = \frac{V_{ADC} - 196.1984}{6.28736} \quad (3.25)$$

3.4.5. Procesamiento de la señal de aceleración

El sensor de aceleración mide tal fuerza en tres ejes, de acuerdo al fabricante el sensor entrega 800 mV/g. Se realizaron pruebas para caracterizar cada eje, tomando como referencia la fuerza de gravedad terrestre. Sabemos que al estar el eje perpendicular al plano de la Tierra, la tierra ejercerá una fuerza de 1 g en tal dirección. Cada eje mide la fuerza en ambos sentidos del eje, positivo y negativo, siendo el valor

de 1.65 V el punto medio entre los dos sentidos. Cuando el voltaje tiende a 0, la fuerza será en la dirección positiva, y al tender hacia 3.3 V la fuerza será en el sentido contrario al marcado. En la tabla 3.6 se compara el valor dado por el fabricante con el que se obtuvo experimentalmente.

Tabla 3.6: Caracterización del acelerómetro

Eje	Fab. +1g	Exp.+1g	%Error	Fab.-1g	Exp. -1g	%Error
X	0.85	0.713	16.23	2.45	2.319	5.54
Y	0.85	0.800	5.88	2.45	2.421	1.18
Z	0.85	0.590	30.58	2.45	2.187	10.73

Existe un porcentaje de error con respecto a lo definido por el fabricante, hay que tomar esto en consideración para cada eje. En base a la caracterización de los sensores se desarrolló un algoritmo para medir las fuerzas de aceleración detectadas por el acelerómetro. El algoritmo se basa en una función de mapeo tomando como base los valores característicos medidos por los ejes, en ambo sentidos, al actuar una fuerza de aceleración de 1g sobre ellos, es decir, la fuerza de gravedad. El algoritmo tiene la forma de la expresión 3.26 donde a es el valor de aceleración medido, ADC_{min} es el valor mínimo esperado al muestrear y ADC_{max} el valor máximo. out_{min} y out_{max} serán los valores equivalentes en el mapeo a los valores muestreados. La tabla 3.7 toma los valores que caracterizan a cada eje, y muestra equivalente los valores de cada variable para poder hacer el procesamiento necesario.

$$a = \frac{(x - ADC_{min}) \times (out_{max} - out_{min})}{ADC_{max} - ADC_{min}} + out_{min} \quad (3.26)$$

Tabla 3.7: Equivalencias de fuerza g vs. valor de conversión para el acelerómetro

Eje	ADC_{min}	out_{min} [g]	ADC_{max}	out_{max} [g]
X	146	1	475	-1
Y	164	1	496	-1
Z	121	1	488	-1

3.4.6. Selección del micro-controlador

Como se vio en la sección 3.4 existen diversos tipos de dispositivos capaces de ejecutar funciones de control para mantener todo el sistema en funcionamiento de manera controlada. Hay que determinar cual de estos dispositivos es el adecuado para el sistema que se está diseñando. Hay miles de satélites en el espacio, y todos deben ser controlados por algún tipo de dispositivo de procesamiento. Dado a que no se tienen los recursos para hacer pruebas de radiación a diversos procesadores, se basará la selección en procesadores que ya han volado en el espacio, así, se tiene la certeza de que el procesador funcionará en el ambiente espacial. No es sencillo obtener una lista

de componentes utilizados en un satélite, algunos artículos mencionan diversos dispositivos pero no muchos hablan de cuál procesador. Estos son algunos modelos citados en algunos proyectos: ARV4I(400MHz)[34], Intel - 80C188EC basado en tecnología CMOS[35], Microchip - PIC16C77[36], Microchip - PIC24[37], Microchip - PIC33[37], Atmel - ATmega328[38], Atmel - ATmega2561[38], Texas Instruments - MSP430[37], Silicon Labs - C8051[37], Aeroflex - UT 699 LEON 3 FT[39], Xilinx - Virtex II Pro[39]. La gama es amplia abarcando: microprocesadores, microcontroladores (MSP, AVR, y PIC), y FPGAs.

Hay algunas características que deben tomarse en cuenta al seleccionar el procesador: la cantidad de instrucciones por segundo (IPS), la cantidad de memoria de programa, la cantidad de memoria RAM, si tiene memoria adicional, la cantidad de puertos de entrada y salida, velocidad de operación, consumo de energía, voltaje de operación, y si incluye algún ADC.

Dado a que el proyecto es una colaboración entre alumnos de servicio social y alumnos realizando el proceso de titulación de licenciatura, se ha optado utilizar un microcontrolador (los cuales incluyen: el procesador, la memoria de programa, memoria RAM, y un ADC en un solo circuito integrado) que fuera fácil de aprender a utilizar y programar. Al analizar las diversas opciones llamó la atención una plataforma de programación y pruebas para AVRs llamado Arduino. Existen varios modelos de tal tarjeta, los dos más conocidos siendo: Arduino UNO y Arduino MEGA. Sus características se mencionan en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Comparación de las características del UNO vs. MEGA

Modelo	Arduino UNO	Arduino MEGA
Microcontrolador	ATmega328	ATmega2560
Voltaje de operación	7-12 V	7-12 V
E/S Digitales	14	54
Entradas Analógicas	6	16
Resolución de ADC	10 bits	10 bits
Memoria de Programa	32 KB	256 KB
SRAM	2 KB	8KB
EEPROM	1KB	4 KB
Velocidad de operación	16 MHz	16 MHz
Precio	\$ 390	\$ 930

Las dos tarjetas trabajan a la misma velocidad, pero la MEGA tiene cuatro veces más memoria y muchos más puertos de entrada y salida digitales así como entradas analógicas. Sin embargo, debido a la cantidad de tarjetas que se debían comprar y previendo que los alumnos de servicio social iban a hacer uso extensivo de *shields* (módulos que facilitan la integración de funciones adicionales al proyecto a base de Arduino como: GSM, Ethernet, GPS, etc.), se decidió adquirir cierta cantidad de Arduinos “UNO”. El Arduino UNO tiene lo necesario para llevar a cabo las tareas de procesamiento necesarias hasta este momento. Debido a que todas las señales que se van a muestrear son DC, la variación de la magnitud de las señales es continua

y lenta, por lo que la tasa de muestreo no tiene que ser muy alta. Se considera que una muestra completa de los sensores por segundo va a ser una resolución adecuada para la prueba, al tener el programa completo se podrá determinar que tantos marcos de información completos se podrán realizar por unidad de tiempo. Una ventaja considerable del UNO sobre el MEGA es la capacidad de migrar exclusivamente el microcontrolador. Por su encapsulado (DIP) el ATmega328 puede ser fácilmente integrado a un sistema de manera autónoma. La figura 3.22 muestra el Arduino UNO y la distribución de los diversos tipos de terminales.

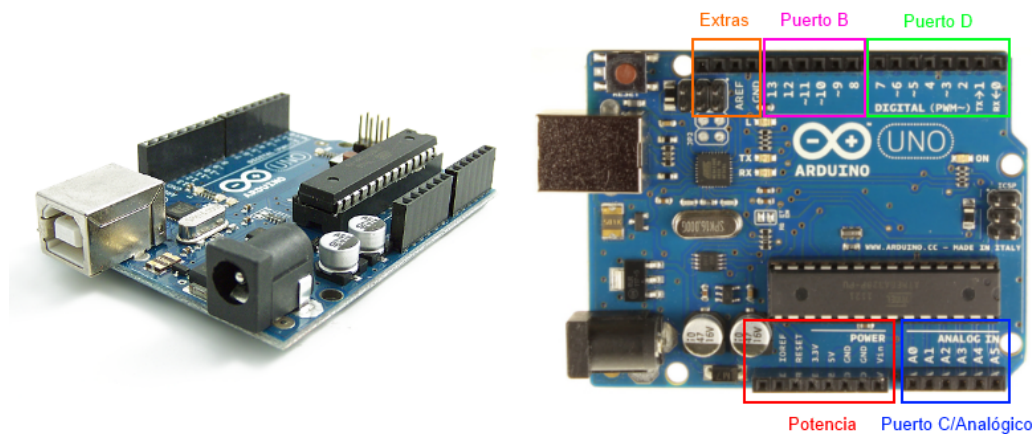


Figura 3.22: Arduino UNO y sus puertos

Podemos observar que las terminales de salida del Arduino se dividen en cuatro secciones principales: potencia, Puerto B, Puerto D, y el Puerto Analógico; existen además algunas terminales extras no adjuntas a ningún puerto. La tabla 3.9 muestra la distribución y función de los diversos pines de acuerdo al puerto. Al saber los puertos en los cuales están distribuidos los diversos pines, se facilitarán algunos procesos de control.

Como se observa en la tabla 3.9, se tienen seis entradas analógicas multiplexadas a el ADC interno del ATmega328, el ADC tiene una resolución de 10 bits. La resolución de 10 bits permite detectar cambios en el nivel de voltaje del orden de 4.88mV si la referencia del ADC son 5 V. El Arduino UNO tarda aproximadamente entre 13 y 260 μ s para realizar la conversión de una señal analógica a digital, esto es aproximadamente 10000 veces por segundo. Son 5 las variables que se van a monitorear, la pregunta es ¿cuántos sensores de cada tipo se van a integrar al sistema? Para poder agregar más sensores al sistema necesitamos más entradas al ADC del microcontrolador. La manera de lograr esto es mediante multiplexores. Los multiplexores pueden aumentar la cantidad de entradas de una línea de datos de 1 a 2, 4, 8, 16, etc. Así, se podría aumentar la cantidad de entradas a 96 al agregar 6 multiplexores (uno para cada entrada analógica del μ C) de configuración 16:1. Para facilitar el procesamiento y el acondicionamiento de señales, agrupar un solo tipo de sensor por multiplexor resulta conveniente, por supuesto, no es una ley. Recordando, la temperatura es la variable de

Tabla 3.9: Distribucion de terminales del Arduino UNO

Puerto	Pin	Función
Puerto C	A0	Entrada analógica 0
	A1	Entrada analógica 1
	A2	Entrada analógica 2
	A3	Entrada analógica 3
	A4	Entrada analógica 4
	A5	Entrada analógica 5
Potencia	V_{in}	Polarización sin regulador
	GND	Tierra del sistema
	5V	Salida de 5 V
	3.3V	Salida de 3.3 V
	Reset	Reiniciar el sistema
	IOREF	Adaptador para otras tarjetas
Puerto D	D0/Rx	E/S Digital 0/Receptor com. serial
	D1/Tx	E/S Digital 1/Transmisor com.serial
	D2	E/S Digital 2
	D3	E/S Digital 3
	D4	E/S Digital 4
	D5	E/S Digital 5
	D6	E/S Digital 6
	D7	E/S Digital 7
Puerto B	D8	E/S Digital 8
	D9	E/S Digital 9
	D10	E/S Digital 10
	D11	E/S Digital 11
	D12	E/S Digital 12
	D13	E/S Digital 13
Extras	GND	Tierra del sistema
	ARef	Establece nuevo límite superior del ADC
	SDA	Comunicación I2C/TWI
	SCL	Comunicación I2C/TWI

mayor interés y entre más sensores de temperatura se puedan agregar, mejor. Tenemos otras cuatro variables; la corriente necesita un acondicionamiento especial para cada sensor, se planea monitorear las cuatro fuentes que van a estar presentes en el sistema (+3.3 V, +5 V, +7 V, y +12 V). Se buscará incluir tres sensores de humedad y tres de corriente y dos acelerómetros. Se utilizará un multiplexor para la corriente, uno para los acelerómetros, uno para los sensores de presión y humedad, y los tres restantes para los sensores de temperatura. Tal configuración se presenta en la tabla 3.10.

Tabla 3.10: Distribución de sensores en los multiplexores

Multiplexor	Variable	Cantidad de Sensores	Canales Usados
A	Temperatura	16	16
B	Temperatura	16	16
C	Temperatura	16	16
D	Corriente	4	4
E	Presión/Humedad	3/3	3/3
F	Aceleración	2	6
Total		60	64

No todos los multiplexores necesitan ser de 16:1, para algunos es suficiente de 4:1 o de 8:1, para no complicar las compras de componentes solamente se considerarán multiplexores de 16:1 y de 8:1. Es necesario aclarar que tales multiplexores deben ser analógicos. En el mercado existen muchos multiplexores digitales, pero debido a la naturaleza de las señales que se van a estar manejando es necesario utilizar multiplexores analógicos. Se observaron algunos modelos de multiplexores y se determinó utilizar los modelos presentados en la tabla 3.11 en especial por su tamaño y rango de temperatura.

Tabla 3.11: Selección de multiplexores

MUX	Fabricante	Modelo	Rango de temp.	V_{cc}	I_{cc}	T. Trans.	Encapsulado
8:1	NXP	74HC4051	$-40^{\circ}a + 125^{\circ}C$	5 V	50 mA	15 ns	SO16
16:1	TI	CD74HC4067	$-55^{\circ}a + 125^{\circ}C$	$7 V_{max}$	50 mA	69 ns	SSOP
16:1	TI	CD4067BE	$-55^{\circ}a + 125^{\circ}C$	$18V_{max}$	$5 \mu A$	60 ns	DIP

Ya que tenemos determinado la cantidad de multiplexores y la cantidad de canales que van a estar manejando cada uno podemos ir determinando que terminales del Arduino UNO se van ocupando. Se van a utilizar las seis entradas analógicas y se va a necesitar cuatro salidas digitales del μC para poder tener control sobre los multiplexores (4 salidas para controlar los multiplexores de 16 y 3 para los de 8, serán los mismos para los dos tipos).

3.4.7. Desarrollo de algoritmos de procesamiento de datos

Para tener una idea clara del procesamiento que se va a llevar a cabo es necesario observar el desarrollo del proceso en una primera aproximación, esto se facilitaría mediante un diagrama de flujo, véase la figura .

Hay que desarrollar un proceso capaz de averiguar que los sistemas importantes estén funcionando adecuadamente. Un elemento de suma importancia es el dispositivo de almacenamiento, hay que averiguar que tal dispositivo esté conectado y funcionando. El sistema deberá contar, además, con un reloj interno cuya función principal es generar la estampa de tiempo para el inicio de un marco. Tal reloj podría ser reconfigurado a la hora actual, o simplemente comenzar desde cero. Después se deberá comenzar un marco nuevo, esto incluye crear el archivo en el lugar donde va a ser guardado en caso de ser necesario. Una vez creado el marco se deberá tomar una muestra del estado de cada uno de los sensores, los sensores se hará la muestra por tipo de sensor, para facilitar el algoritmo, y se irán integrando en el marco. Dependiendo del caso, se hará la conversión de la muestra a unidades entendibles en el μC o se dejará el dato en bruto para después hacer el procesamiento en tierra. Una vez realizado un marco de telemetría completo, se asegurará que el archivo fue guardado y después de un tiempo determinado (x.x mS) se proseguirá a comenzar un marco nuevo. Se buscará ir armando el protocolo para el envío de información al armar el marco. La creación de marcos nuevos deberá seguir mientras el sistema este encendido. En los siguientes párrafos se desarrollarán los algoritmos de procesamiento para el muestreo de sensores y conversión de señal cuantificada a unidades entendibles.

Para realizar el muestreo, primero, es necesario poder acceder al canal de cada sensor. Para lograr esto hay que desarrollar una función de control capaz de hacer la conmutación en el multiplexor de una manera rápida y continua. Recordando, los multiplexores de 16:1 tienen cuatro entradas de control, se designarán los puertos digitales D4-D7 para poder controlar los multiplexores. De acuerdo a la tabla 3.9 los puertos digitales están divididos en dos, B y D, la función común para realizar un cambio de estado en un puerto digital se hace mediante la función *digitalWrite(pin, HIGH/LOW)* habiendo cambiado la terminal digital a una salida anteriormente mediante la función *pinMode(pin, OUT)*. Aunque es la manera más sencilla de llevar a cabo el control de pines digitales los cambios en los pines se realizan uno a la vez lo que provoca que se tengan que llevar a cabo más funciones para poder hacer el control. Si se necesita que la secuencia de control sea cíclica esto se va a complicar mucho si solo se realiza con este tipo de funciones. Una manera de realizar los cambios en los pines designados es mediante los registros de control del puerto. DDRX permite determinar si los pines individuales del puerto X van a ser entradas o salidas. PORTX determina si los pines del puerto X están en un estado alto o bajo. Se utilizará el PORTD para controlar directamente el multiplexor, como se utilizarán los últimos cuatro pines habrá que variar el valor del puerto por incrementos de 16, logrando una secuencia binaria en los pines D4-D7. Considerando esto podemos simplificar la configuración de tales pines y los cambios de estado necesarios con el siguiente algoritmo:

```

void setup(){
  DDRD |= B11110000;
}

void loop(){
  for(int i = 0; i <= 240; i += 16)
  PORTD = i;
}

```

Segundo, como se mencionó, es necesario llevar un reloj dentro del sistema. El IDE de Arduino nos permite utilizar una librería llamada *Time*, las funciones de tal librería permiten llevar un reloj bastante preciso en el sistema. Tal reloj puede comenzar desde ceros al encender el sistema ó darle una hora a partir de la cual llevar la cuenta del tiempo. Las funciones *hour()*, *minute()*, *second()* regresarán, en formato de 24 horas, los valores de la hora, el minuto y el segundo correspondientes a ese momento. Se puede además solicitar el valor de día, día de la semana, mes, y año; para que el reloj tenga la hora y fecha correcta, se puede modificar utilizando la función *e* ingresando los valores: *setTime(hora,minuto,segundo,día,mes,año)*. La función de *setTime()* podrá ser puesta al inicio como parte de la verificación del sistema dependiendo del modo de operación; las funciones que regresan la hora, el minuto y el segundo se mandarán a llamar al inicio de cada marco para insertar la estampa de tiempo.

Los marcos de información que se generarán necesitan ser almacenados en algún lugar (la selección del método de almacenamiento de datos se desarrollará en la sección 3.5), por lo que hay que generar un archivo donde guardar tal información. Existe una librería integrada en el IDE de Arduino que facilita la comunicación con el dispositivo de almacenamiento de información, en este caso, una memoria SD. Como parte de la verificación del sistema hay que revisar que la memoria este conectada y funcionando, una vez comprobado el estado de la memoria se podrán realizar las funciones subsecuentes en ella. Antes de realizar una secuencia de muestreo e ir llenando un marco, hay que verificar que exista un archivo donde guardar la información, tal acción también se puede incluir dentro de la verificación del sistema. Para iniciar la comunicación con la memoria SD se utiliza la función *SD.begin(cspin)* indicando el pin correspondiente al *chip select*(CS) de la memoria. Lo que hace esta función es iniciar el uso del puerto SPI (*Serial Peripheral Interface*, Interfaz Serial Periférico). Si se logra establecer la comunicación entre la memoria y el μ C mediante el puerto SPI se sabrá que la memoria está bien colocada y está funcionando. Si la memoria está respondiendo se podrá crear el archivo dónde se va a guardar la información, se utiliza la función: *SD.open("nombre.ext", FILE_WRITE)*. El nombre deberá tener mínimo 3 caracteres y máximo 8, la extensión debe ser de 3 caracteres y la función *FILE_WRITE*, verificará si el archivo ya existe, si no existe, lo creará y lo abrirá para poder escribir en él. Para poder cerrar el archivo, asegurando que lo que se escribió se quedó guardado, se utiliza la función: *close()*. Se creará, cerrará, y guardará el archivo creado dentro de la secuencia de verificación del sistema.

Una vez iniciado el marco de telemetría, habrá que hacer un muestreo de cada

sensor en el sistema. Aunque la secuencia de muestreo para cada sensor es la misma, el procesamiento de la información generada por el sensor es distinta para cada tipo y obedece el comportamiento descrito en la sección 3.4. El micro-controlador tiene la capacidad de realizar operaciones matemáticas y hasta puede trabajar con punto flotante; es posible realizar algoritmos precisos que entreguen el valor medido en unidades entendibles. Como parte del procesamiento digital, las muestras son de suma importancia porque definirán el valor que va a ser procesado. Aunque ya hubo un acondicionamiento de señal y se pasó la señal entrante al ADC del μC existen variaciones casi prácticamente nulas pero perceptibles para el ADC. Existe un filtro adicional que se puede implementar por software, el filtro consiste en tomar varias muestras de la señal, y promediarlas. Al promediar las muestras se puede eliminar ruido que aún se está metiendo a la señal, inclusive picos no deseados. Si se pueden realizar 10000 muestras por segundo, tomar unas cuantas muestras adicionales a la señal no será mucha carga al μC aunque si es una cantidad excesiva puede causar que el procesamiento en general sea mucho más lento. Hay que hallar un punto de equilibrio en cuanto a cuantas muestras tomar. La tabla 3.12 muestra la relación entre cantidad de muestras y el tiempo que tardaría.

Tabla 3.12: Tiempo promedio del ADC por cantidad de muestras

Muestras	$Tiempo_{min}$ [ms]	$Tiempo_{max}$ [ms]
1	0.013	0.26
10	0.130	2.60
20	0.260	5.20
50	0.650	13.00
100	1.300	26.00

Entre más muestras por sensor habrá una mayor disminución en el error del muestreo, pero tardará más tiempo en llevarse a cabo. Si se realiza una sola muestra el μC tomará aproximadamente 6.4 ms para muestrear los 64 sensores. Tomar entre 1 y 2 ms por sensor parece un tiempo razonable, si se van a muestrear 64 sensores el μC tomará entre 64 y 128 ms. Con 20 muestras por sensor se considera un punto de equilibrio entre disminución de error y tiempo tomado.

Una vez que se tiene el valor final de la muestra, hay que realizar la conversión a la unidad real de la señal. Las ecuaciones para realizar tales conversiones se desarrollaron en la sección 3.4, ahora hay que desarrollar los algoritmos en el IDE de Arduino para realizar la conversión. Hay que tener una cuestión en mente al realizar las conversiones, ¿qué tipo de dato se va a utilizar para guardar la información?. Hay dos opciones, utilizar valores enteros o con punto flotante. Aunque se había mencionado que el UNO es capaz de realizar operaciones con punto flotante, realizar este tipo de operaciones es mucho más lento que hacer operaciones con valores enteros. Agregar un punto flotante aumenta la precisión, pero, ¿qué tanto la aumenta realmente?. En la tabla 3.13 se analizará la rapidez de cada algoritmo así como que tan preciso es el procesamiento que realiza cada uno de ellos.

Se observan varias cosas interesantes de éste análisis, la premisa de que el pro-

Tabla 3.13: Análisis del rendimiento de los algoritmos

Algoritmo de:	Tomado a:	Tipo de Dato	Tiempo de Proc.	Desviación Estándar	% de Error
Temperatura	2.62 [°C]	Flotante	2597 [μ s]	0.12 [°C]	3.77 %
		Entero	2339 [μ s]	0.62 [°C]	23.66 %
	96.7 [°C]	Flotante	2591 [μ s]	1.89 [°C]	1.95 %
		Entero	2330 [μ s]	2.70 [°C]	2.79 %
Corriente	178.1 [mA]	Flotante	2578 [μ s]	2.15 [mA]	1.20 %
		Entero	2345 [μ s]	2.34 [mA]	1.27 %
Presión	22.94 [kPa]	Flotante	2488 [μ s]	0.61 [kPa]	2.69 %
		Entero	2339 [μ s]	0.94 [kPa]	4.09 %
Humedad	44.6 [%HR]	Float	2357 [μ s]	0.46 [%HR]	1.04 %
		Entero	2286 [μ s]	0.69 [%HR]	1.54 %
Aceleración	-1.01 [g]	Flotante	2675 [μ s]	0.02 [g]	2.18 %
		Entero	2324 [μ s]	0.02 [g]	2.18 %

cesamiento de variables con punto flotante es más tardado es cierto, en promedio cada algoritmo toma 0.2 ms más al utilizar punto flotante. considerando que se van a muestrear 64 sensores esto incrementaría el tiempo de cada ciclo de muestreo en 12.8 ms. Ahorrar este tiempo puede aumentar la resolución de muestreo del sistema a la larga. Cabe mencionar que el tiempo promedio que tarda el procesador en realizar las muestras y promediar el valor sin hacer ningún tipo de procesamiento adicional es de 2.289 ms. El tiempo que tardará el sistema en simplemente muestrear todos los sensores suma aproximadamente 150 ms. Como el porcentaje de error es muy relativo a la magnitud del valor en cuestión, se optó por calcular la varianza que se presenta en cada algoritmo. Por medio de tal herramienta se observa la precisión real del ADC y el algoritmo. Muchas de las fluctuaciones que se presentan en el resultado de los algoritmos se debe a la conversión del ADC, no siempre entrega el mismo valor aunque el valor del voltaje sea constante. Sin embargo, es lo suficientemente preciso para mantener la variación de cada tipo de variable por debajo de una unidad de medida, comprobando así la precisión del sistema de muestreo. Se podrá calcular dentro de que rango de error se puede encontrar cualquier muestra que realice el sistema. Teniendo confianza en los datos que va a entregar el sistema de adquisición de datos ahora se podrá dar formato a la información generando parte del marco menor de telemetría que posteriormente podrá ser enviado.

3.4.8. Selección e implementación del protocolo de transmisión

Se determinó utilizar el estándar CCSDS 102.0-B-5 para la estructura de los paquetes de telemetría. Se recomienda que el futuro sistema de telemetría implemente tal estándar para poder tener interoperabilidad con otros sistemas espaciales y terrestres. El sistema se limitará a los parámetros del Paquete Fuente, generando únicamente

el campo de datos del paquete (sección verde de la figura 3.61). En el diseño se especificará el identificador de la aplicación de proceso (rosa), se entregará la cantidad de paquetes de información enviados por la aplicación de proceso (el número de secuencia de fuente dentro del campo de control de secuencia del paquete (morado)), la longitud de información incluida en el campo de datos (azul), la etiqueta de tiempo estándar, o bien, el header opcional (turquesa) y los datos (verde).

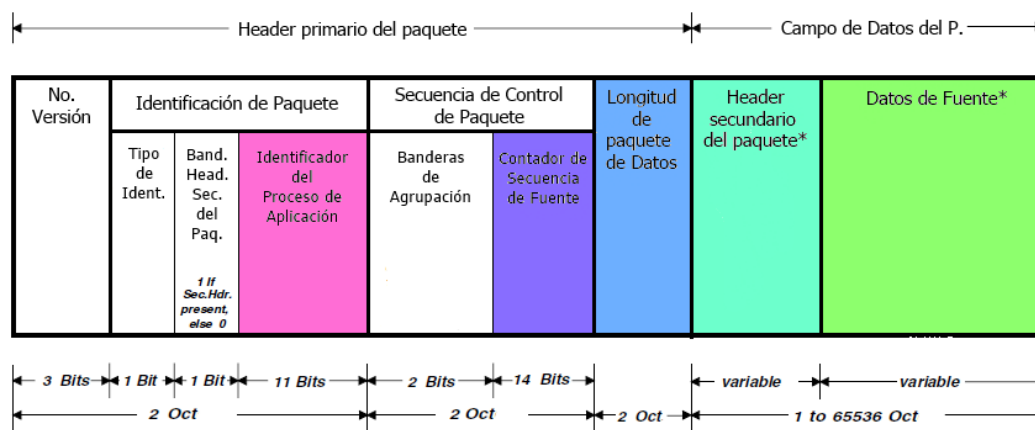


Figura 3.23: Partes del Paquete Fuente a incluir en el diseño

Cada identificador de proceso de aplicación deberá ser de 11 bits, cada subsistema de la misión deberá ser asignado un identificador. Se propone el siguiente identificador: 11111110101b.

El contador de secuencia de fuente lleva la cuenta de cuantos paquetes ha enviado el subsistema, este dato se irá guardando en una variable dentro del programa y deberá ser enviado al sistema de telemetría para formar la trama.

La longitud de paquete de datos equivale a la cantidad de octetos contenidos en el campo de datos menos 1 será un valor de 16 bits (limita la cantidad de octetos del campo de datos del paquete a 65536). Habrá que hacer una función que cuente la cantidad de bytes generados en cada muestra completa, tal dato también deberá ser guardado.

El header secundario equivale a la estampa de tiempo, se podrá utilizar el tiempo UNIX para definir tal estampa. El tiempo UNIX tiene una longitud de 10 dígitos, por lo tanto, se fijará la longitud del header secundario del paquete a 4 bytes (suficientes para guardar el número de 10 dígitos) y se utilizará como estampa de tiempo. Para obtener la estampa con el sistema de Arduino, se necesita utilizar la librería `Time.h` y se utiliza la función: `time_t t = now()`. El número de 10 dígitos será guardado en la variable `t` la cual deberá ser de tipo `long` (4 bytes). Por medio del tiempo UNIX, la librería `Time` puede convertir la trama de bits a dígitos más interpretables como horas, minutos, y segundos reales simplemente utilizando funciones como `hour()`, `minute()`, `second()`.

El campo de datos de fuente contendrá toda la información generada por el sistema, se pueden incluir hasta 65536 octetos. Se propone incluir una muestra completa del sistema, esto es, incluir una muestra de cada sensor del sistema en un determina-

do momento. Para que la información pueda ser interpretada en la estación Terrestre hay que incluir un separador entre la información de un sensor y de otro. Existe una extensión de archivos llamada .csv (comma separated value) en tal archivo una coma (,) delimita entre un valor y otro, muchos programas pueden interpretar el código ASCII de tal separador (, = 2C HEX), se propone utilizarlo para este caso. Al estar la información almacenada en la memoria, se deberá indicar la terminación de una muestra completa, se utilizará la función de línea nueva (LF = A HEX) para marcar esta separación.

3.5. Selección e implementación de método de almacenamiento

Como se mencionó en la sección 2.6, el sistema va a necesitar un lugar dónde guardar toda la información que va a estar generando, un banco de memoria. Analicemos la primera opción: la memoria interna del Arduino. De acuerdo a la tabla 3.8 el Arduino UNO tiene: 2 KB de SRAM (volátil), 1 KB de EEPROM (no-volátil), y 32 KB de Flash (no-volátil) utilizada como memoria de programa. Al correr un programa sólo se permite escribir a la memoria EEPROM y SRAM, la Flash no puede ser modificada. Eso nos deja con 1 KB para escribir la información de telemetría que se va generando ya que no podemos confiar en la volátil para un almacenamiento permanente y a largo plazo. Con 1 KB de memoria, se podrían guardar únicamente 64 datos enteros (Arduino maneja el valor entero con 16 bits), esto es únicamente un marco menor de telemetría. Es obviamente insuficiente para guardar la información de varias horas.

La segunda opción es utilizar una memoria externa. El Arduino facilita el uso de varios puertos de comunicación: UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, Transmisor/Receptor Asíncrono Universal) TTL, I2C (*Inter-Integrated Circuit*, Inter-Circuitos Integrados), y SPI (*Serial Peripheral Interface*, Interface Serial Periférico) [40]. Se analizará cual de estos podrá utilizar para controlar y comunicarse con un dispositivo de almacenamiento. En realidad cualquier protocolo de comunicación puede ser utilizado si es programado, agregando los circuitos adicionales si es el caso, pero la ventaja es que tales protocolos ya están programados, probados, y listos para ser utilizados.

El UART TTL (*Transistor-Transistor Logic*, Lógica Transistor a Transistor) permite la comunicación serial entre dos dispositivos. Convierte datos en paralelo a datos en serie, su velocidad de transmisión es configurable. La tarjeta del Arduino tiene un microcontrolador adicional (ATmega16U2) [40] configurado para realizar comunicación vía USB actuando como un puerto COM virtual; esto permite la comunicación con una computadora. Sin embargo para conectar una memoria flash de tipo USB se necesitará hardware y controladores adicionales. No es práctico este puerto para conectar el dispositivo de memoria [41].

El puerto I2C únicamente requiere de dos líneas, Serial Data Line (SDA) y Serial Clock (SCL). Tal protocolo alcanza velocidades de promedio de 100 kbit/s. Hay

memorias EEPROM compatibles con I2C, existen capacidades de hasta 1 Mb. Su precio promedio es de \$35 MXN. La mayoría de los modelos operan en un rango de temperatura de -40°C a los 80°C a una frecuencia promedio de 400 kHz y operan a 5 V. De la tecnología FRAM hay capacidades de hasta de 2 Mb. Una memoria de 1 Mb tiene un precio promedio de \$130 MXN, operan en un rango de temperatura de -40°C a 80°C , a una frecuencia máxima de 3.4 MHz, y trabajan a 3.3 V [42, 43].

Para el puerto SPI también existen diversas memorias compatibles con tal protocolo de comunicación. Las memorias EEPROM disponibles pueden operar por lo general entre los -40°C a 80°C , operan a una frecuencia máxima de 20 MHz, polarización de 5 V, y tienen un precio promedio de \$35 MXN. Una memoria FRAM con interfaz SPI opera dentro del rango de -40°C a los 80°C , opera a 40 MHz con una polarización de 3.3 V. Cuesta en promedio \$165 MXN. En cuanto a la memoria Flash, existe una familia particular que funciona con el protocolo SPI a tales memorias se les llama SD (*Secure Digital*). Su temperatura de operación está entre los -20°C y 85°C , alcanzan una transferencia de información de 4 MB/s y existen capacidades desde los 4 GB hasta los 64 GB. Una memoria de 4 GB tiene un precio promedio de \$80 MXN [43, 44, 45].

Para poder tener espacio suficiente para guardar varias horas de datos de telemetría, sería necesario diseñar un banco de memorias a base de los circuitos integrados de EEPROM y FRAM. Ocuparía mucho espacio y complicaría el diseño, además de que sería costoso, para alcanzar 1 MB de información se necesitarían 8 CIs de 1 Mb lo que equivale a \$280 MXN en el más barato de los casos. La opción más económica y de mejor densidad de memoria son las memorias SD. Aunque su rango de temperatura de operación sea menor, sus ventajas sobre las demás tecnologías es clara.

Para poder utilizar una memoria SD con el Arduino UNO será necesario un circuito de acondicionamiento porque la memoria SD funciona a base de 3.3 V y los puertos digitales del UNO entregan señales con una magnitud de 5 V. Hay que reducir la magnitud de la señal, se puede hacer mediante un divisor de voltaje. También hay que identificar que señal del puerto SPI corresponde a cada terminal tanto de la memoria como del Arduino. La memoria SD consumirá entre 20 mA y 100 mA al estar activa y unos 0.2 mA al estar en standby. La figura 3.24 muestra la configuración de las terminales de la memoria y la tabla 3.14 a lo que corresponden tanto en la memoria como en el Arduino.

Por lo tanto el circuito que hará la interconexión entre el Arduino UNO y la memoria SD será el de la figura 3.25, las resistencias están en configuración de divisor de voltaje calculadas para bajar de 5 V a aproximadamente 3.3 V.

Ya que está definido el hardware de interconexión entre el Arduino y la memoria SD, hay que desarrollar el software que llevará a cabo las funciones de almacenamiento de la información generada en el sistema de adquisición de datos en la memoria. Para iniciar el uso de la tarjeta hay que inicializar el puerto SPI, es decir, comenzar la comunicación con la memoria. Se utilizará la librería SD de la IDE de Arduino para simplificar el algoritmo. La función *SD.begin()* inicializa el puerto y regresa un valor de verdadero si se logra establecer la comunicación con la tarjeta, sino, regresará un valor falso. Dentro de tal función se puede especificar el pin a donde está conectado

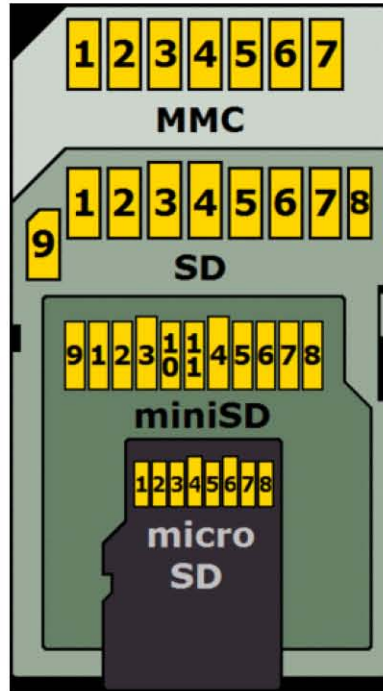


Figura 3.24: Número de pin para cada tipo de tarjeta SD [46]

Tabla 3.14: Distribución de pines en memoria SD y Arduino UNO[46, 47]

SD	micro SD	Arduino	Nombre	Descripción
1	2	D10	CS	Selección de dispositivo SPI
2	3	D11	DI/MOSI	Salida de Maestro, Entrada de Esclavo
3			GND	Tierra
4	4		VDD	3.3 V
5	5	D13	SCK	Reloj Serial
6	6		GND	Tierra
7	7	D12	DO/MISO	Entrada de Maestro, Salida de Esclavo
8	8		NC	No Conectado
9	1		NC	No Conectado

el CS de la memoria *SD.begin(CS)*. Si se logra establecer la comunicación, para poder guardar información, hay que crear un archivo al cual escribir información. Para crear un archivo se utiliza la función *SD.open(dirección del archivo, modo)* donde la *dirección del archivo* puede ser definida por sub-directorios delimitados por diagonales (/) y al final el nombre del archivo y su extensión, por ejemplo, sub-carpeta1/sub-carpeta2/archivo.ext; los nombres de archivos tienen formato 8.3, es decir, máximo ocho caracteres para el nombre y máximo tres para la extensión. Se recomienda usar mínimo dos caracteres para el nombre del archivo, sino no será reconocido. El *modo* definirá como será abierto el archivo, si para lectura o escritura. Se podrá hacer lectura desde el inicio del archivo usando *FILE_READ* y para realizar la escritura comenzando desde el final del archivo se usará *FILE_WRITE*.

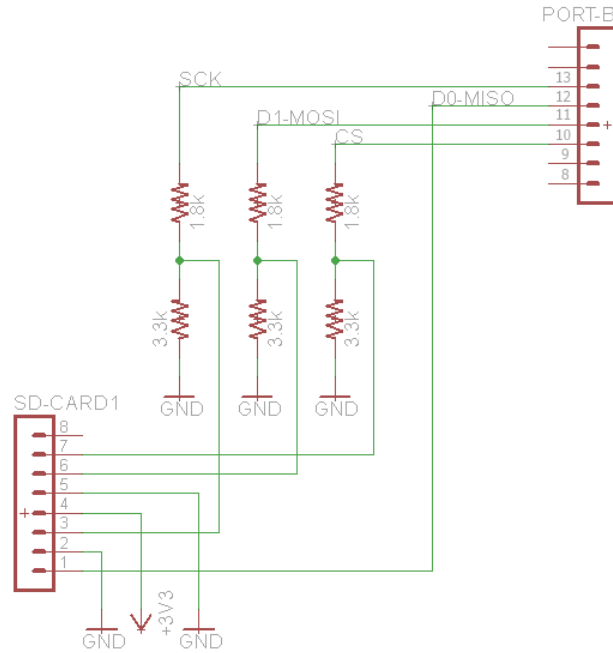


Figura 3.25: Circuito de comunicación Arduino UNO - SD

Una vez que la tarjeta esté inicializada y el archivo creado se podrá guardar información en la memoria. Las funciones que nos permitirán leer o escribir de archivos individuales almacenadas en la memoria pertenecen a la clase *file*; hasta ahora las funciones que se habían utilizado para tener acceso y manipular el contenido de la memoria pertenecen a la clase *SD*. Para poder utilizar estas funciones hay que crear un objeto de clase *file* y con este se podrán hacer todas las modificaciones necesarias a cualquier archivo en la memoria. Cabe mencionar que las funciones de clase *SD* deben ser aplicadas a un objeto de clase *file* para que se puedan ejecutar.

Hay dos funciones principales para escribir en la memoria: *print()* y *write()*. La función *print(dato, BASE)* escribirá información a un archivo abierto para escritura, donde *dato* indica lo que se va a escribir (guardado en una variable), los números serán escritos como una secuencia de dígitos, y toda la información será guardada en la memoria como una secuencia de caracteres ASCII. Los tipos de datos aceptables por esta función son: *char*, *byte*, *int*, *long* o *string*. Es notorio que no acepta números de punto flotante. La *BASE* es opcional y define en que base van a ser escritos los números que pasen por la función, pueden ser escritos en binario (BIN), octal (OCT), decimal (DEC), hexadecimal (HEX). La función complementaria *println()* tiene las mismas características agregando un símbolo para detectar el término de una línea y el comienzo de una nueva línea. La función *write(dato)* o *write(buffer, longitud)* escribe datos a el archivo. El *dato* puede ser un *byte*, *char*, o *string*, el *buffer* es un arreglo de caracteres o *bytes* a ser escritos y la *longitud* la cantidad de elementos en el *buffer*. La segunda configuración permite escribir un dato sin estar guardado en una variable. Ambas funciones regresan al sistema la cantidad de bytes escritos [48, 49].

Una vez escrita la información se deberá cerrar el archivo, sino, es posible que la

información escrita anteriormente no se guarde en la memoria. Se utiliza la función *file: close()* para cerrar el archivo despues de realizar todas las operaciones [50].

Por lo tanto para poder crear un archivo y guardar información en él, se seguirá el algoritmo planteado en la figura 3.26.

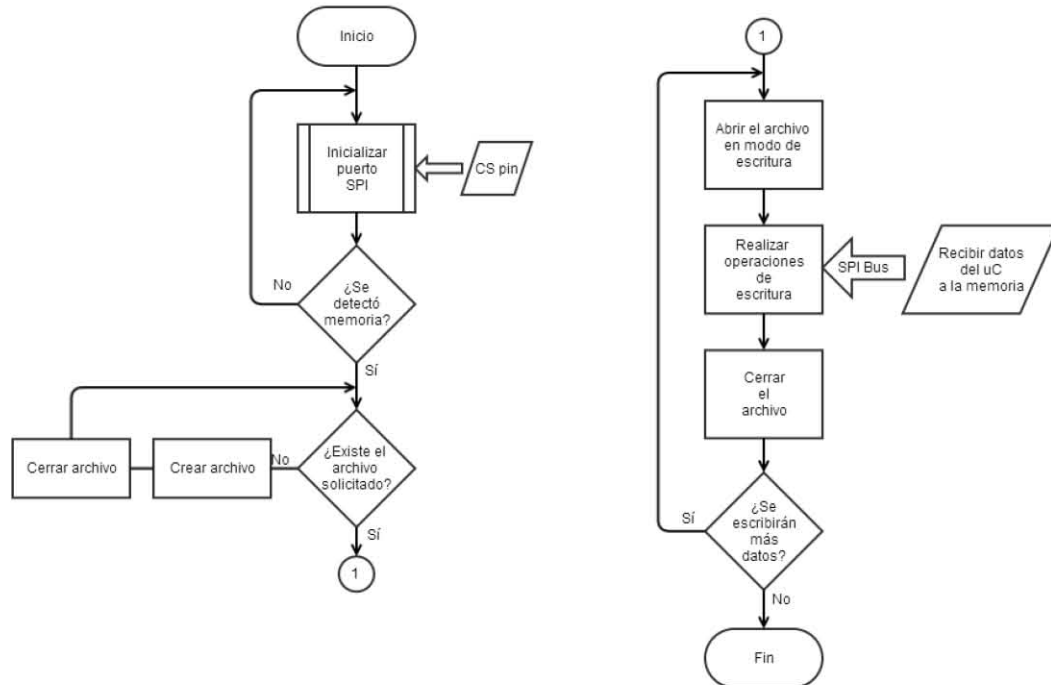


Figura 3.26: Diagrama de flujo que representa el algoritmo de almacenamiento de datos

3.6. Selección del puerto de programación y diagnóstico

El sistema necesita tener la capacidad de ser reconfigurado y dar su estado operativo. Para tal acción, el sistema necesita un puerto de comunicaciones con otros sistemas. Al ser integrado el sistema dentro de un satélite, necesitará comunicarse con otros subsistemas, existen varios protocolos de comunicación entre dispositivos como I2C, USB, CAN, RS-232, SPI, etc. También se necesita un puerto para poder programar y hacer pruebas durante la etapa de diseño. La integración del puerto para comunicarse con otros subsistemas del satélite se dejará para un trabajo futuro, por ahora se determinará la manera de poder ser programado, así como enviar y recibir información del sistema.

El dispositivo que maneja la información es el microcontrolador, él es capaz de enviar y recibir información a otro dispositivo mediante alguna interfaz. En nuestro sistema el microcontrolador está integrado en la tarjeta del Arduino UNO. La tarjeta de Arduino se puede comunicar por medio de los protocolos: USB, I2C y SPI. La

tarjeta en sí sirve para programar el microcontrolador, esto lo logra mediante una interfaz USB. El Arduino UNO utiliza un ATmega16U2 para establecer una comunicación serial UART TTL entre la tarjeta y una PC. Así, de manera muy sencilla se puede programar y tener comunicación con el sistema vía USB. Se podrá transmitir información a una tasa desde 300 hasta 115200 baud. Tal interfaz no solo es mediante el conector tipo USB-B que tiene la tarjeta, sino que también se podrá establecer comunicación serial por medio de los pins D0 y D1.

3.7. Descripción del software del sistema

En esta sección se describirá el funcionamiento del software que llevará el sistema. Se describirá el flujo que llevara el proceso y se presentarán algunos datos promedios sobre el programa.

El sistema tendrá dos modos de operación, uno para el funcionamiento normal y uno para diagnóstico. En el modo normal se llevarán a cabo las funciones de muestreo, procesamiento, y almacenamiento. En el modo de diagnóstico se hará lo mismo solo que la información generada se enviará vía USB y podrá ser desplegada o almacenada en una PC con el fin de que la persona revisando pueda revisar el comportamiento del sistema de una manera sencilla y rápida. Se puede configurar el tiempo entre despliegue de muestras al programar el sistema. Para una idea más clara se podrá observar el flujo del programa en las figuras 3.27 y 3.28.

En las secciones anteriores se fueron desarrollando algoritmos de procesamiento para cada sensor, aquí se integrarán esos algoritmos en un solo programa. El programa se puede observar en el apéndice A.1. Se hicieron algunas pruebas al programa y se recopiló la información de la tabla 4.2. La cantidad información que contendrá el paquete de datos se puede observar en la table 4.3, se generarán 232 octetos (un E8 HEX para el campo de longitud de paquete del Paquete Fuente).

3.8. Balance energético

En esta sección se describirá el consumo energético del sistema, se reportará el consumo de cada componente del sistema y del sistema completo. En la tabla 3.16 se muestra en consumo promedio de cada tipo de sensor y los circuitos integrados y en la tabla 3.15 se puede ver el consumo de los microprocesadores. En la tabla 3.17 se muestra el consumo total de los sistemas que volaron, en la sección 4.3 se explicará el sistema de emergencia. Además se muestra la demanda de potencia a cada fuente.

Tabla 3.15: Consumo de potencia de los Arduino

Tarjeta	Polarización [V]	Consumo [mA]	Potencia [mW]
Arduino UNO	7	52.6	368.2
Arduino MEGA	7	70.8	495.6

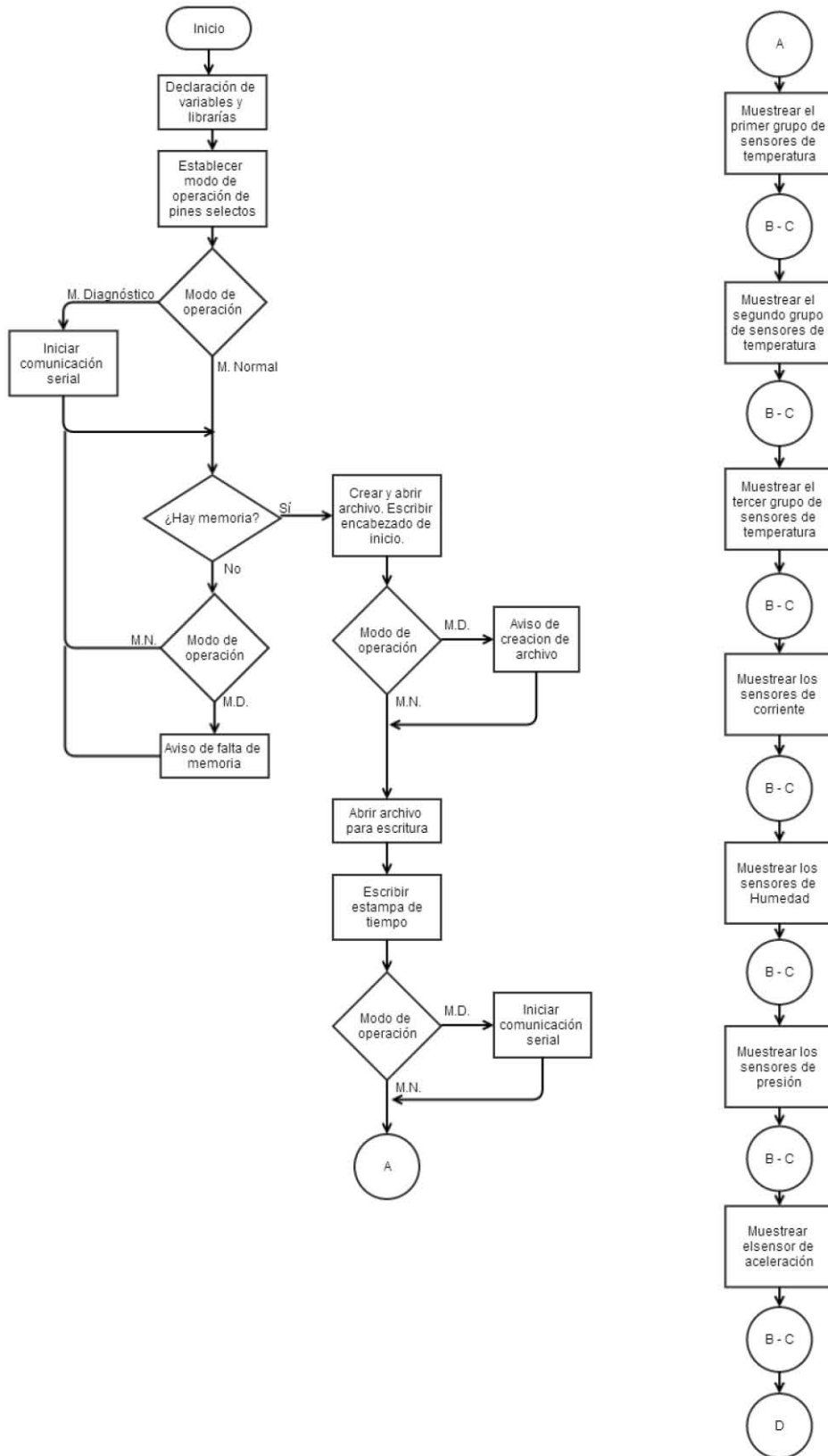


Figura 3.27: Diagrama de flujo del software del sistema (a)

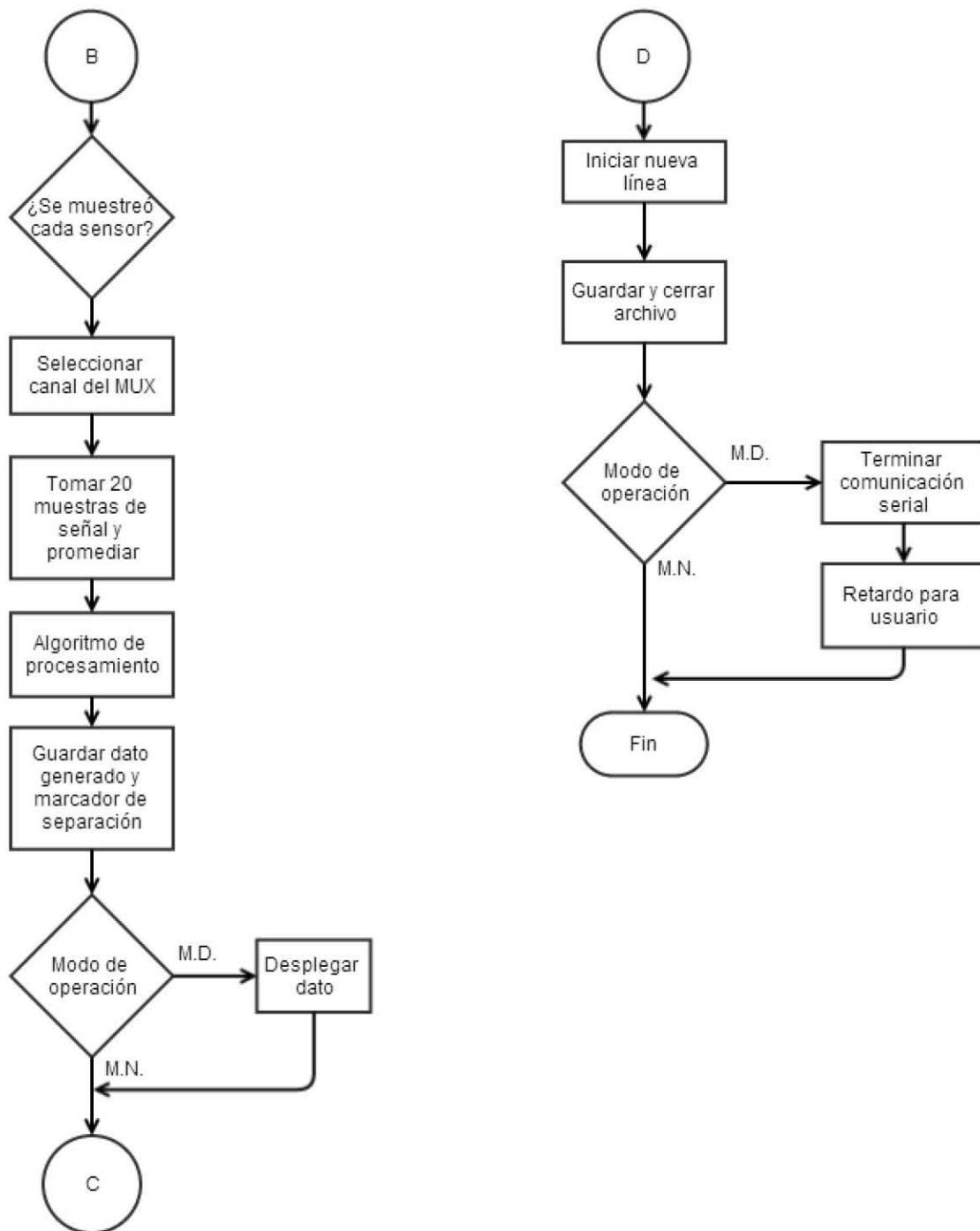


Figura 3.28: Diagrama de flujo del software del sistema (b)

Tabla 3.16: Consumo de potencia de los componentes del sistema

Componente	Polarización [V]	Consumo [mA]	Potencia [mW]
S. Temperatura	5	0.0786	0.393
S. Corriente	5	10.35	51.75
S. Presión	12	6.72	80.64
S. Humedad	5	0.23	1.15
S. Aceleración	7	0.516	3.612
LM124	5	0.56	2.8
CD4067BE	5	0.204	1.02
Memoria SD	3.3	17.4	57.42

Tabla 3.17: Consumo total de potencia de los sistemas

Sistema	Fuente [V]	Consumo [W]	Total [W]
	+12	0.161	
SMPF	+ 7	0.857	1.356
	+ 5	0.338	
	+12	0.161	
SMPF + S.E.	+ 7	0.947	1.446
	+ 5	0.338	

3.9. Diseño del prototipo funcional

En esta sección se describirá el proceso del diseño del sistema completo (figura 3.37) , describir como se van a integrar todos los componentes en un solo sistema. Esto incluye: el microprocesador, los sensores, los circuitos de acondicionamiento, los conectores necesarios, y el banco de memoria. Se comenzará el diseño a partir de las restricciones de tamaño impuestas por *Pixqui* el cual tiene las siguientes dimensiones: 35 x 35 x 60 cm.

Se puede observar la forma de la estructura en la figura 3.30. Como es notorio, la estructura esta dividida en tres *cajones*. Las primeras dos son para el soporte del sistema y pruebas del ICN e Instituto de Ingeniería (II), el cajón inferior es para la carga útil de *pixqui*, es decir, para las pruebas de *Quetzal* llevadas a cabo por el CAT. El cajón correspondiente a *Quetzal* tiene las siguientes dimensiones: 297.1 x 297.1 x 111.9 mm.

Dentro de tal cajón hay que acomodar cuatro distintos sistemas: el sistema de potencia, una cámara fotográfica, una caja con un experimento de reacción de materiales, y el sistema de monitoreo de parámetros físicos. Se propone abarcar un área de 10 x 10 cm debido a que éste es un tamaño estándar de placas para fabricar PCBs (Printed Circuit Board) y no ocupará demasiado espacio en el cajón. Tal área es muy pequeña para el diseño de todo el sistema por lo que se le agregarán *niveles* a la placa base aumentando así el área sobre la cual se podrá diseñar. La altura total del sistema no deberá superar los 11 cm, por lo que la dimensión del sistema será aproximadamente de 10 x 10 x 11 cm.

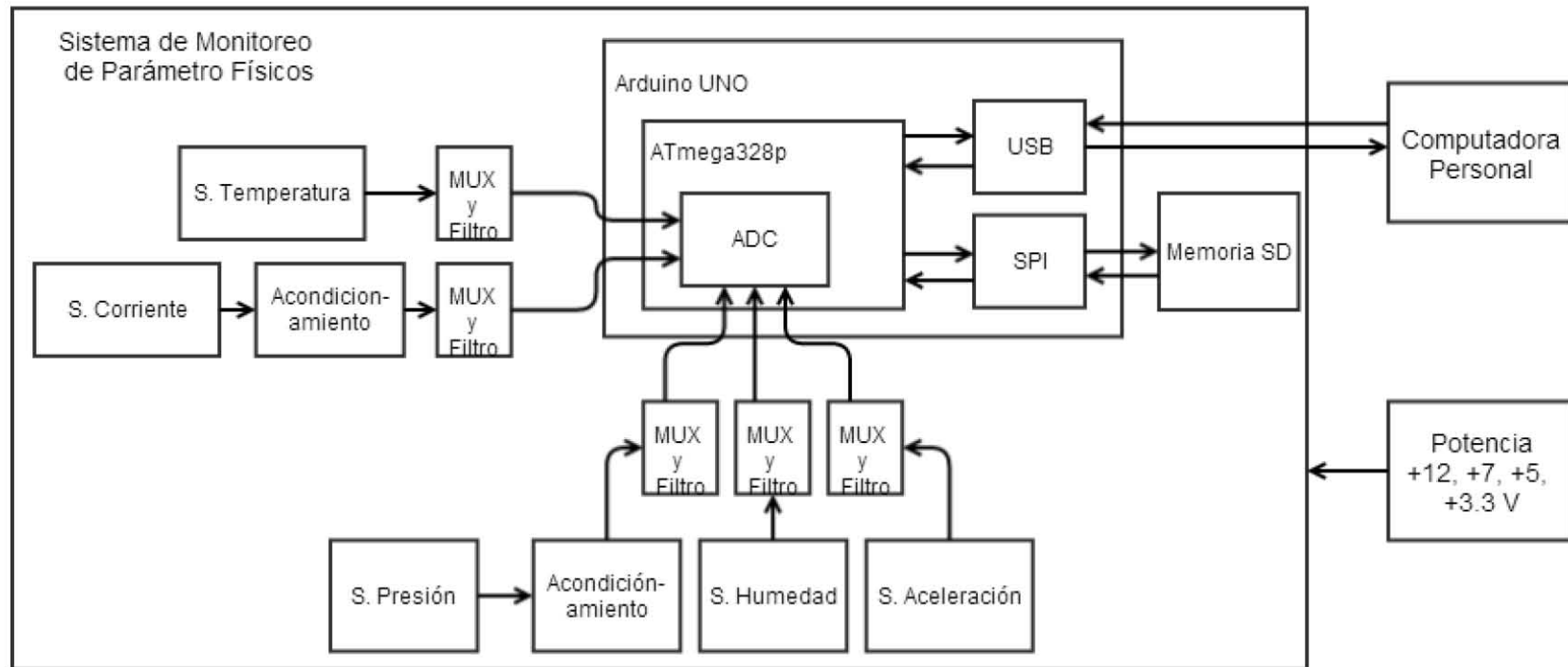


Figura 3.29: Este diagrama a bloques muestra que tipo de interconexión habrá entre los distintos elementos del sistema de monitoreo.

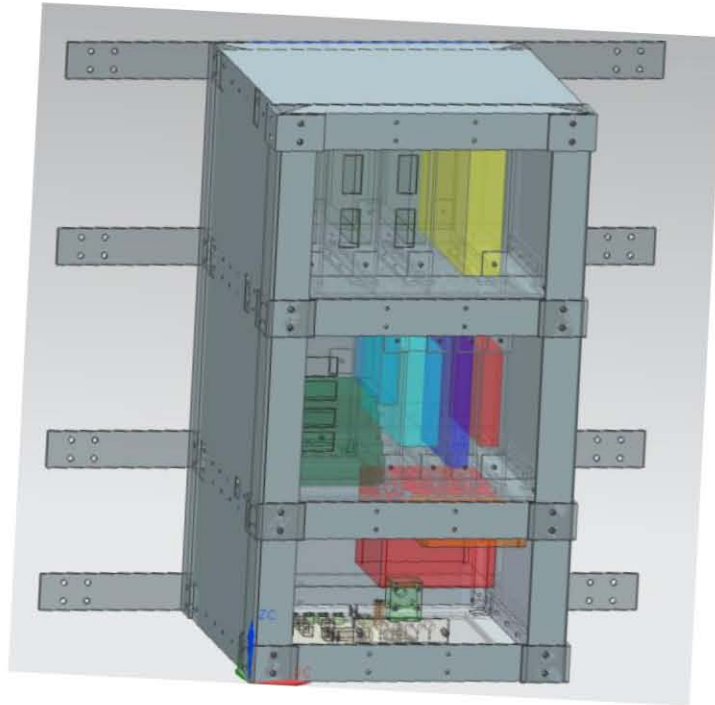


Figura 3.30: Estructura mecánica de Pixqui [51] (Mendoza A., Vázquez C., Velazquez F.)

Recordemos los distintos componentes que llevará el sistema para ir organizando su su distribución.

- Microcontrolador (Arduino)
- 48 sensores de temperatura
- 4 sensores de corriente
- 4 circuitos de acondicionamiento para el sensor de corriente
- 3 sensores de presión
- 4 circuitos de acondicionamiento para el sensor de presión
- 3 sensores de humedad
- 2 sensores de aceleración
- 6 multiplexores
- El banco de memoria
- Conectores para cada sensor
- Conectores para el sistema de potencia

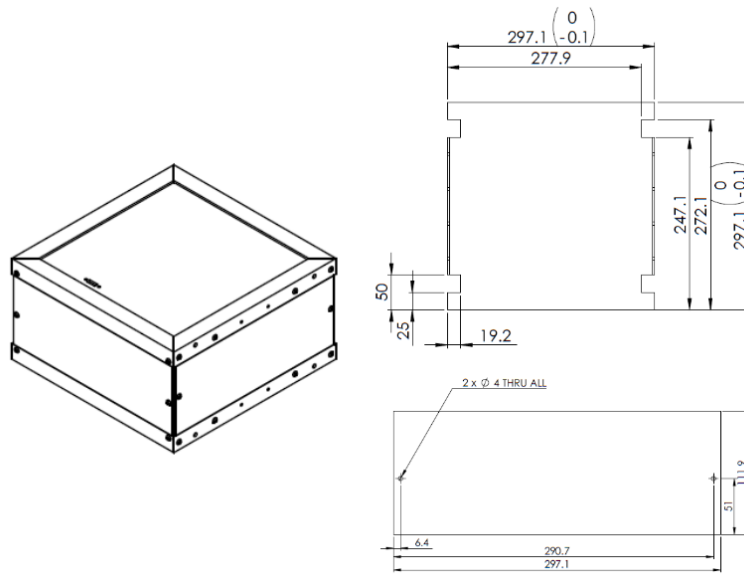


Figura 3.31: Diagrama del cajón para Quetzal (Vázquez R.)

3.9.1. Primer nivel

El componente principal es el microcontrolador, todos los sensores se deberán comunicar a él y él escribirá la información procesada a la memoria. Hay que hallar una manera en que todos los componentes que se necesitan comunicarse con él lo logren de una manera sencilla. Se propone implementar un bus de datos entre los diversos niveles del sistema, así, todos los componentes tendrán un fácil acceso al microcontrolador. Dado a que se va a utilizar el puerto USB de la tarjeta Arduino (como se mencionó en la sección 3.6) hay que integrar la tarjeta completa al primer nivel del sistema. Como se observa en la figura 3.22 el Arduino tiene un arreglo de headers hembra correspondientes a cada pin del microcontrolador. Se agregará una base sobre la cual se podrá insertar la tarjeta del Arduino UNO. La distribución de tales headers deberá ser muy precisa ya que si falla por algunos milímetros no se podrá insertar la tarjeta. Para tener las medidas exactas de la distribución de los headers hembra utilizados en el Arduino UNO se recurrió al esquemático de tal. Es una ventaja que el Arduino es de la filosofía de *hardware libre* y los esquemáticos están disponibles al público en general (vease figura 3.32) [52].

De acuerdo a el esquemático podemos obtener las medidas entre los diversos headers, son cuatro en total y corresponden a los diversos puertos que se habían mencionado anteriormente (potencia, puerto B, puerto C, puerto D). Cada puerto tiene una distinta cantidad de headers:

- Puerto B - 10
- Puerto D - 8
- Potencia - 8
- Puerto C - 6

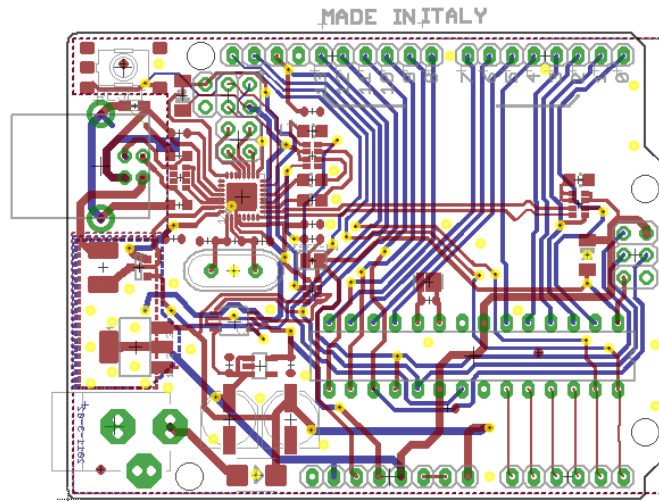


Figura 3.32: Esquemático del Arduino UNO-R3

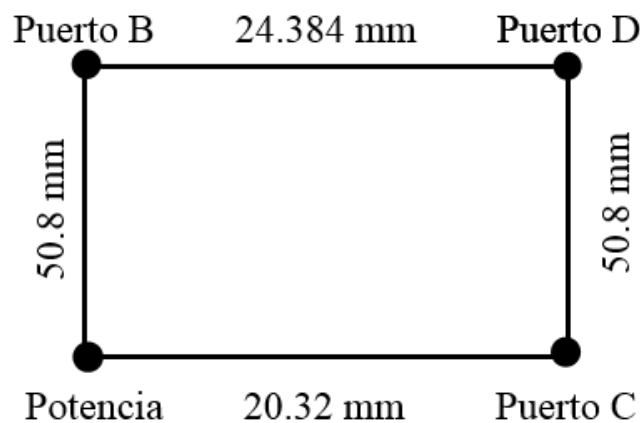


Figura 3.33: Coordenadas de headers Arduino UNO

En el esquemático la coordenada de cada componente está fija en su centro, la distancia entre componentes no será cuadrada, en la figura 3.33 están definidas las distancias que hay entre los headers hembra del Arduino UNO.

Ubicando la tarjeta del UNO sobre la placa abarcará aproximadamente 53.5 x 75 mm. Sobre esta misma placa, y sobre todas las demás, hay que ubicar el bus de datos que se había mencionado. El bus de datos deberá contener vías para comunicar todos los pines utilizados y cualquier otra señal que sea utilizada de un nivel a otro. Se incluirán, además, las líneas de potencia. Se puede decir que son dos buses, el de datos y el de potencia. Se usará un conector de tipo cable plano para facilitar la unión entre los diversos niveles. En total se usará un bus de 26 líneas, la distribución quedará como se menciona en la tabla 3.18.

Como este nivel va a servir como distribuidor de información y para programación, también se van a incluir las entradas de potencia al sistema. Como hay que medir los niveles de demanda de corriente, y las entradas de potencia estarán en el este

Tabla 3.18: Distribución de señales del bus

Señal	Pin		Señal
+12 V	1	2	+7 V
+5 V	3	4	+3.3 V
GND	5	6	Reset
A5	7	8	A4
A3	9	10	A2
A1	11	12	A0
D0	13	14	D1
D2	15	16	D3
D4	17	18	D5
D6	19	20	D7
D8	21	22	D9
D10	23	24	D11
D12	25	26	D13

nivel hay que incluir los sensores de corriente también, con el espacio que queda disponible será suficiente para incluir los sensores de corriente y sus circuitos de acondicionamiento. Dado a que únicamente se van a utilizar cuatro sensores en el primer nivel se propone utilizar el multiplexor de 8:1. Este nivel no va a necesitar conectores para los sensores ya que el monitoreo se hará directamente en la placa.

Otra cosa que considerar, dado a que el diseño va a ser en varios niveles, es que se van a tener que unir y mantener en lugar todos los niveles. Hay que dejar un espacio para poner algunos postes para unir entre niveles.

Ya que está definido lo que llevará la primera placa, se sugiere la distribución de componentes presente en la tabla 3.19.

Tabla 3.19: Distribución de componentes por nivel

Piso	Contenido
1	Arduino UNO, entradas de potencia, 4 sensores de corriente, circuitos de acondicionamiento, multiplexor D, bus de datos, bus de potencia.
2	32 Sensores de temperatura, circuitos de acondicionamiento, multiplexores A y B, conectores bus de datos, bus de potencia.
3	16 Sensores de temperatura, 3 sensores de presión, 3 sensores de humedad, multiplexores C y E, circuitos de acondicionamiento, conectores bus de datos, bus de potencia.
4	2 acelerómetros, multiplexor F, conector para memoria SD, interfaz para puerto SPI, bus de datos, bus de potencia.

En las figuras 3.34 y 3.35 se muestra el esquemático del primer nivel y en la figura 3.36 la distribución para el PCB. De lado izquierdo del esquemático se presentan los headers para el arduino, estos en su mayoría se conectan al bus de datos. La fuente de 3.3 V se tomará del regulador interno del Arduino a diferencia de los demás que serán mediante una conexión externa. Las conexiones para los diversos valores de voltaje que recibirá el sistema se harán mediante *bourneras* serán seis entradas en total (+12, +7, +5, y sus correspondientes conexiones a tierra). De la conexión de entrada entrarán directamente al sensor de corriente correspondiente, de ahí se distribuirán en la placa donde sea necesario el correspondiente valor de voltaje y después a su pin respectivo en el bus de potencia. Las salidas de los sensores de corriente pasarán a sus respectivos circuitos de acondicionamiento, una vez acondicionada la señal pasarán al multiplexor D. El multiplexor necesita dos señales de entrada para realizar la selección del canal, los multiplexores necesitarán cuatro señales. Para ahorrar salidas digitales, todos los multiplexores serán controlados con los mismos cuatro pines digitales, en el caso de los de 8:1 con únicamente los primeros dos. Como se había mencionado anteriormente, se utilizarán los pines D4-D7 para el control de los multiplexores. La salida del multiplexor D entrará al pin A3 del Arduino. Existe un detalle de calibración para este nivel, el circuito de acondicionamiento de los sensores de corriente requieren de un potenciómetro (en el diseño se utilizaron unos trimpot). Para que el procesamiento sea el correcto, cuando no halla corriente atravesando el sensor, la salida del circuito de acondicionamiento deberá ser de 2.1 V. Hay que ajustar el valor del trimpot si entrega un valor diferente.

Para el diseño de la PCB primero hay que definir el tamaño del área de trabajo, como se había sugerido anteriormente, será de 10 x 10 cm. Las placas fenólicas que se van a utilizar serán de dos capas, es decir, tienen cobre sobre ambas caras de la placa. Después se colocaron unos círculos para ubicar dónde se van a instalar los postes para unir los diversos niveles. El centro de cada círculo, con un radio de 2.84 mm, fue colocado a (5.715 mm, 5.715 mm) hacia dentro de la placa a partir de cada esquina. Serán áreas muertas. El siguiente paso fue colocar los headers para el Arduino UNO y de manera conveniente el bus de datos y de potencia. Hay que colocar el Arduino de tal manera que sea posible conectar el cable USB de tipo B para realizar la programación del microcontrolador, no podrá haber un componente que interfiera grandemente. El conector del bus de datos y potencia debe de estar en un lugar de fácil acceso para que sea sencillo conectar y desconectar, y para que no se enreden los cables (hay que mantenerlos cortos). Se optó por colocar el conector del bus en la esquina superior izquierda de la placa. En este lado únicamente habrá conexiones del bus y de los cables de potencia.

En cuanto a la colocación de los circuitos para el monitoreo de la corriente, se mantendrán los sensores de corriente cercanos a las entradas de potencia a fin de poder dirigir la potencia hacia el bus de potencia una vez que el nivel de corriente haya sido detectado por los sensores. Los circuitos de acondicionamiento fueron distribuidos a lo largo del espacio que sobraba. El multiplexor de 8:1, con la ventaja que es muy pequeño, se colocó dentro del área que abarca la tarjeta Arduino. Como el Arduino solo requiere el espacio para los headers, se aprovechó el hueco y se colocó ahí el multiplexor.

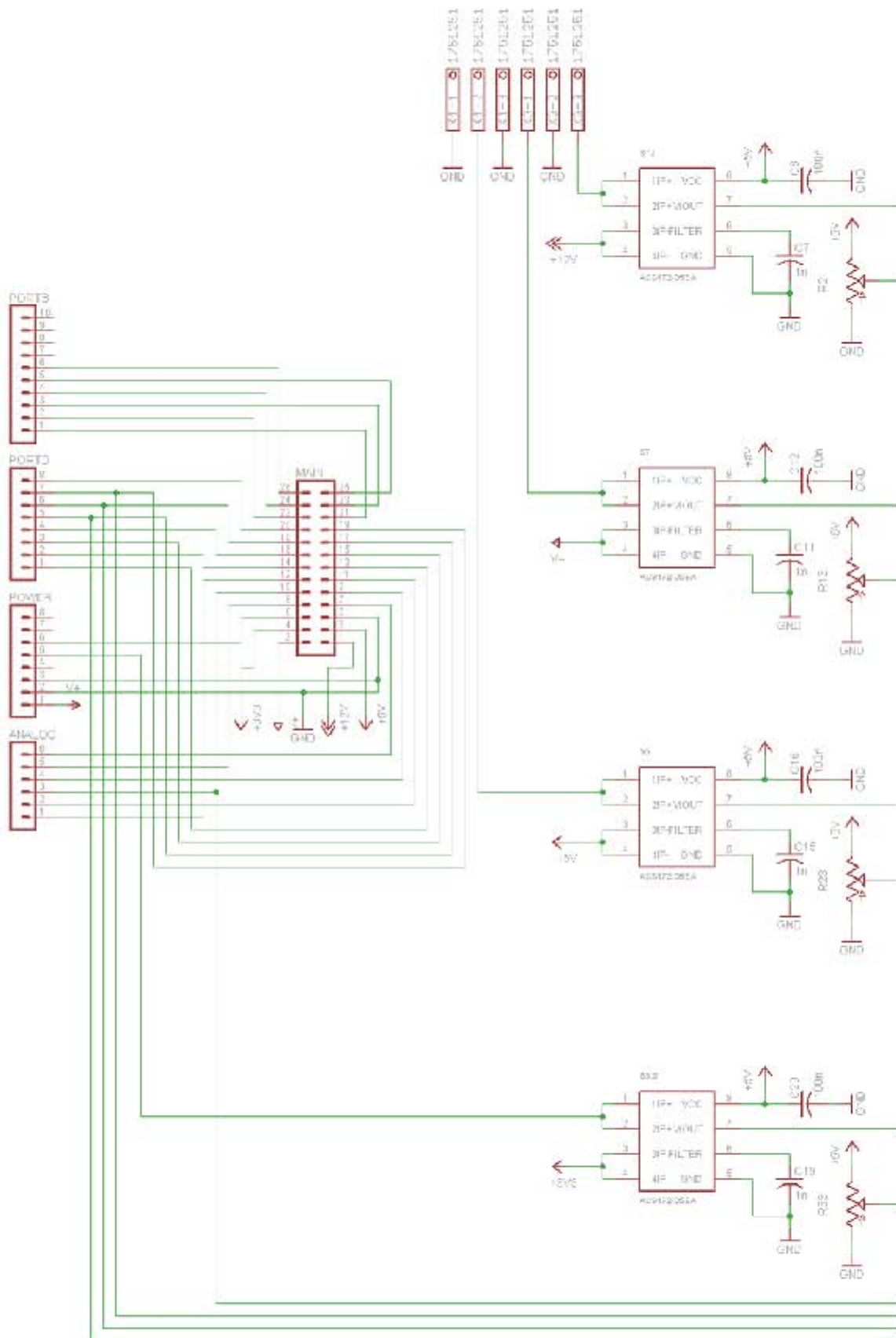


Figura 3.34: Esquemático del primer nivel (a)

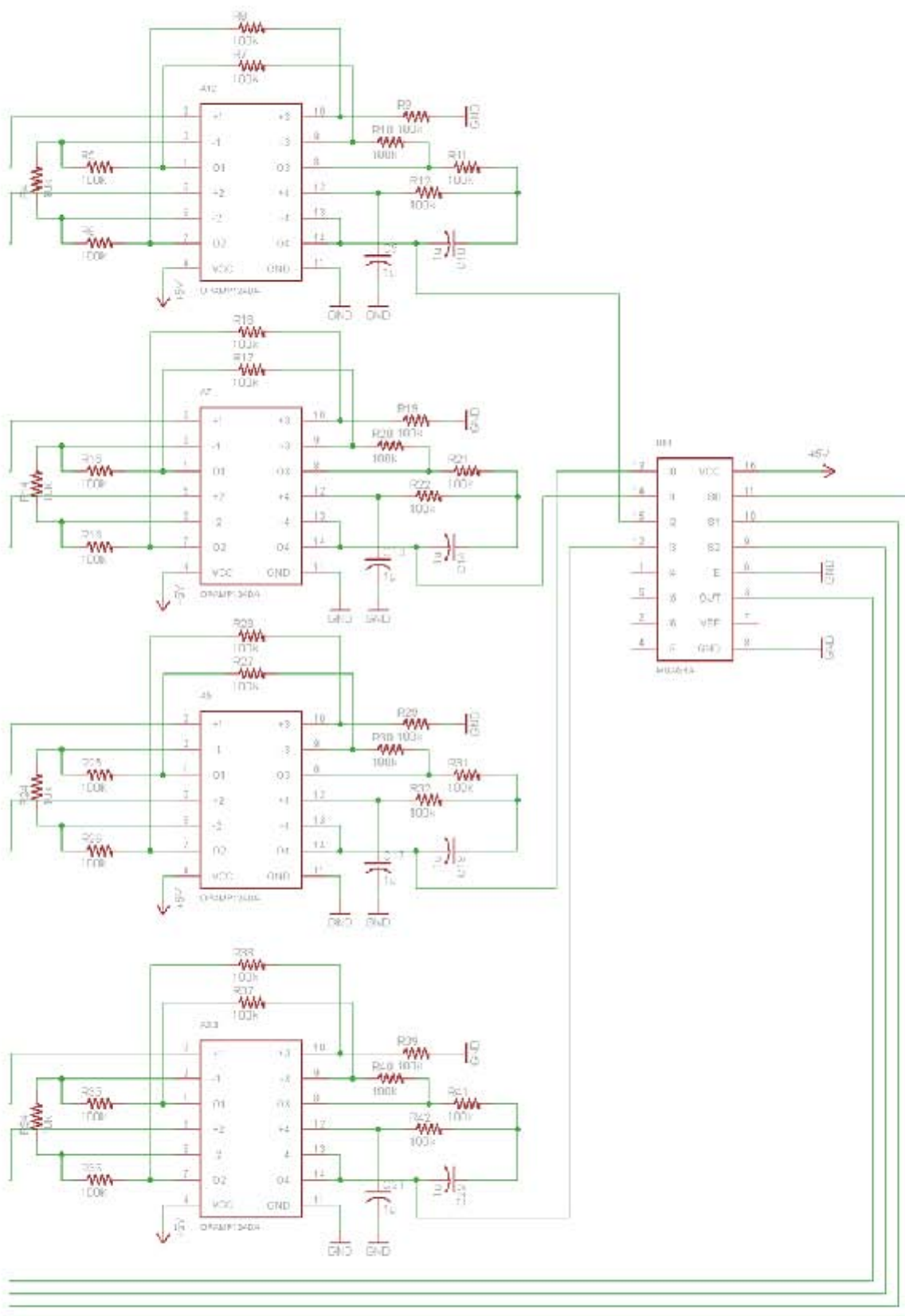


Figura 3.35: Esquemático del primer nivel (b)

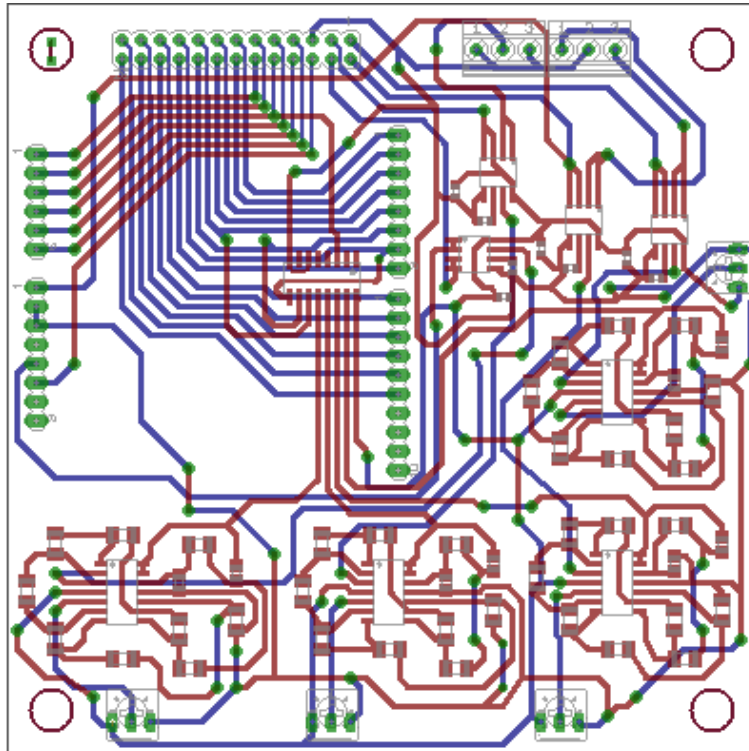


Figura 3.36: Diseño para PCB del primer nivel

La colocación de uno de los trimpot interfiere para la entrada USB del arduino, para que el componente no estorbe se deberá colocar del lado inferior de la placa, no afectará el diseño o el desempeño.

3.9.2. Segundo nivel

En el segundo nivel se incluirá el bus de datos y el bus de potencia, así como los 32 sensores de temperatura y los multiplexores correspondientes, también se incluirán los filtros necesarios a la salida de los multiplexores A y B. Cada multiplexor manejará 16 sensores de temperatura, cada sensor tiene tres terminales: VCC, GND y la señal de salida. Hay que diseñar una manera ordenada de realizar estas conexiones. Una idea era poner todas las terminales a un VCC común y a una tierra común en un punto específico de la placa y dejar independientes las señales de salida. Sin embargo, debido a que los sensores estarán ubicados en distintos puntos alrededor de la estructura habrá un desorden de cables. Siguiendo una idea similar al bus de datos, se utilizarán conectores de cable plano para distribuir los sensores. La figura 3.38 muestra la distribución de las terminales de los sensores en el conector para cable plano. Se implementará una medida contra ruido al trenzar los tres cables provenientes del sensor, además se mantendrán los cables de la longitud más corta posible. A fin de tener un fácil acceso a los conectores, se pondrán a lo largo de la orilla de la placa. Cada conector será de 24 pines y podrá albergar hasta 8 sensores de temperatura. Se necesitarán 2 conectores por multiplexor y habrá 4 en total para el segundo nivel. Se

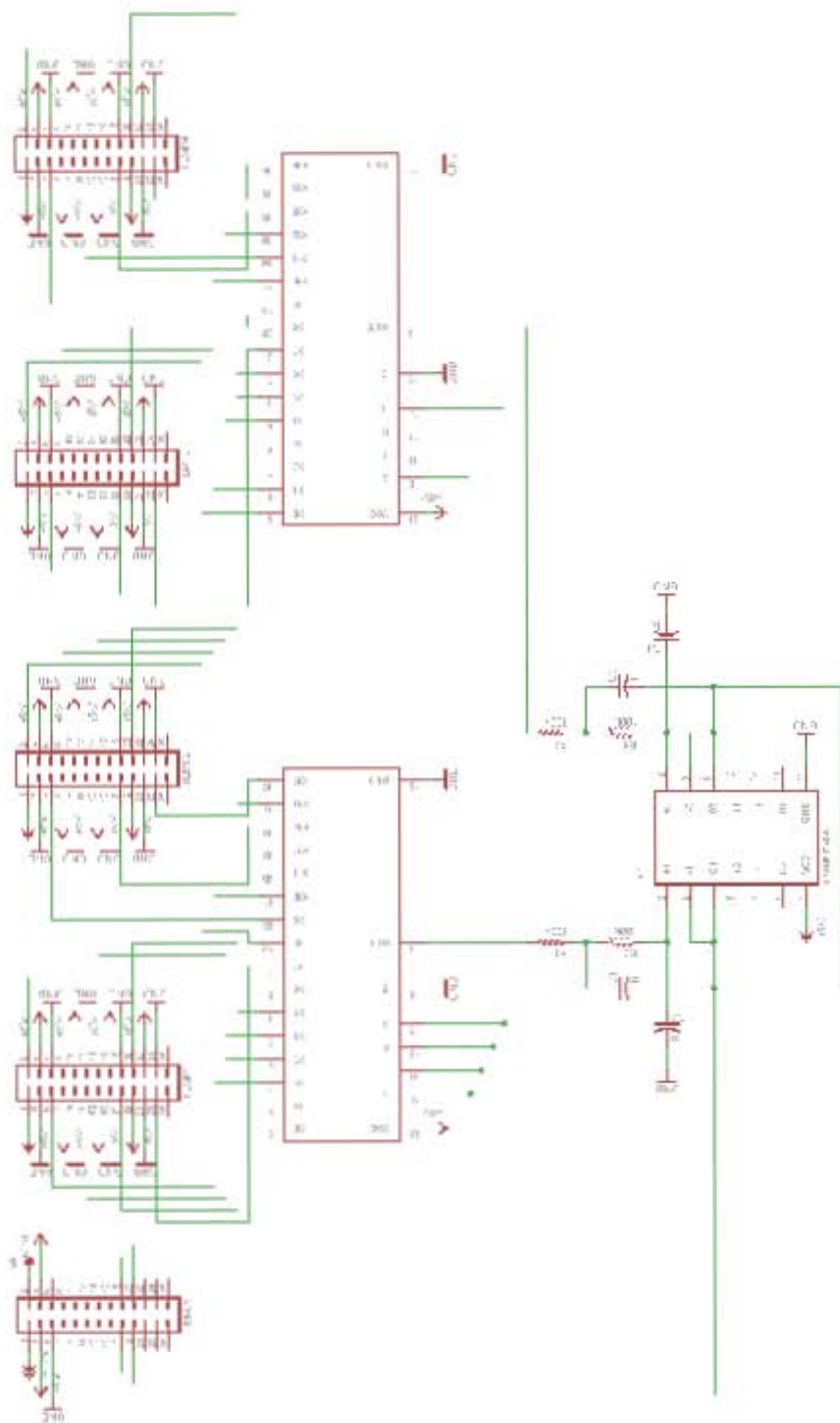


Figura 3.37: Esquemático del segundo nivel

utilizarán multiplexores de 16:1, se tendrá que recurrir al modelo MC14067B ya que las pruebas de fabricación realizadas con el CD74HC4067 fueron muy complicadas. Se puede observar el esquemático del segundo nivel en la figura 3.37.

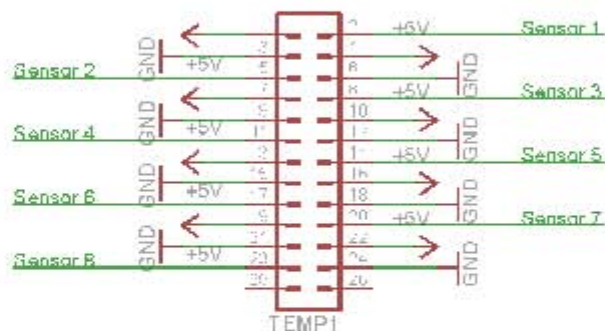


Figura 3.38: Distribución de sensores de temperatura en el conector

El problema con el CD74HC4067 es su tamaño, es de montaje superficial pero la distancia entre sus pines es de 0.35 mm (SSOP), ni siquiera las máquinas CNC que se utilizaron más adelante podían fabricar las pistas necesarias para pistas tan finas. Con el método de planchado de circuito se intentó fabricar las pistas y aunque se lograron hacer, soldar el componente fue de una dificultad muy alta, se necesita de un cautín muy preciso y una técnica muy profesional para poder soldar tal componente, por lo tanto se optó por utilizar el multiplexor CD4067BE de montaje through hole.

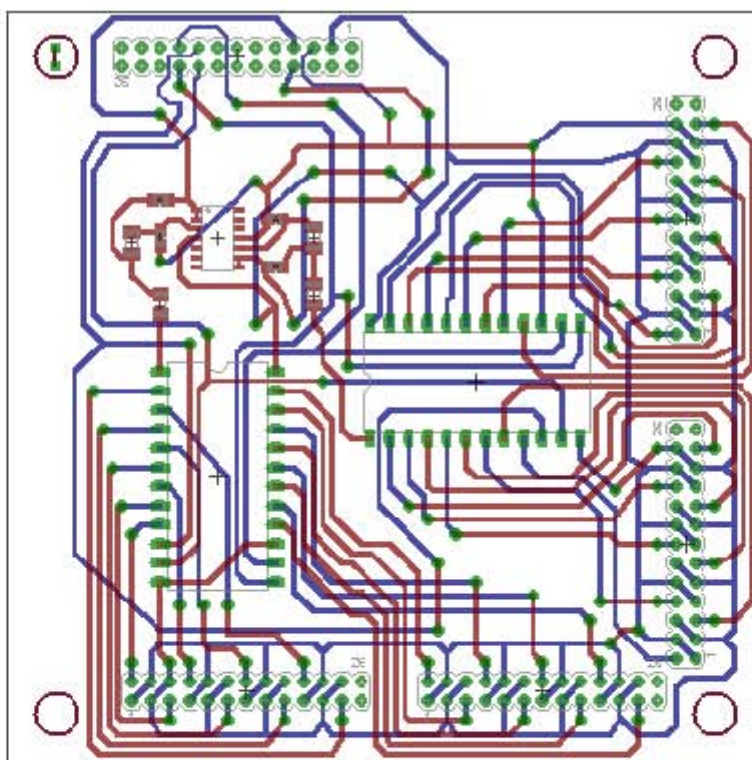


Figura 3.39: Diseño para PCB del segundo nivel

El diseño del PCB para el segundo nivel está plasmado en la figura 3.39. El bus de datos y de potencia ha sido colocado en la misma coordenada que el nivel anterior, (30.48 mm, 93.98 mm) a partir de la esquina inferior izquierda. Los conectores se distribuyeron a lo largo de los lados derecho e inferior, buscando proveer fácil acceso a ellos y mejor distribución para los sensores hacia es sistema. Los multiplexores A y B, así como el filtro, se colocaron en el centro.

3.9.3. Tercer nivel

El tercer nivel incluye sensores de temperatura, presión y humedad; utilizará los multiplexores C y E (16:1). Los sensores de presión requieren un circuito de acondicionamiento (propuesto en la figure 3.13), la señal será acondicionada antes de pasar al multiplexor. A la salida de ambos multiplexores, C y E, será colocado el filtro paso bajas. Se implementará el mismo tipo de conectores de cable plano para los sensores de humedad ya que sus terminales son iguales que las del sensor de temperatura (VCC, salida, GND). Las figuras 3.40 y 3.41 muestran el esquemático y la figura 3.42 el diseño para la PCB.

Se mantuvieron los conectores a las orillas derecha e inferior de la placa, también se montaron los sensores de presión hacia la orilla derecha para dejar espacio para los circuitos de acondicionamiento. El multiplexor C se fijó de lado izquierdo mientras que el E hacia el lado superior. Los amplificadores operacionales y los elementos necesarios para hacer el acondicionamiento de las señales se fijaron en el centro. El bus de datos y potencia se mantuvo en el mismo lugar. Se decidió poner un conector más grande que lo necesario para los sensores de humedad por si se requiere agregar algún sensor adicional. Debido a que entre el conector y el multiplexor no hay ningún circuito de acondicionamiento, se podrá poner otro sensor de humedad o cualquier otro que solo requiera polarización y entregar su señal de salida (VCC, salida, GND). Habrá cinco lugares disponibles.

3.9.4. Cuarto nivel

En el diseño del cuarto nivel se incluyeron 2 acelerómetros, la conexión y acondicionamiento para el puerto SPI que conecta con la memoria SD, un multiplexor y un conector para una cámara. Se incluyó el conector para la cámara porque iba a formar parte del sistema, al final, se decidió no utilizar la cámara. Sin embargo está el hardware listo para poder conectar una cámara de SSTV en configuración Scottie S2, si llega a ser necesario en un futuro. El conector para la memoria será para una memoria SD de tamaño estándar y los conectores para los acelerómetros son headers hembra donde se podrá introducir la pequeña tarjeta de prueba sobre la cual está montado el acelerómetro. Hay conexión física de los tres ejes de cada acelerómetro (x, y, z) hacia el multiplexor. Se utilizó un multiplexor de 8:1. El bus de datos y potencia se mantuvo en el mismo lugar que los niveles anteriores. Se pueden observar los diseños para este nivel en las figuras 3.44 y 3.43.

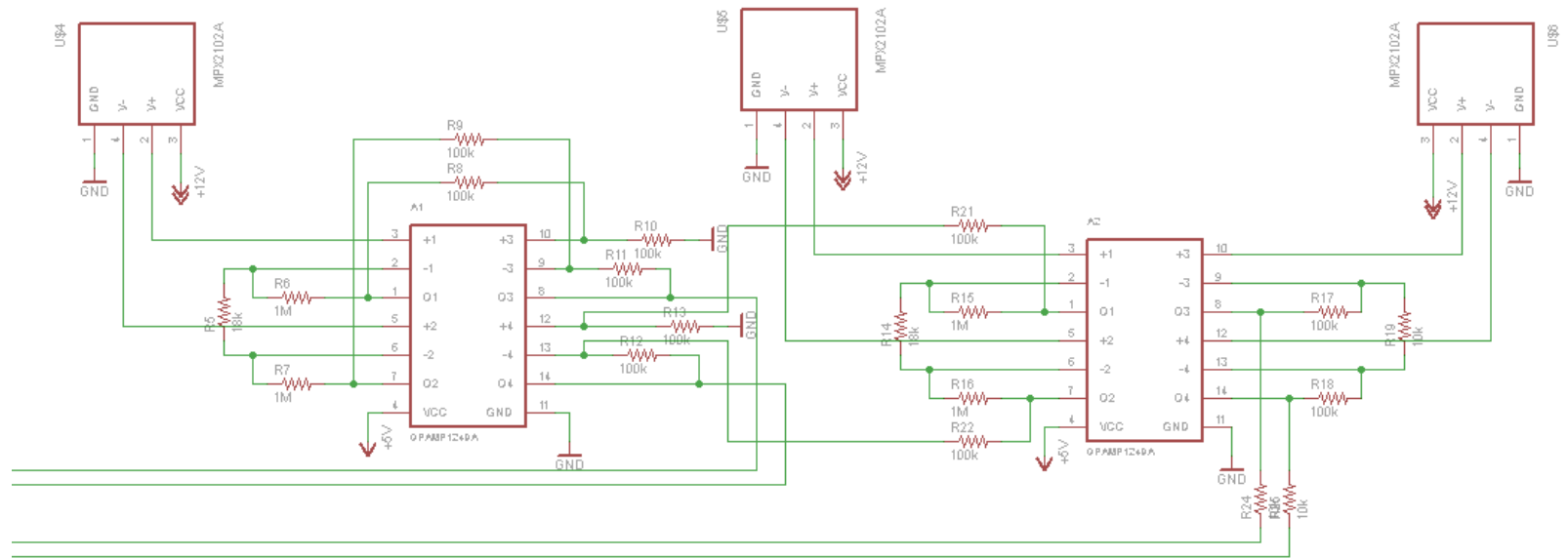


Figura 3.41: Esquemático del tercer nivel (b)

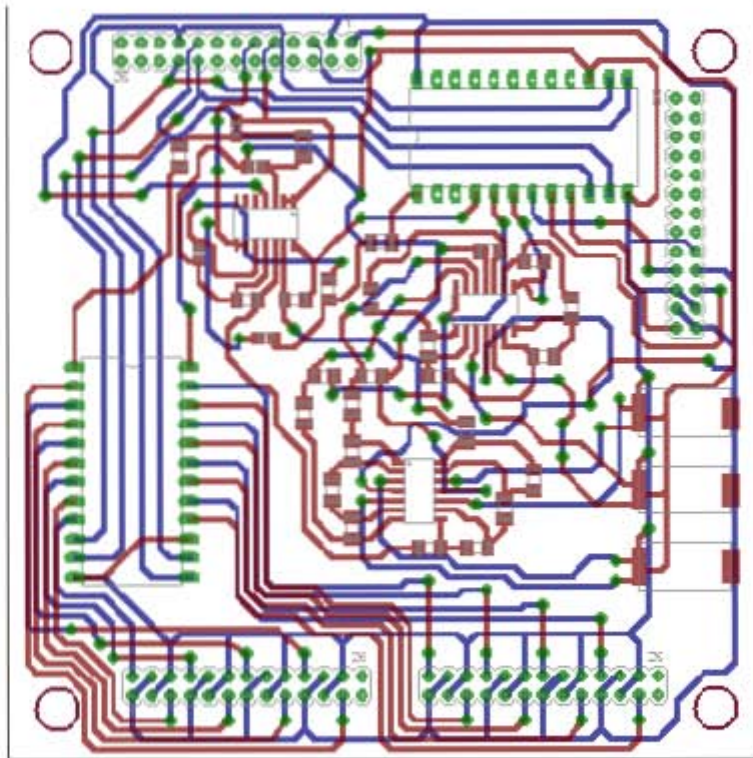


Figura 3.42: Diseño para PCB del tercer nivel

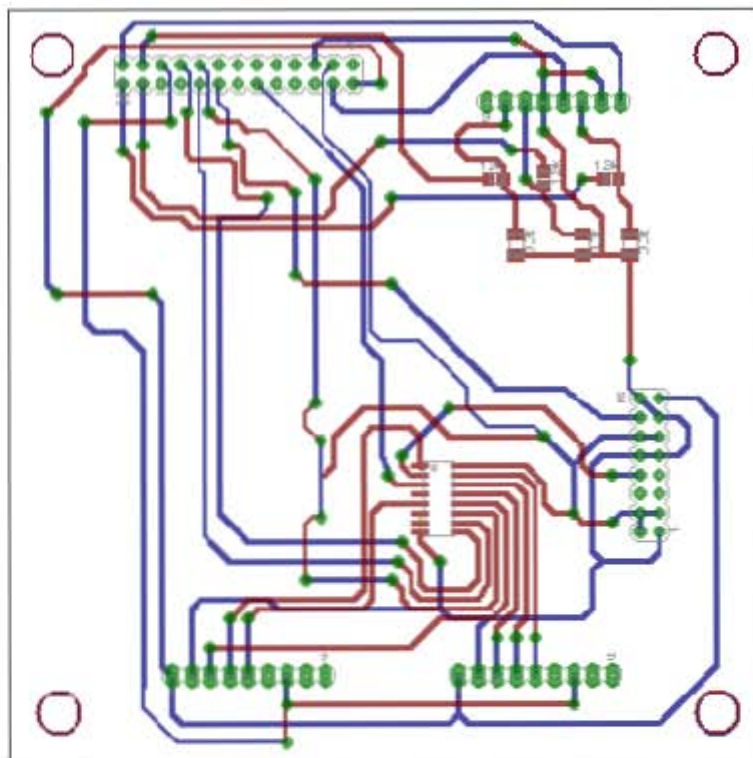


Figura 3.43: Diseño para PCB del cuarto nivel

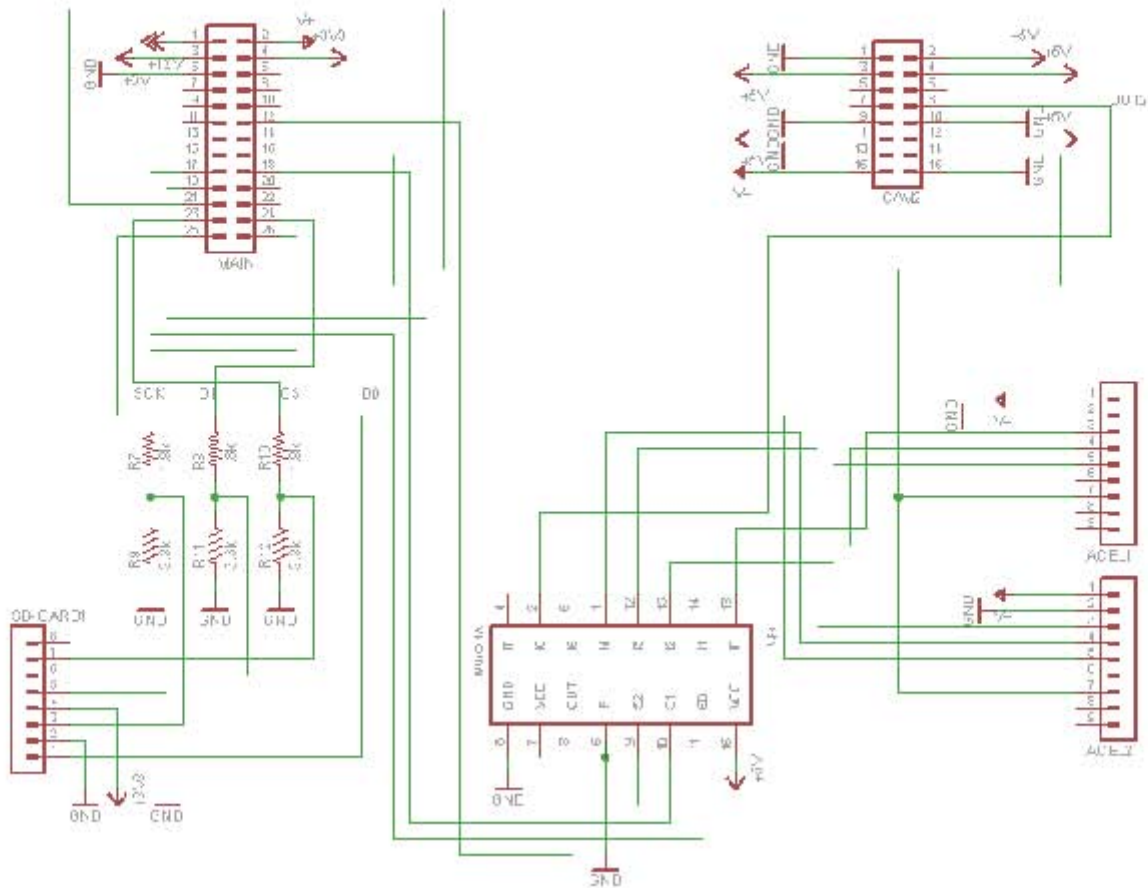


Figura 3.44: Esquemático del cuarto nivel

3.9.5. Componentes EAGLE diseñados

Para realizar los diseños de las PCBs se utilizó un programa llamado EAGLE de la empresa CadSoft. EAGLE cuenta con librerías bastante extensas de componentes de muchos fabricantes y algunas librerías estándar. A pesar de la amplia gama de componentes de donde escoger, no existían todos los que se necesitaban. En tal caso, hay que diseñar el componente para el esquemático y la huella para el PCB. Se siguió la metodología propuesta en la página de internet de la tienda de componentes electrónicos: Sparkfun [53].

Se creó una librería dentro de EAGLE llamada: *tmade*. Se tuvieron que diseñar *EAGLE parts* (componentes EAGLE) para el ACS712-05B (sensor de corriente), LM124D (arreglo de amplificadores operacionales), MPXM2102AT1 (sensor de presión), 74HC4051 (MUX 8:1), CD4067BE (MUX 16:1), CD74HC4067 (MUX 16:1). Como nota, las superficies rojas indican que el montaje es superficial (cara superior), si hay vía, el montaje será de through hole.

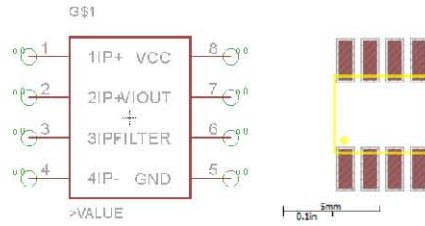


Figura 3.45: Diagrama y huella para ACS712-05B

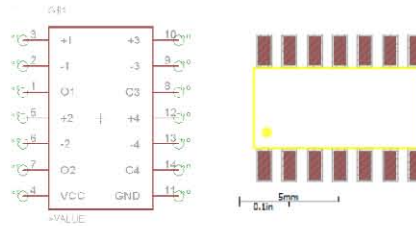


Figura 3.46: Diagrama y huella para LM124D

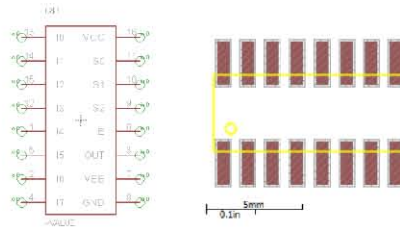


Figura 3.47: Diagrama y huella para 74HC4051

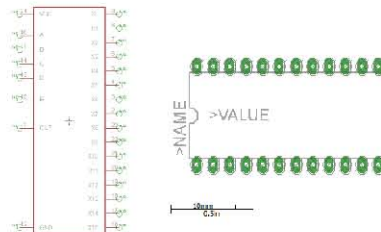


Figura 3.48: Diagrama y huella para CD4067BE

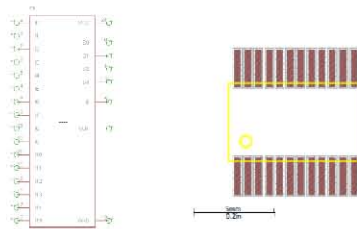


Figura 3.49: Diagrama y huella para CD74HC4067

3.10. Integración e implementación del prototipo funcional

En esta sección se describe la sucesión de eventos y métodos implementados para poder realizar la fabricación e integración del sistema diseñado.

3.10.1. Fabricación de PCBs

Una vez listos los diseños de las PCBs, hay que comenzar su fabricación. Hay diversos métodos para fabricarlas: planchado térmico, serigrafía, desgaste por CNC, etc. Cada una tiene sus ventajas y desventajas. El método de planchado térmico es rápido y barato, por lo que se utilizó para algunas pruebas; sin embargo, a veces su acabado es pobre debido al desgaste químico que recibe el cobre de la placa resultando en pistas incompletas. La serigrafía es cara de implementar pero su acabado es de alta calidad. Las PCBs hechas con CNC tienen un acabado de alta calidad, la rapidez de la fabricación dependerá de la complejidad del diseño. La desventaja es que la finesa de su acabado dependerá de las herramientas con las que cuenta, muchas veces no pueden hacer pistas muy delgadas, esto limita el tamaño de los componentes que pueden ser integrados al sistema.

Por decisión del grupo de trabajo se optó por fabricar las placas en CNC. Una recomendación al fabricar placas PCB que estarán en el espacio es que no se cubran con esmalte, como es el acabado de costumbre para cualquier PCB en la tierra. Esto se debe a la posible gasificación del esmalte al estar sometido a presiones muy bajas. Por lo que las PCB que se fabriquen, independientemente de la tecnología utilizada para fabricar, no podrán llevar máscara de soldadura.

Un problema grande con el cual se enfrentó fue la generación de cortos entre pistas. Al no utilizar máscara de soldadura, es muy fácil que pequeñas partículas de soldadura generen puentes entre la delimitación de la pista y el resto de la placa, si dos pistas tienen este problema se generará un corto circuito. Esto puede llevar a la destrucción parcial o total del sistema dependiendo de las señales en corto. Hay que asegurarse que tales cortos no sucedan, por lo que una revisión minuciosa es obligatoria. Tal proceso es muy tardado, requiere de un probador de continuidad, una lupa y un objeto capaz de romper el enlace entre la pista y la placa (como un cutter).

3.10.1.1. CAT - Juriquilla, Querétaro

El campus del CAT en Juriquilla, Querétaro, cuenta con una CNC capaz de fabricar PCBs. Nunca se habían fabricado PCBs de doble capa en el CAT entonces se tuvo que desarrollar una metodología para tal caso. La metodología se reportó a la coordinación del proyecto Quetzal-UNAM-MIT en la Facultad de Ingeniería, UNAM [54]. Ahí se podrá consultar que pasos se deberán seguir para asegurar una adecuada fabricación de PCBs doble capa. En Juriquilla se coordinó con el Maestro Rafael Chávez para utilizar la CNC (modelo: IEC3030, véase figura 3.50) que tienen en su laboratorio. Se utilizó una fresa de $1/8$ 10° 0.1 mm para hacer la fabricación.

Se fabricaron las placas para (a) el sistema de monitoreo de parámetros físicos y la del (b) subsistema de potencia la figura 3.51 muestra algunos ejemplos. La figura 3.52 muestra algunos errores provocados por la dimensión de la herramienta de corte. Al ser demasiado ancha, el algoritmo del CNC no reconoce un espacio entre las diversas pistas y vías. Otro problema que se generó al calibrar manualmente la profundidad del corte y por las deformaciones (curvatura) de las placas que fueron grabadas es que no se desgastó todo el cobre entre pistas. Las pistas estaban marcadas pero no se eliminó todo el cobre entre ellas y se generaron cortos entre pistas.

Corregir los errores que se presentaron al fabricar en Juriquilla tardaron mucho tiempo y fueron de un acabado no satisfactorio, por lo que se buscó fabricar con otra máquina.



Figura 3.50: Máquina CNC en Juriquilla

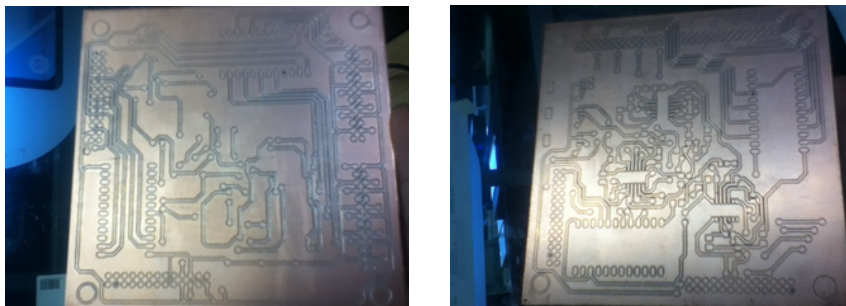


Figura 3.51: PCBs fabricadas con CNC en Juriquilla

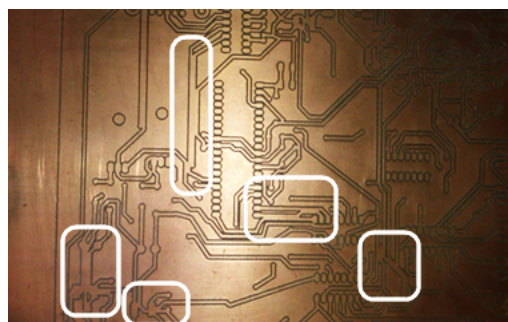


Figura 3.52: Errores generados por CNC



Figura 3.53: Trabajando en Juriquilla, Querétaro

3.10.1.2. Instituto de Ingeniería

Después de indagar que otros laboratorios tienen máquinas CNC que pudieran ser utilizadas para fabricar PCBs, el II nos abrió sus puertas. El II cuenta con una máquina de la marca MITS electronics, modelo: AutoLab (figura 3.54). Con una selección más amplia de herramientas, inclusive perforó las placas (lo cual se tuvo que hacer a mano en el caso de las de Juriquilla). El acabado de la placa se puede ver en la figura 3.56.



Figura 3.54: MITS AutoLab

3.10.2. Integración de los componentes a las PCBs

Ya hechas las PCBs, hay que montar todos los componentes. Se pueden utilizar los esquemáticos y los diseños de PCB como guía para saber donde hay que colocar cada

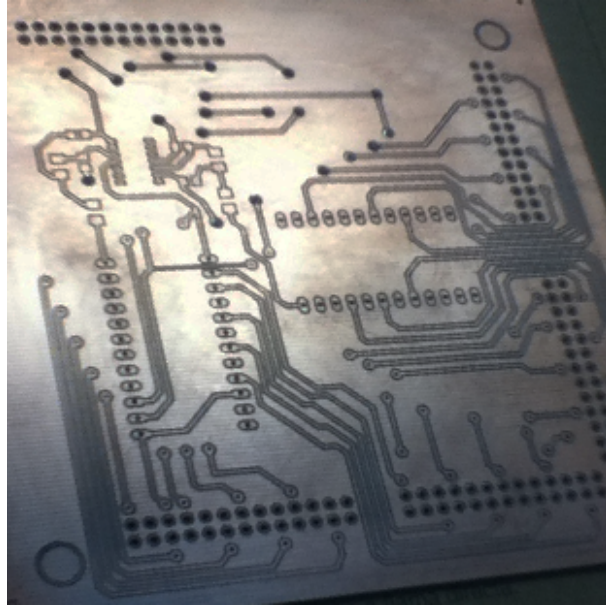


Figura 3.55: PCB fabricada con AutoLab en el I.I.

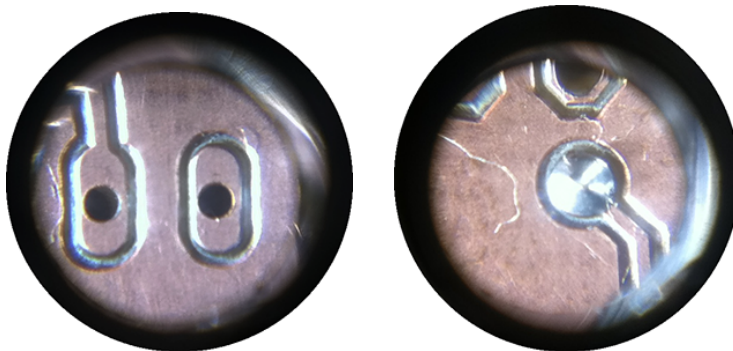


Figura 3.56: Detalles de las PCBs hechas con AutoLab

componente. Las placas que se diseñaron tienen muchas vias, las vias son un camino de unión entre la pista de un lado de la PCB a una pista en el otro lado de la PCB. Tales vias necesitan ser unidas por algún medio, ya que son una simple perforación. Existe un proceso químico capaz de realizar esta tarea. Deposita cobre dentro de la perforación y crea una unión entre ambos lados proveyendo continuidad entre las dos pistas, sin embargo, tal máquina es muy cara y no se cuenta con una. Otra opción es soldar un alambre entre ambos lados de la vía, el alambre será el conductor entre ambos lados y se soldará a la pista de cada lado. Hay aproximadamente 300 vias entre las cuatro PCBs diseñadas. Hay que soldar ambos lados de cada vía y cortar el alambre que va en medio, además, hay que revisar si no se generó algún corto entre la pista y la placa o alguna otra pista.

Se sugiere ir montando los componentes por altura, comenzando del más bajo al más alto. Si se colocan los componentes más altos primero, provocará que la placa esté en desequilibrio al estar apoyada para soldar. Se soldaron primero las resistencias

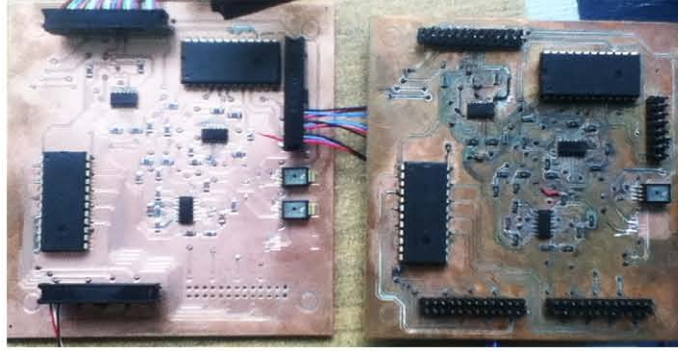


Figura 3.57: Tarjetas con componentes montados, ambas tarjetas tienen el mismo diseño grabado, la tarjeta de la izquierda fue la que se utilizó para el vuelo.

y capacitores de montaje superficial, después los circuitos integrados, los trimpot, los sensores y finalmente los conectores de cable plano.

3.10.3. Conectores para el bus de datos

La distribución de señales que lleva el bus se mencionaron en la tabla 3.18. Se utilizarán conectores porque se busca que el sistema pueda ser modificado fácilmente, si una tarjeta falla o se mejora, puede ser reemplazada; si ya no se requiere uno o se necesita agregar uno más, se pueda realizar fácilmente.

La idea inicial para el conector era utilizar cable plano regular (AWG 28) de 26 hilos, sin embargo, debido a las condiciones a las cuales se va a enfrentar el cable es muy probable que no sobreviva. El material por excelencia capaz de sobrevivir condiciones espaciales es el teflón como se mencionó en la sección de *Cables y Escudos* en el capítulo 2. Se decidió reemplazar el cable plano regular por cable plano recubierto de teflón. Sin embargo, no se encontró un distribuidor que fabricara lo que se solicitaba. Se recurrió a la presentación de un solo cable. El rollo que se compró es de la marca Alfa Wire, modelo 2842/7. Soporta un rango de temperatura entre los -60 y 200°C , es de calibre AWG 28 por lo que puede transmitir una potencia de hasta 226 mA, tolera tensión máxima de 250 V.

El problema a resolver ahora es poder insertar el cable de teflón dentro de los ganchos internos del conector hembra del cable plano. Con el cable plano de 26 hilos es muy sencillo, solo hay que aplicar presión y los ganchos internos se cierran alrededor de cada cable. Hay que cerrar con presión cada gancho alrededor de cada cable individual. Desgraciadamente esta es una tarea terriblemente complicada y tardada.

Se hicieron 3 cables con conectores hembra de ambos lados, 2 de ellos con un tercer conector (macho) en medio para poder conectarse con el siguiente. Se utilizó una secuencia de colores para evitar errores de conexión: rojo, negro, verde, blanco, azul. La figura 3.58 muestra un conector.

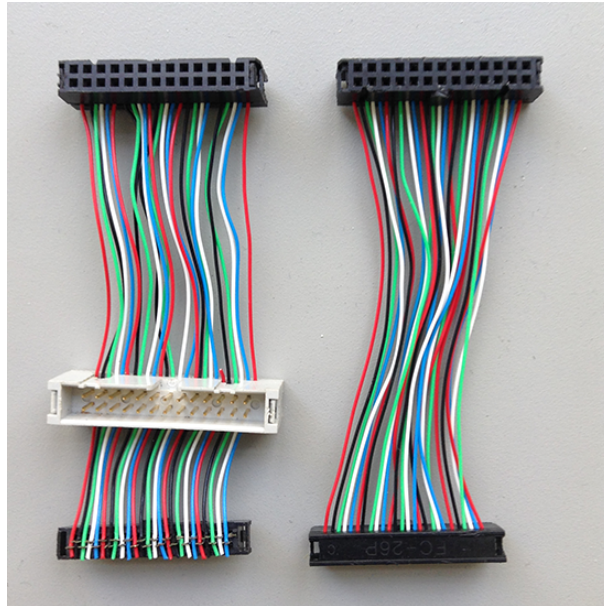


Figura 3.58: Interior del conector para bus de datos y potencia

3.10.4. Conectores para los sensores

Hay que conectar los sensores como se indicó en la figura 3.38. Para los sensores se utilizó un color por tipo de señal (VCC, salida, GND). Se hicieron diversas configuraciones para los sensores de temperatura: rojo - VCC, verde - salida, negro - GND; blanco - VCC, azul - salida, negro - GND. La configuración de color tiene la intención de identificar en que parte del cajón debe ser ubicado el sensor. Para los sensores de humedad se utilizó el siguiente código: rojo - VCC, azul - señal, negro - GND. La colocación de los cables dentro conector será igual que los conectores del bus de datos y de potencia.

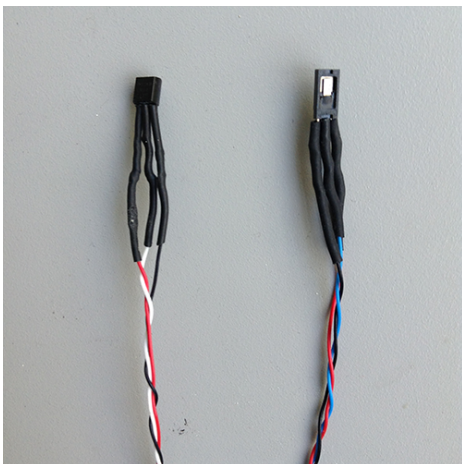


Figura 3.59: Sensores de temperatura y humedad

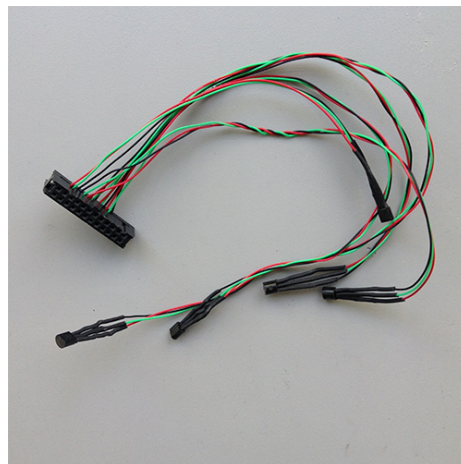


Figura 3.60: Conector con sensores de temperatura

3.10.5. Sistema acabado

3.10.5.1. Estructura de la trama de datos

La estructura de la trama de datos resultó como se ve en la figura 3.61.

Identificador del Proceso de Aplicación	Contador de secuencia de Fuente	Estampa de Tiempo	Datos de Fuente valores de los sensores separados por coma
11 bits	14 bits	4 bytes	Variable

Figura 3.61: Partes del Paquete Fuente a incluir en el diseño

En el archivo .txt que se genera en la memoria SD la trama de datos aparece como a continuación:

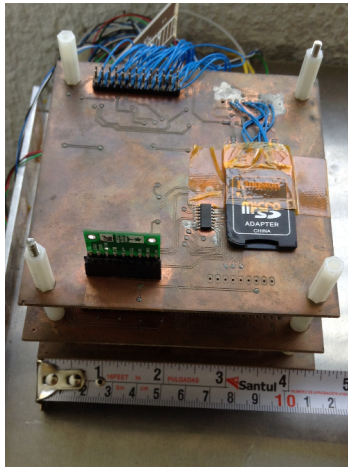
```
2037,0,1390845300,20,20,21,...,215,...,41,...,33,...,103,(LF)
2037,0,1390845301,21,21,21,...,215,...,39,...,32,...,102,(LF)
2037,0,1390845302,21,20,21,...,215,...,39,...,31,...,143,(LF)
2037,0,1390845303,20,20,20,...,214,...,40,...,30,...,103,(LF)
```

3.10.5.2. Sistema físico

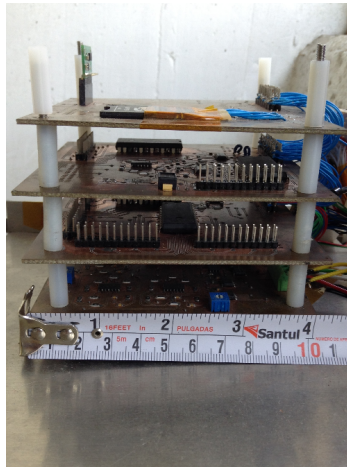
En ésta sección se presentarán imágenes del sistema acabado, figuras 3.62 a 3.65. El sistema fue terminado a finales de Julio del 2013. Sus dimensiones son: 11 x 10 x 10 cm. El área de las placas resultó ser un poco más grandes de lo esperado, se mantuvieron de ese tamaño por seguridad al maquinar en el CNC.



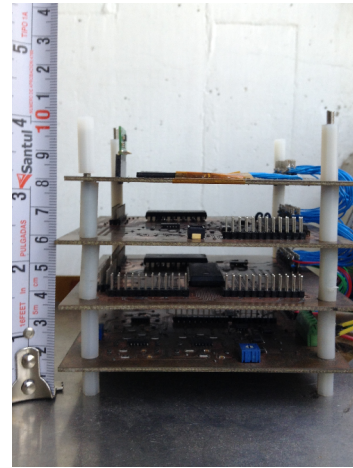
Figura 3.62: Sistema con sensores conectados



(a) Largo



(b) Ancho



(c) Alto

Figura 3.63: Dimensiones del sistema

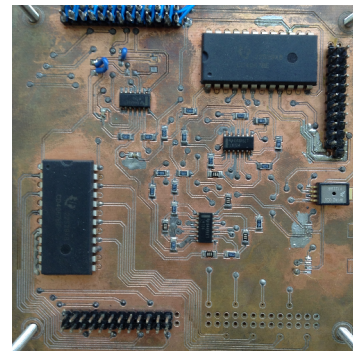
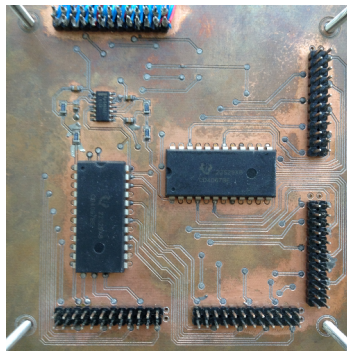
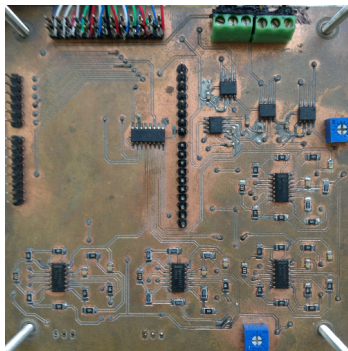
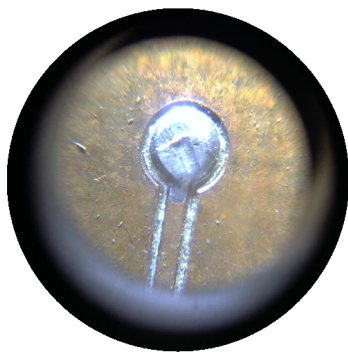
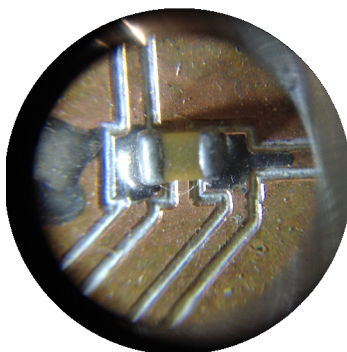


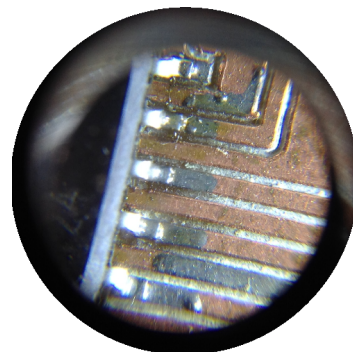
Figura 3.64: Ejemplos de las placas terminadas



(a) Via



(b) Capacitor



(c) C. Integrado

Figura 3.65: Detalles del acabado del sistema

Capítulo 4

Pruebas de rendimiento y operación

En esta sección se describe el desempeño del sistema una vez concluida su integración. Se propuso hacer una serie de pruebas antes de integrar el sistema al cajón para el vuelo.

4.1. Pruebas en tierra

Durante la integración de cada piso se fue probando cada sistema, el primer sistema en ser integrado fue el banco de memoria a fin de poder guardar y observar la información que iba generando cada sistema posteriormente integrado. Se fue probando sensor por sensor, asegurando que su respuesta fuera certera. Fue satisfactorio el desempeño del sistema. Cabe mencionar que no se compraron todos los sensores propuestos para el sistema. Como se ve en la tabla 4.1, falta un acelerómetro, un sensor de presión y once sensores de temperatura para tener el sistema completo. Para las pruebas se prosiguió como si los sensores estaban presentes para tener una idea de los tiempos que tarda y la cantidad de información que genera el sistema. Otra cuestión a considerar es la estampa de tiempo, la estampa se puede guardar como un número de 10 dígitos (Unix time). Es a partir de éste número que se generan la hora, minuto, y segundo que se guardan en la memoria. Así, la estampa de tiempo puede caber en una variable de 32 bits (4 bytes), o sea, en una variable de tipo long.

Tabla 4.1: Cantidad de sensores integrados al sistema

Sensor	Cantidad
Temperatura	37
Corriente	4
Presión	2
Humedad	3
Acelerómetro	1

Tabla 4.2: Estadísticas de tiempo del programa

Sección	Tiempo [ms]
Setup modo normal	29
Setup modo diagnóstico	30
Loop modo normal	239
Loop modo diagnóstico	241+retraso de usuario

Contenido	Memoria [bytes]
Encabezado+1 marco	150
1 marco	135

Tabla 4.3: Cantidad de información generada por muestra completa

Variable	Sensores	Tipo de dato	Bits generados
Temperatura	48	long	1536
Corriente	4	long	128
Humedad	3	int	48
Presión	3	long	96
Aceleración	3	int	48
Total			1856

4.2. Pruebas en cámara al vacío regulada

Después de haber probado el sistema en el laboratorio, se integró con los demás sistemas del cajón de *Quetzal* y éste dentro de *Pixqui*. La intención de la prueba era determinar la demanda de potencia del experimento completo y observar su comportamiento al estar en un ambiente de muy baja presión (3 mbar) y con un rango de variación de temperatura amplio.

La prueba se realizó satisfactoriamente para *Pixqui* pero se tuvo un problema con el sistema de monitoreo de parámetros físicos de *Quetzal*. Al revisar la memoria del sistema, no se guardó ningún dato. Se prosiguió a revisar la fuente de la falla. Se revisó el circuito para el puerto SPI, todo estaba bien. Se revisaron los sensores y todos respondían satisfactoriamente. Se revisaron las conexiones del Arduino, todo estaba correcto. Con el tiempo encima se tuvo que empacar y enviar el sistema junto con *Pixqui* a NASA. El problema tendía que ser resuelto en Nuevo México antes del vuelo.

4.3. Prueba a bordo del globo aerostático de la NASA-AEMB-F1

El día 4 de Agosto del 2013 se voló a la ciudad de Roswell en Nuevo México, en los Estados Unidos de América. De ahí se viajó dos horas hacia el noreste para arribar al poblado Fort Sumner, donde NASA tiene ubicado el sitio del Columbia Scientific

Balloon Facility (CSBF). Es en este lugar donde NASA lleva a cabo experimentos con globos aerostáticos antes de intentar una misión con cohetes. Los globos alcanzan alturas de más de 30 km. Su ubicación es ideal para este tipo de experimentos por la densidad de población muy baja, si llega a suceder algún accidente es poco probable que haya daños.

Los cuatro representantes de la UNAM, dos del grupo del CAT y dos del grupo ICN-II, fueron instalados en el hangar *negro* del CSBF. Ahí se les proveyó equipo y material para revisar el experimento y realizar modificaciones si fuese necesario. El paquete conteniendo el experimento arribó hasta el día 6 de Agosto. El vuelo estaba planeado para el 12 de Agosto.

Inmediatamente se se prosiguió con la revisión del sistema por la falla detectada en la prueba anterior. Desmontando el sistema de sus postes, se prosiguió la prueba. Se notó que dependiendo de la posición en la cual se ubicaban las placas, el sistema guardaba datos o no. Esto llamó la atención y se determinó que había un falso contacto en alguna línea del bus de datos que conectaba a la memoria. Se revisó el bus, y efectivamente había falso en dos de las líneas del bus, las correspondiente a D12 y D13. Se tuvieron que abrir los conectores y se decidió reforzar las conexiones con soldadura, ya que el ensamblado de los conectores es con presión. Se reforzaron en seis puntos, en cada conector negro, y se volvió a probar. Aún no funcionaba. Se volvió a revisar y ahora había corto en las líneas D10 y D11. También se reforzaron y se volvió a probar. Funcionó la solución, pero no por mucho tiempo. Para la tercera prueba de nuevo había falso contacto en algún punto de los conectores. Con presión en las uniones de los conectores, el sistema guardaba datos. Para intentar mantener presión en las uniones, se le colocaron unos cinchos. Daba buen resultado 4 de cada 10 veces. Se optó por hacer unos conectores nuevos, pero se temió que volviera a suceder el mismo problema.

Agotando las ideas, se recordó un método utilizado para fabricación de circuitos llamado *wire wrap*. El método de wire wrap consiste en dar siete vueltas de alambre alrededor de un poste donde se necesita la conexión. Este método aumenta la confiabilidad del sistema al tener contactos redundantes en una unión. No necesita soldadura. Es capaz de soportar mucha tensión en cada alambre y es menos susceptible a fallas por vibración [55].

Se eliminaron todos los conectores del bus de datos y potencia y se reemplazó por uniones wire wrap con cable de teflón. Por ser cable, se le agregó un poco de soldadura ya que no tenía tanto agarre alrededor de los postes de los headers de las conexiones al bus. En las figuras 4.1 y 4.2 se podrá observar el resultado.

Una vez integrado el bus con wire wrap, funcionó perfectamente la memoria. Se prosiguió a hacer las pruebas necesarias. En el registro de las pruebas se notó que el valor de algunos de los sensores no variaba a pesar de que se les hacía alguna alteración. De nuevo se continuó con la revisión del sistema y se encontró que algunos multiplexores estaban fallando. Los multiplexores de modelo CD4067BE no variaban el valor de su salida. Se les hicieron pruebas para tratar de cambiar el canal de entrada pero no reaccionaron a ningún cambio digital. Curiosamente estaban fijadas en un valor alrededor de los 3 V. Después de algún tiempo variaba el valor y se volvía a restablecer. Se trató de cotizar tales multiplexores en línea para reemplazarlos, pero tal

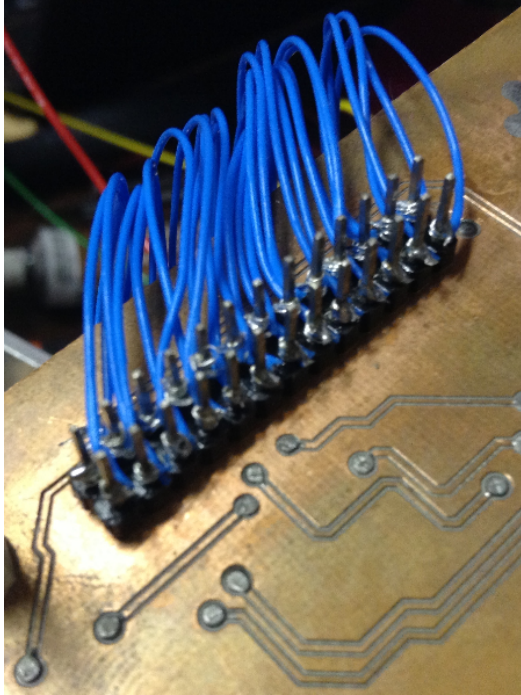


Figura 4.1: Conexión wire wrap

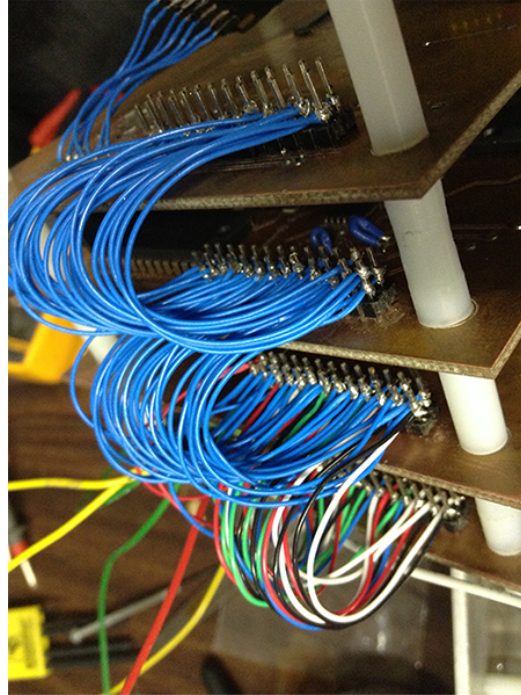


Figura 4.2: Bus con wire wrap

modelo se compró en México y no había proveedores en los Estados Unidos que pudieran entregarlo a tiempo. Agregando al problema no se contaba con la herramienta necesaria para poder desoldar tales circuitos integrados. Se intentó, durante la etapa de diseño, desoldar uno de estos multiplexores pero como está soldado de ambos lados de la placa, fácilmente levantaba las pistas. Los multiplexores afectados fueron: A, B, C, E, es decir, los que se encargaban de manejar los sensores de temperatura, presión y humedad.

Sin hallar mejor solución, se decidió utilizar un Arduino MEGA extra que se llevó para integrar una tarjeta de emergencia. Aprovechando los 16 puertos analógicos, se decidió poner 15 sensores de temperatura y un sensor de humedad. No se pudo agregar el sensor de presión porque es de montaje superficial. Desgraciadamente no se consiguió un multiplexor para aumentar la capacidad del sistema. Se le agregó una memoria al igual que al sistema original. El sistema de emergencia (SMPF-E) fue montado sobre parte de una tarjeta fenólica con forma de protoboard pre perforada. Se montó el circuito para la interfaz SPI con la memoria sobre una placa *galleta*. Se utilizaron headers para poder acoplarse con la tarjeta del Arduino MEGA. Los sensores para el sistema de emergencia se tomaron de los que estaban integrados al sistema original. El código utilizado para el sistema se encuentra en el apéndice A.3. El sistema de emergencia se puede observar en la figuras 4.5 y 4.6.

Otra situación que ocurrió en Fort Sumner fue la reestructuración de la duración del vuelo. Debido al mal clima, se fue atrasando nuestro vuelo. A bordo de la góndola donde es *Pixqui* sería montado iban varias misiones. Una de ella prioritaria y solo necesitaba 2 horas de vuelo para completar su misión. Si las condiciones climáticas

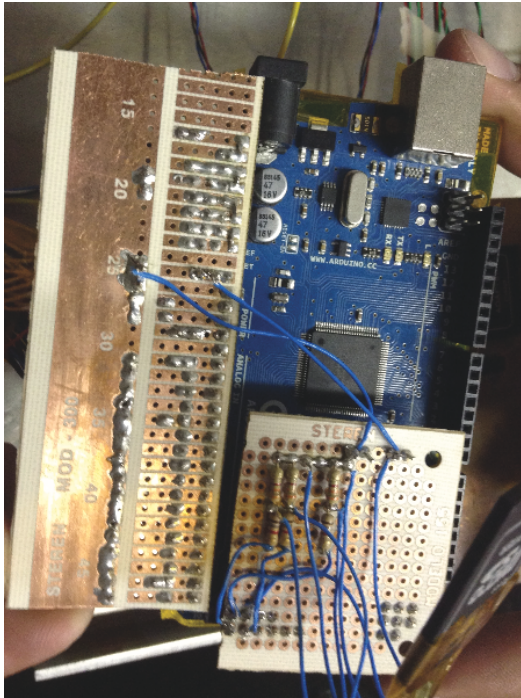


Figura 4.3: Circuito de emergencia visto de frente

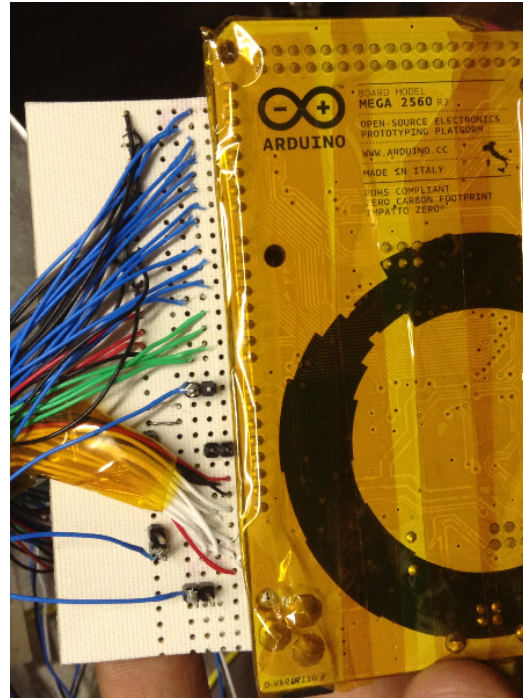


Figura 4.4: Circuito de emergencia visto de atrás

no eran favorables, se iba a terminar la misión al completar la misión de esa carga especial. Se tenía contemplado hacer un muestreo de los sensores cada 5 segundos. Con el tiempo acortado, los responsables del cajón *Quetzal* sugirieron reducir el tiempo entre muestras lo más posible, a fin de tener una curva con mayor resolución. Se tuvo que quitar el procesamiento extra que consumía tiempo y se enfocó el programa a obtener muestras. Se decidió que era mejor tener una mayor resolución y hacer el procesamiento en tierra que perder tiempo con el procesamiento. Se programó para que el sistema original tomara una muestra completa de los sensores cuatro veces por segundo, cada 250 ms. Así se podría sincronizar con el sistema de emergencia y el sistema de captura de imágenes que también se incluyó en el cajón. Tanto el sistema de monitoreo original como el sistema de emergencia recibieron software nuevo para lograr esto, los códigos se encuentra en el apéndice A.2 y A.3. El software está basado en el programa original, se eliminaron los algoritmos de procesamiento, se eliminaron también los parámetros de identificación y la estampa de tiempo se cambió a formato hh:mm:ss. La nueva estructura de datos se ve así:

```
02:25:06,11,10,11,...,215,...,41,...,33,...,103,(LF)
02:25:07,10,10,11,...,215,...,40,...,32,...,99,(LF)
02:25:07,10,9,10,...,215,...,41,...,31,...,100,(LF)
```

Los sensores que no se utilizaron en el sistema de emergencia se mantuvieron en el sistema original, con la esperanza de que se pudiera capturar algún valor durante el vuelo. La tarjeta adicional se integró al sistema original por medio del bus de potencia como se puede ver en las figuras 4.5 y 4.6.

Tabla 4.4: Distribución de los sensores de la tarjeta de emergencia

No.	Variable	Midiendo variación en
0	Temperatura	Estructura
1	Temperatura	Estructura
2	Temperatura	Estructura
3	Temperatura	MOSFET del sistema de potencia
4	Temperatura	Cámara digital
5	Temperatura	Sistema de monitoreo de parámetros físicos
6	Temperatura	Debajo del Sistema de monitoreo de parámetros físicos
7	Temperatura	Estructura
8	Temperatura	Caja de pilas
9	Temperatura	Estructura
10	Temperatura	Microprocesador de la cámara
11	Temperatura	Sobre material de prueba
12	Temperatura	Estructura
13	Temperatura	Transistor importante del sistema de potencia
14	Temperatura	Estructura
15	Humedad	Medio Ambiente

Se llevó a cabo una nueva distribución de sensores debido a la falla del primer sistema. En la figura 4.7 se mostrará la distribución de los sensores de temperatura pero únicamente los de la tarjeta de emergencia. En la tabla 4.4 se describe que es cada elemento.

Una vez funcionando los dos sistemas, se integraron al cajón. Se selló el cajón y se integró a *Pixqui*. Una vez cerrado y sellado *Pixqui*, se trabajó con el equipo de NASA para poder integrar *Pixqui* a la góndola. Había cuestiones térmicas y de fuerzas de impacto que resolver para poder integrar el experimento a la góndola. Además el sistema tenía que pasar unas pruebas de compatibilidad electromagnética para poder permanecer abordo de la góndola. Por la acelerada cuestión de la integración no se pudieron hacer pruebas adicionales en tierra del sistema de monitoreo. En las figuras 4.8 a 4.13 se muestra *Pixqui* y la integración de *Pixqui* a la góndola.

Se realizó el lanzamiento el 19 de Agosto de 2013 debido a continuas demoras a causa del mal tiempo. El equipo de México tuvo que regresar el 18 de Agosto, por lo que no se pudo presenciar el vuelo en vivo. El vuelo duró aproximadamente 8 horas y alcanzó una altura de 32 km. El vuelo duró mas de lo que se había previsto, pero así fue de mayor provecho para el experimento. La góndola cayó pasando el límite entre Nuevo México y Arizona. Fue recuperada satisfactoriamente y enviada de vuelta a México una semana después. El paquete arribó al ICN el 5 de Septiembre de 2013. Todas las personas involucradas en el proyecto estuvieron presentes para el desarme. En el desarme, el cajón de *Quetzal* fue recuperado satisfactoriamente, así como las memorias de los sistemas integrados. En las figuras 4.14 y 4.15 se detalla el arribo de *Pixqui* y la recuperación del cajón.

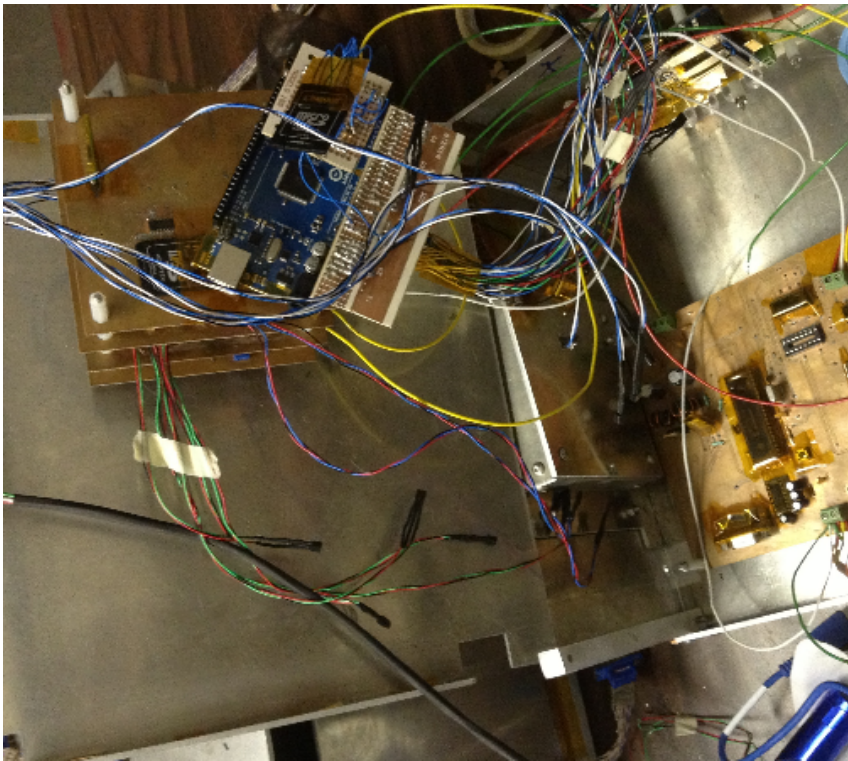


Figura 4.5: Cajón abierto con todos los sistemas integrados

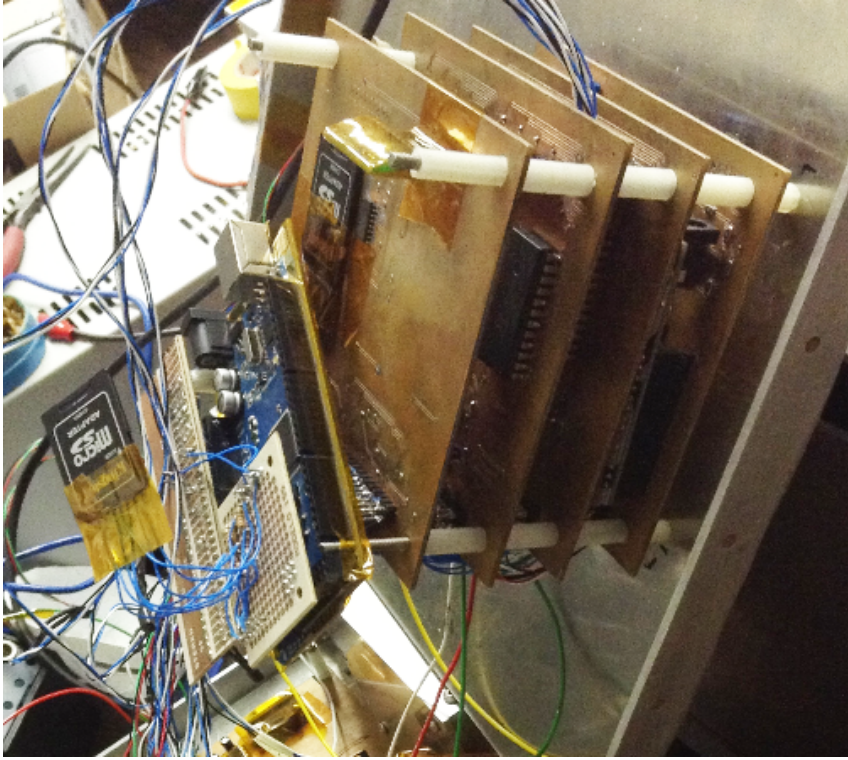


Figura 4.6: Tarjeta de emergencia colocada sobre sistema original

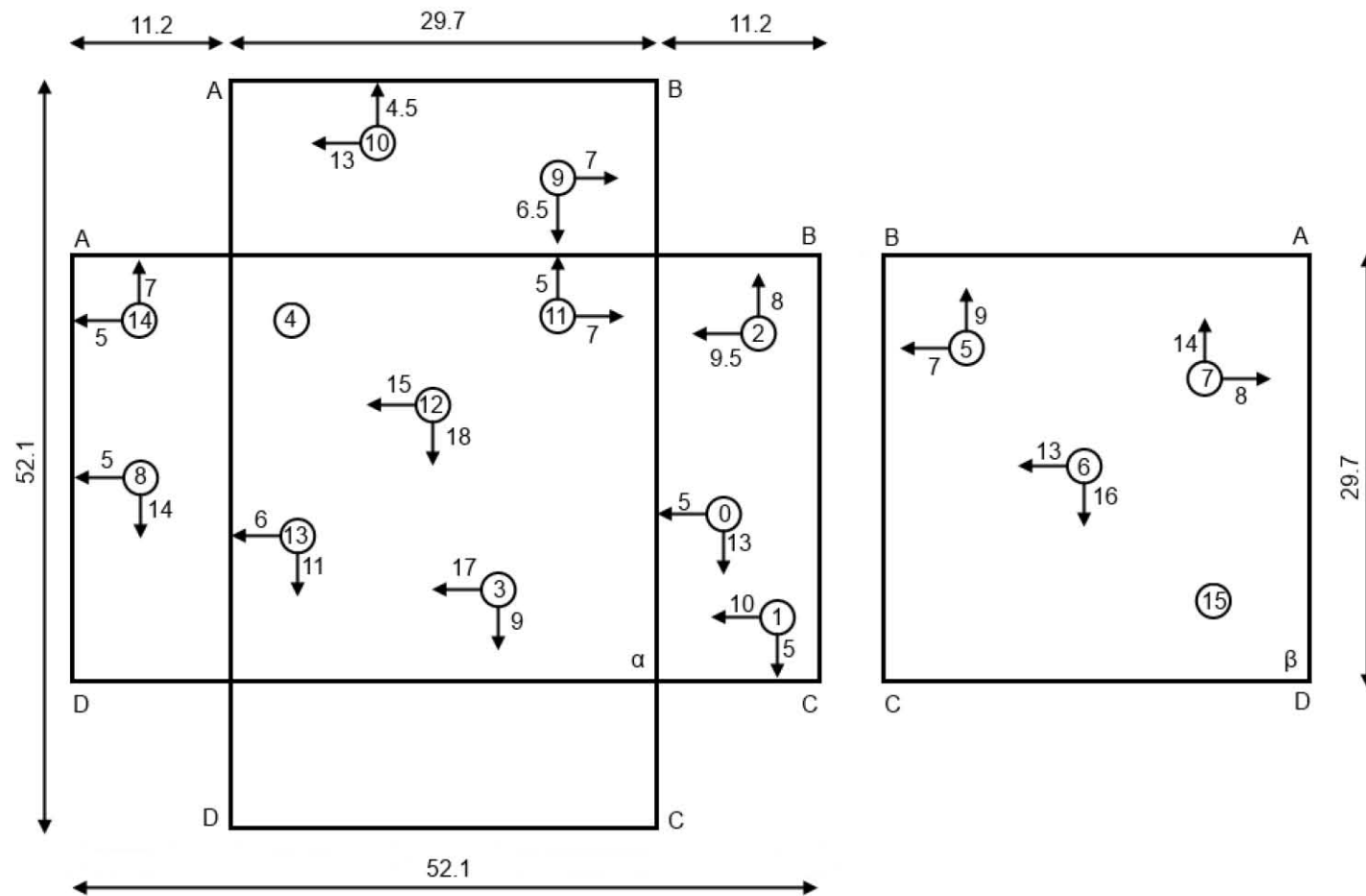


Figura 4.7: Distribución de los sensores de la tarjeta de emergencia en el cajón



Figura 4.8: A. Serna sellando el cajón de Quetzal

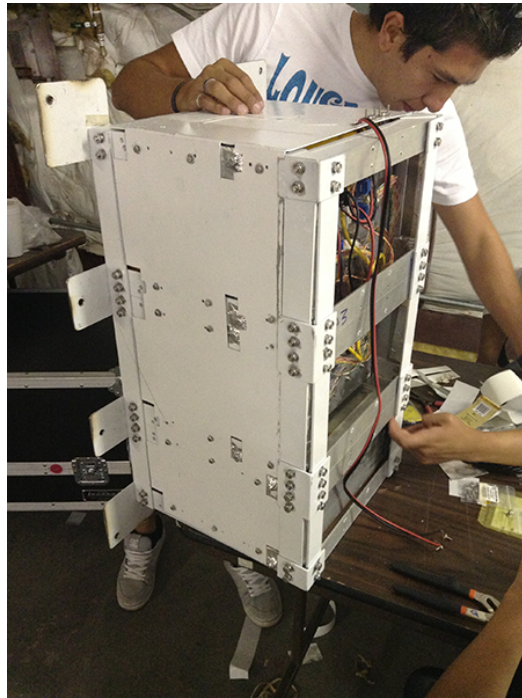


Figura 4.9: O. Domínguez sellando Pixqui

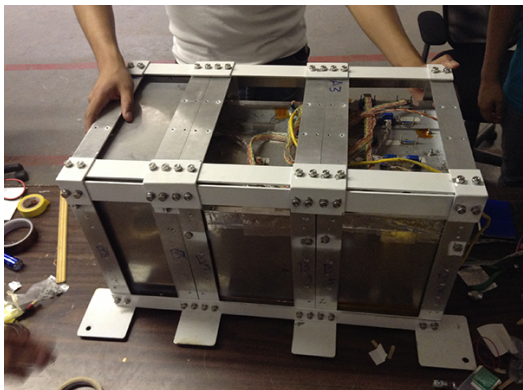


Figura 4.10: Pixqui antes de cerrar y sellar

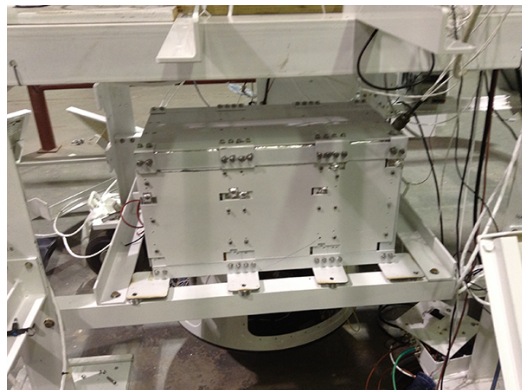


Figura 4.11: Pixqui montado en la góndola



Figura 4.12: A.Serna frente a la góndola de NASA



Figura 4.13: Equipo de NASA revisando la góndola



Figura 4.14: Pixqui es entregado al ICN

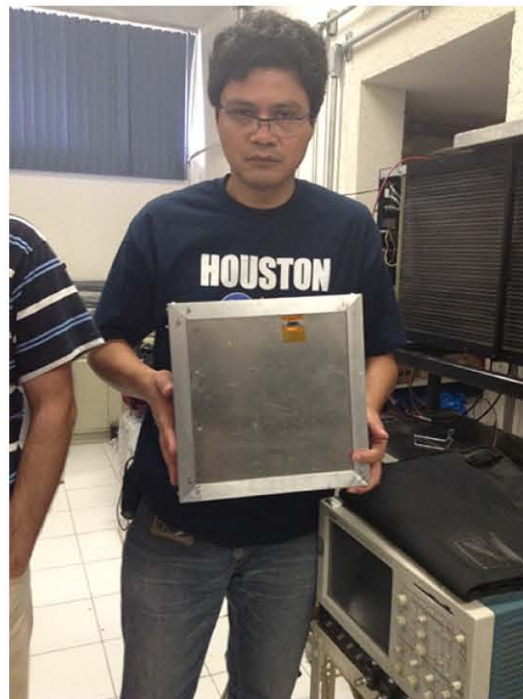


Figura 4.15: Dr. J. Ferrer con el cajón de Quetzal recuperado

Capítulo 5

Resultados y Conclusiones

Las características del SMPF original se expresan en la tabla 5.1, los resultados que se presentan después provienen del SMPF sin todos los sensores y del SMPF-E.

Como se mencionó en el capítulo 4, los datos que entregaron los sistemas SMPF (sin todos los sensores) y el SMPF-E se guardaron sin procesar. Teniendo los archivos, se les aplicó los algoritmos desarrollados. Las siguientes figuras ilustran algunas de las variables que se consideraron relevantes para el estudio. En algunas figuras se compara la información que obtuvo NASA con la que adquirió el sistema de monitoreo con el fin de comparar que variación hay entre los dos sistemas de adquisición de datos. En las figuras del 5.1 al 5.10 se ilustran las diversas señales que fueron monitoreadas. Se mencionarán los máximos y mínimos de cada señal muestreada.

NASA, con su sistema de telemetría, monitoreó cinco parámetros: posición (GPS), altura, potencia, temperatura, y radiación de calor. Tuvieron especial interés en monitorear altura contra temperatura, tiempo contra temperatura, tiempo contra radiación de calor, tiempo contra potencia, y el estado del GPS.

NASA encendió su sistema de adquisición de datos después de cuando se encendió *Pixqui*, se calcula que dos horas después ya que ellos tienen un registro de 8 horas con 24 minutos. El SMPF registró 10 horas con 25 minutos y 8 segundos de información, mientras que el SMPF-E registró 10 horas con 24 minutos y 32 segundos. El SMPF generó un archivo de 33,191,160 bytes, o sea, 31.6 MB. El SMPF-E generó un archivo de 12,710,816 bytes, o sea, 12.1 MB. El SMPF realizó 165369 muestras completas durante el vuelo, mientras que SMPF-E realizó 172313. La cantidad de bytes promedio por muestra completa del sistema SMPF fue de 200 bytes mientras que en el SMPF-E fue de 74 bytes.

En la figura 5.1 la temperatura del ambiente varió desde los -55.15 a 25.51 °C, debajo de la góndola hubo una variación de -8.57 a 25.32 °C. Parte de la estructura del cajón (S9) experimentó una variación desde los -16.29 °C a los 26.34 °C. Para tener una idea más clara de la variación de temperatura que experimentó la estructura del cajón se puede observar la figura 5.2. Los datos dados son en °C, SO: -15.51 a 27.11 , S1: -16.29 a 27.89 , S2: -18.61 a 25.56 , S7: -12.41 a 27.89 , S9: -16.29 a 26.34 , S12: -18.61 a 30.21 , S14: -13.96 a 27.11 . Los sistemas aledaños afectan la temperatura que experimentó cada punto.

Se puso un sensor encima del SMPF (SMPF 1) y uno debajo (SMPF2), se puede

Tabla 5.1: Características del SMPF

	Valor	Unidad
Carac. de Potencia		
Voltaje de suministro	+12,+7,+5	V
Consumo de corriente Total	36.0586	mA
Consumo de corriente +12V	6.72	mA
Consumo de corriente +7V	0.516	mA
Consumo de corriente +5V	11.4226	mA
Consumo de corriente +3.3V	17.4	mA
Carac. del procesador		
Microcontrolador	ATmega328	
Velocidad	16	MHz
Resolución ADC	10	bits
Tiempo de muestreo	0.013 a 0.26	mS
Protocolos de comunicación	USB,SPI,I2C	
Procesamiento		
Tiempo de setup	29	mS
Tiempo de loop	239	mS
Trama de datos	295	bytes
Entradas para sensores		
Total	60	
Para temperatura	48	
Para corriente	4	
Para presión	3	
Para humedad	3	
Para aceleración	2	
Rango de medición de los sensores		
Temperatura	-40 a 125	°C
Corriente	0 a 680	mA
Presión	0 a 100	kPa
Humedad	1 a 100	%HR
Aceleración	-2 a 2	g
Sensibilidad de los sensores		
Temperatura	6.25	mV/°C
Corriente	-3.2	mV/mA
Presión	0.044	mV/kPa
Humedad	0.0307	mV/%HR
Aceleración	800	mV/g
Carac. de memoria		
Unidad de memoria	SD	
Capacidad de memoria	8	Gb
Volumen	11x10x10	cm ³

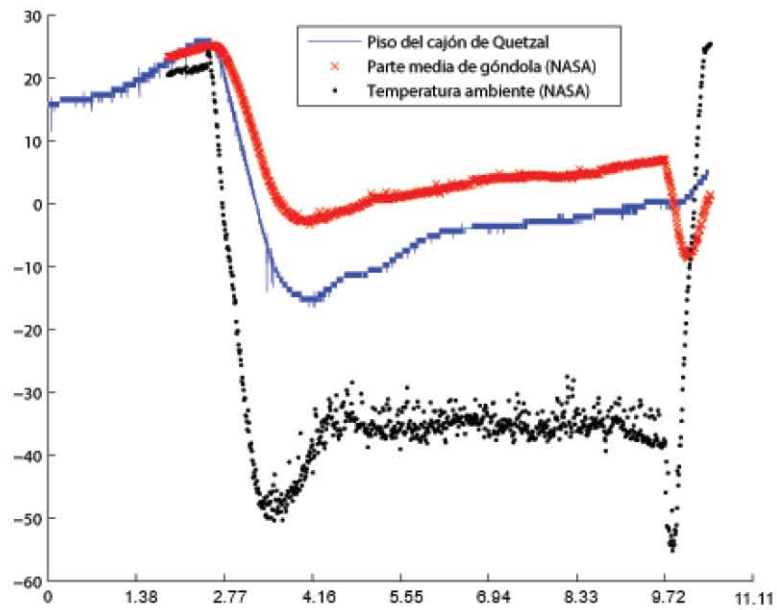


Figura 5.1: Comparación de la variación de la temperatura (hrs. vs. °C)

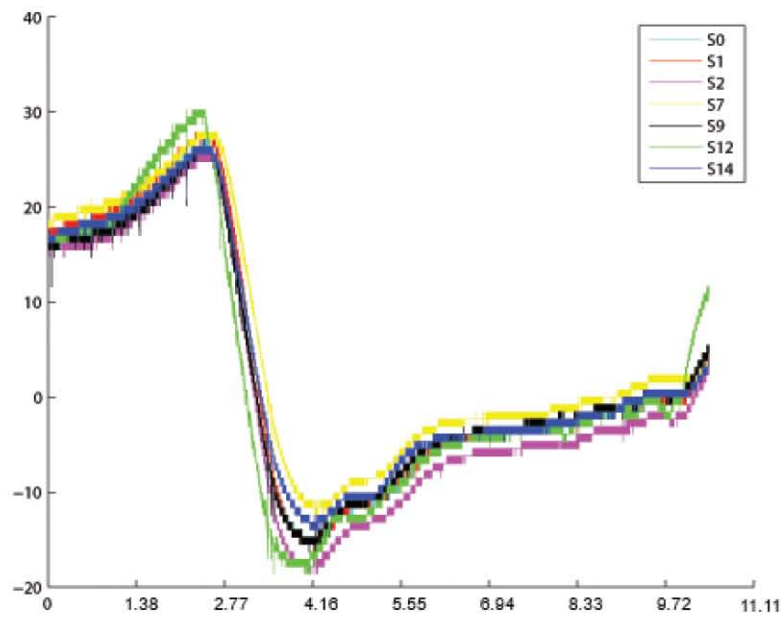


Figura 5.2: Variación de temperatura en la estructura del cajón (hrs. vs. °C)

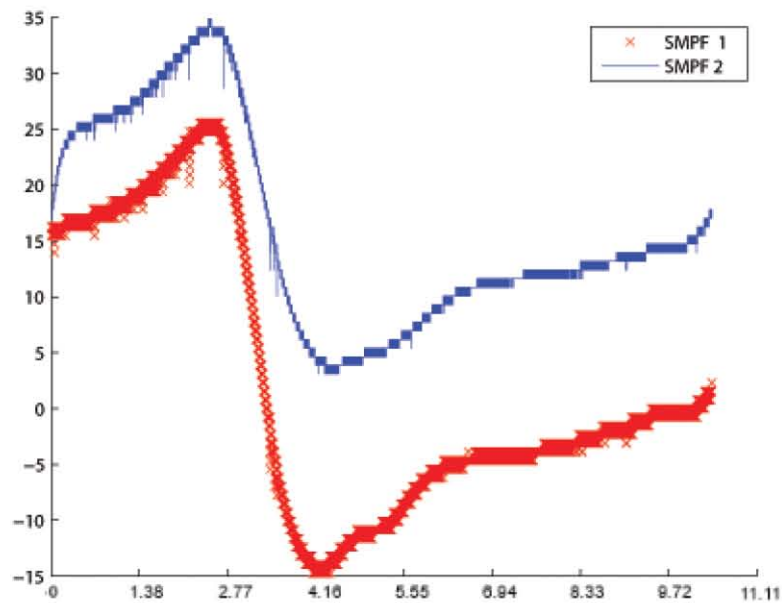


Figura 5.3: Variación de temperatura en el SMPF (hrs. vs. °C)

observar que el que estuvo debajo se mantuvo a una temperatura más alta (-14.74 a 25.56°C), esto se debe quizá a la cercanía a la tarjeta Arduino, el SMPF2 estuvo más al aire libre (-3.08 a 34.86°C) (figura 5.3).

En el sistema de potencia del cajón de *Quetzal* se monitorearon algunos transistores importantes del sistema, en la figura 5.4 se puede observar un comportamiento muy similar. El MOSFET varió de 8.15 a 44.17°C y el regulador de voltaje de 8.53 a 41.084 °C.

En la figura 5.5 se plasma la variación de temperatura en la cámara digital y su sistema de procesamiento. La tarjeta de procesamiento de la cámara por la potencia que utiliza se mantuvo a una temperatura mucho más alta de -2.33 a 34.86°C mientras que la cámara al solo ser utilizada cada 40 segundos no consumía tanta potencia y fue más afectada por las condiciones ambientales, experimentó una variación desde los -15.51°C a los 26.34°C. Dentro del cajón se metieron algunos materiales para observar como reaccionaban a las condiciones *casi espaciales*. Entre los materiales estaba un plástico, tal plástico sufrió una variación de temperatura desde los -14.74°C hasta los 29.44°C. El plástico fue más susceptible a los cambios de temperatura ambiental que la caja de pilas. La caja de pilas se mantuvo en un rango de -10.09 a 28.66°C. Todo esto se puede observar en la figura 5.6.

En la figura 5.7 se observa la variación del consumo de corriente en cada fuente de voltaje. El consumo promedio de la fuente de +7 V es de 304.9 mA, su demanda pico fue de 636.4 mA y su consumo menor de 172.3 mA. Para la fuente de +5 V el pico más alto fue de 200.9 mA y se registró un valor medio de 49.51 mA. La fuente de +12 V tuvo un comportamiento irreal, esto se debe, quizá a que se calibró mal el circuito. El consumo promedio debería ser de aproximadamente 0.16 mA.

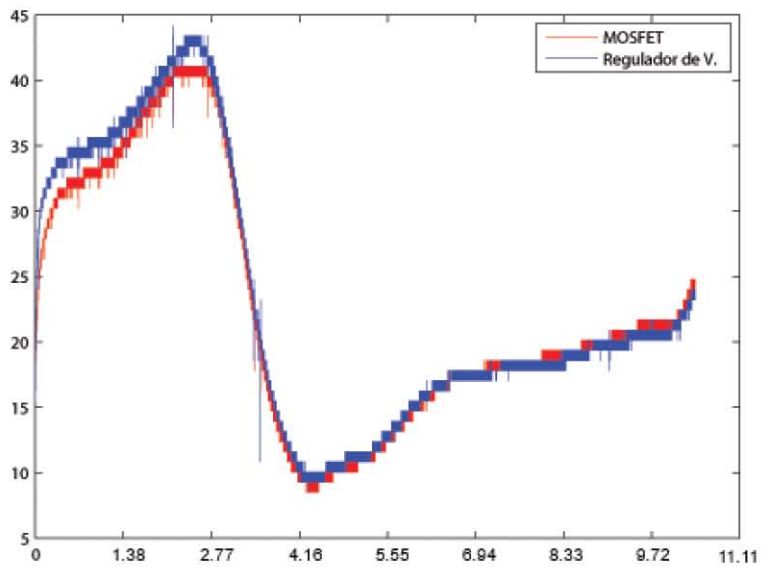


Figura 5.4: Variación de temperatura en el sistema de potencia (hrs. vs. °C)

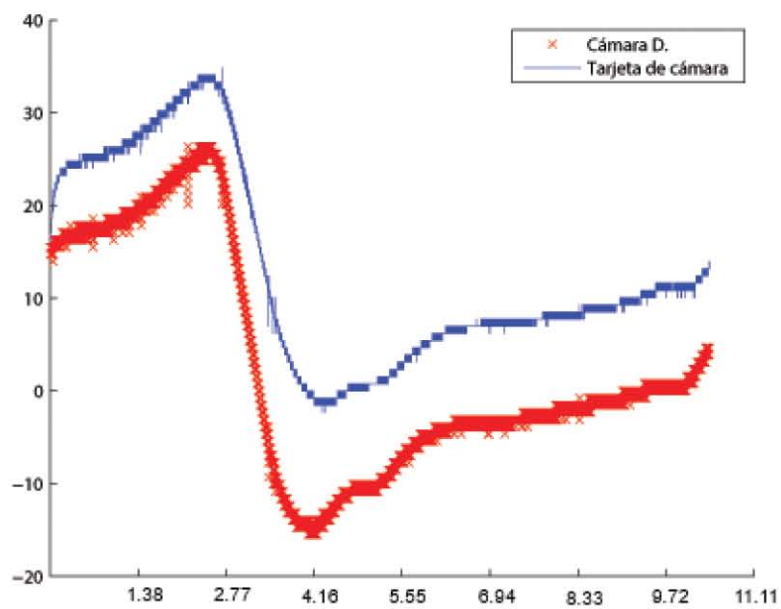


Figura 5.5: Variación de temperatura en la cámara (hrs. vs. °C)

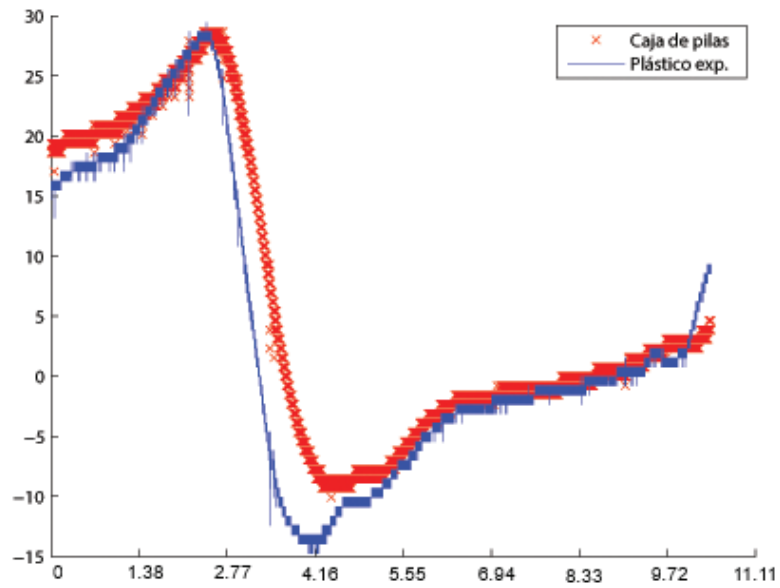


Figura 5.6: Variación de temperatura en materiales de prueba (hrs. vs. °C)

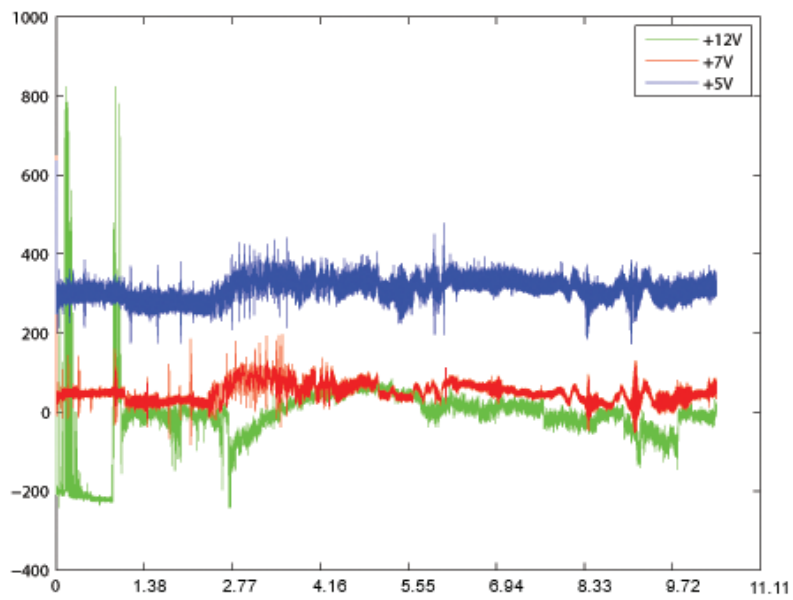


Figura 5.7: Consumo de corriente en el SMPF (hrs. vs. mA)

La variación de la humedad se comparó con los datos de altura que proveyó NASA. Conforme aumenta la altura hay una humedad menor, existe menos aire por lo tanto menos acumulación de nubes y agua en el ambiente. Se nota una relación directa de este fenómeno en la figura 5.8. Los valores de porcentaje de humedad relativa que se registraron varían desde 72.02 % hasta -3.53 %. El valor fue negativo por el algoritmo de procesamiento, se esperaba que el sensor no bajara de cierto offset, pero su salida si fue menor. Se puede decir que registró un valor de 0 %HR.

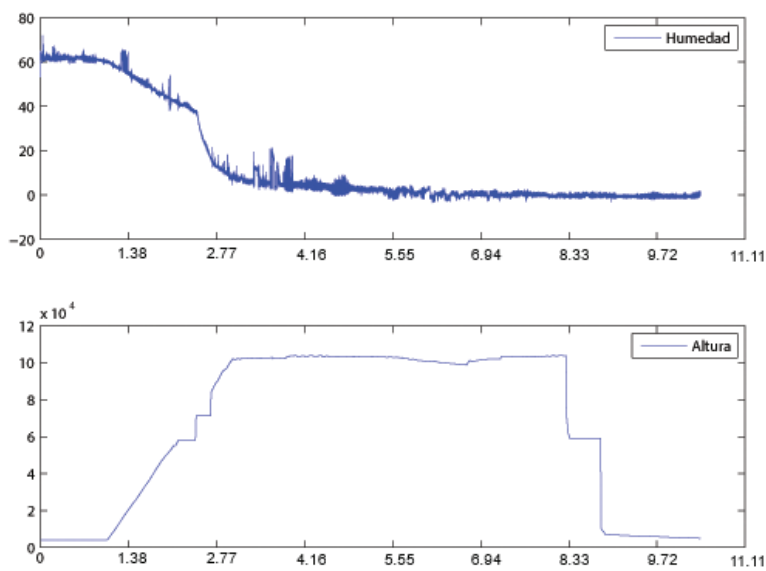


Figura 5.8: Variación de humedad dentro del cajón (hrs. vs. %HR)

En la figura 5.9 se muestran los resultados de un sensor de humedad y de un sensor de presión de SMPF. El multiplexor de tales sensores fue uno de los que dejó de funcionar. Se nota un comportamiento similar entre ambas señales, claramente el valor del multiplexor no cambiaba entre canales. Lo que sí es interesante es el hecho de que éste *valor fijo* que entregaba el multiplexor sí varió en el tiempo.

La figura 5.10 muestra la variación de las fuerzas de aceleración que actuaron sobre el sistema. Se registró un valores máximos de -1.685g y 3.197g. Para el eje Y valores entre -1.211g y 3.244g y para el eje Z valores entre -1.614g y 2.96g. Esta información podrá ser útil para el diseño de futuras estructuras.

Se realizó el diseño y construcción del sistema de monitoreo de parámetros físicos en menos de nueve semanas. En un lapso de dos meses se tuvo que planificar, realizar diseños y simulaciones, cotizar y comprar componentes, fabricar PCBs, integrar las placas, desarrollar el software y realizar las pruebas necesarias para poder entregar el proyecto. Es un tiempo tremendamente corto para realizar todas estas actividades.

El SMPF que se integró no realizó todas las funciones adecuadamente, por esto se tuvo que implementar el sistema de emergencia. Las fallas en el SMPF se debieron a falta de tiempo para pruebas. Probar un sistema de una manera extensa

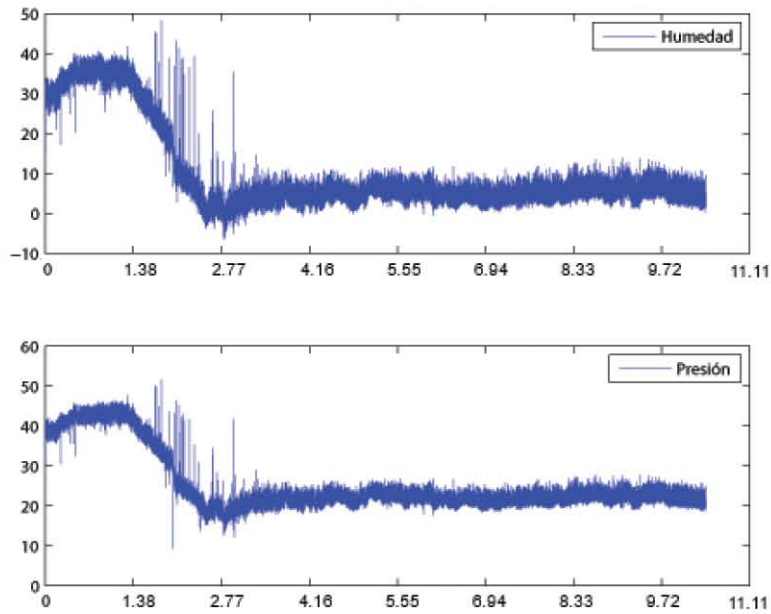


Figura 5.9: Resultado de multiplexor que falló

descubrirá las posibles fallas, las cuales podrán ser corregidas antes de la misión del sistema. Existieron diversos tipos de fallas durante la construcción del sistema y durante su desempeño.

La fabricación de las PCBs fue afectada por múltiples cortos debidos a la precisión insuficiente de los cortes de la CNC y los pequeños puentes de soldadura que se generaban entre las pistas y el cobre sobrante de la placa. Entre más puntos de soldadura se tenían que poner, más cortos se generaban, se debían principalmente a las vías de la PCB. Utilizar muchos componentes de montaje superficial en una placa de dos caras lleva a generar muchas más vías. En algunos casos es conveniente utilizar componentes *through hole* ya que tienen pista en ambos lados de la placa (proveyendo simplificación de diseño), además aumenta la confiabilidad del componente al ser menos susceptible a rupturas por vibración.

Los componentes que se utilizaron, en promedio, soportan un rango de temperatura de -40° a -125° (calidad industrial). Los investigadores de NASA utilizan esta misma calidad de componentes, son lo suficientemente fuertes para sobrevivir los vuelos de globos aerostáticos. Ninguno de los componentes del sistema fue afectado por la temperatura o por las presiones bajas.

Para cualquier sistema es recomendable no utilizar muchas partes móviles, los movimientos causan degradación del material y terminan rompiéndose. Esto sucedió con los conectores del bus de datos y de potencia. Se necesitan utilizar conectores más solidos. Se recomiendan conectores de tipo militar o con *backshell* estos conectores evitan que las tensiones de los cables recaigan sobre la unión del cable y el conector, sino que recaen sobre el conector. Otra opción es revisar la gama de conectores ae-

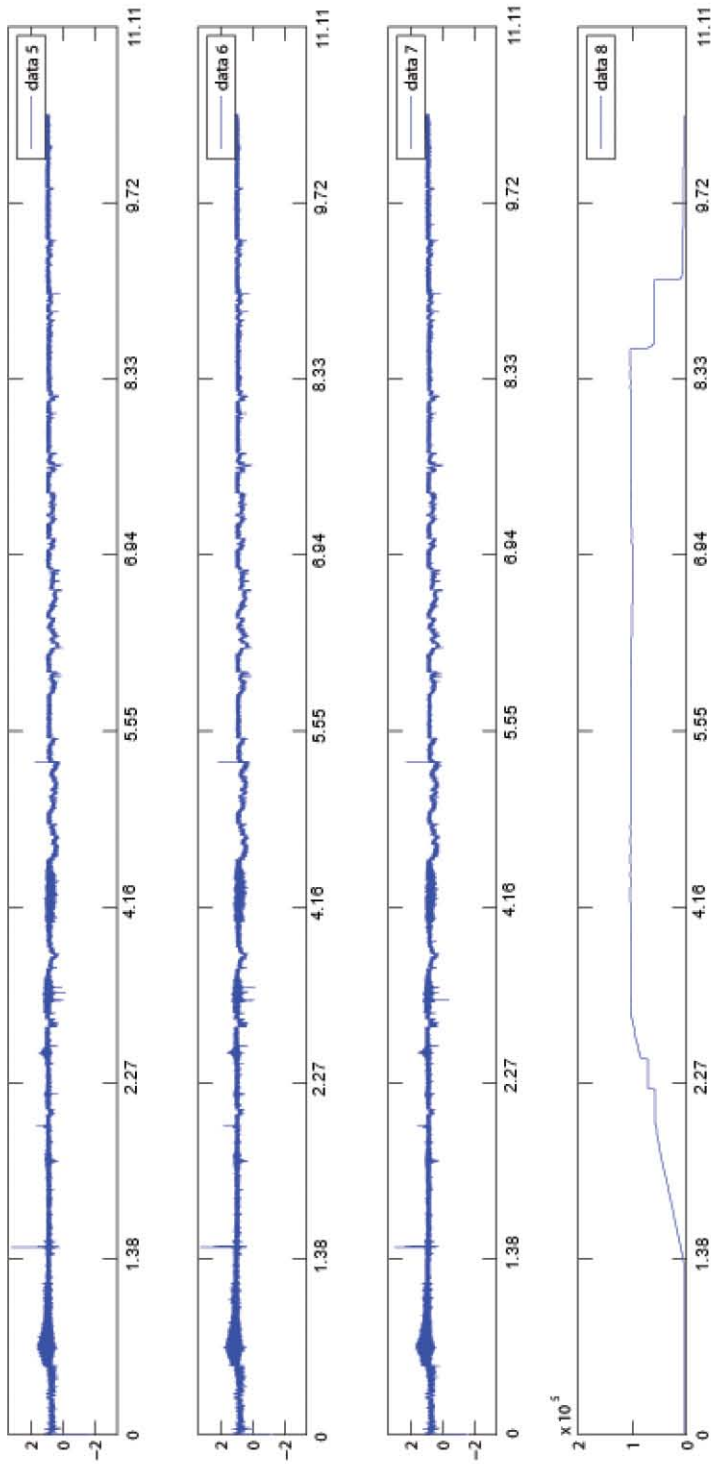


Figura 5.10: Fuerzas de aceleración que experimentó el sistema (hrs vs. g)

roespaciales como de la empresa Axon, sin embargo el precio de estos sí es bastante elevado.

Fabricar tarjetas de repuesto o llevar componentes extra para una misión es un asunto serio, nunca se sabe cuando un componente o una tarjeta completa va a fallar. Varios multiplexores fallaron y no se llevaban repuestos y tampoco se pudieron conseguir en la zona de la prueba. Para evitar problemas es bueno siempre contar con suficientes componentes adicionales.

En cuanto al consumo de potencia, el componente que demanda más es la tarjeta del microcontrolador (52.6 mA), sin embargo, el microcontrolador sólo consume alrededor de 0.2 mA. Se podrá disminuir la demanda de potencia si se elimina la tarjeta. Los sensores más demandantes fueron los de corriente y presión, los de presión se podrán eliminar para el vuelo espacial. Debe existir una tecnología más eficiente para monitorear corriente. La escritura en la memoria también demanda picos de corriente, hay que considerar estas variaciones para el diseño del sistema de potencia.

La información almacenada en la memoria fue recuperada con éxito. Sin embargo, había posibilidades de que la memoria fallara o fuera destruida por el impacto al aterrizar la góndola. Es necesario agregar unidades de memoria extras (redundancia en memoria), si la información está guardada en varias unidades aumenta las posibilidades de recuperar la información.

La velocidad del sistema es lenta. Alcanzando realizar cuatro muestras por segundo no es útil para señales que no sean DC. El sistema es suficiente para los parámetros se se vigilaron ya que no se tuvo que monitorear ninguna señal AC. Si el sistema es instalado, probablemente solo requerirá realizar muestras cada 5, 30 o 60 segundos. Si se requiere una tasa de muestreo mayor, inclusive para señales AC, se necesitará un microcontrolador más rápido o no realizar ningún tipo de procesamiento más que guardar la muestra; en tal caso se podrán realizar muestras como a 7 MHz por teorema de Nyquist.

El sistema fue útil para probar las capacidades del Laboratorio de Sistemas Espaciales del CAT. Se determinó que herramienta y equipo va a ser necesario para continuar construyendo prototipos para sistemas espaciales. El Laboratorio adquirió experiencia de cotización de componentes, métodos de fabricación, y tiempos requeridos para diseño y construcción. Además de experimentar las implicaciones de llevar a cabo proyectos conjuntos con otros institutos nacionales e internacionales.

Este trabajo ha dejado una base para el diseño del futuro sistema de telemetría de *Quetzal*. Como parte de esta base, servirá como referencia para delimitar las capacidades de un sistema de adquisición de datos económico, necesario para el sistema de telemetría. Hay que hacer la consideración de tal sistema de adquisición de datos económico ya que los sistemas comerciales, como de la empresa *National Instruments*, son bastante costosos. Se ha presentado la capacidad de manejo de sensores que tienen los microcontroladores por medio de multiplexores, teniendo presente que entre más sensores hay que muestrear, más tiempo tarda un ciclo de muestreo. Por medio de éste trabajo se podrán verificar los tiempos necesarios para muestras, procesamiento de datos y almacenamiento de información. El capítulo 2 del presente trabajo ya se está utilizando en el Laboratorio de Sistemas Espaciales como una referencia rápida para la comparación de tecnologías de sensores y la posterior selección de alguno,

además como referencia para circuitos de acondicionamiento de datos.

Éste trabajo, como parte de la misión completa, llamó la atención de la prensa de la universidad así como de la prensa nacional. Ayudó a hacer notar el trabajo, en el área aeroespacial, que se está llevando a cabo en el CAT y en la UNAM. La difusión de este proyecto y los demás que ha realizado el CAT ayudará obtener más recursos para futuros proyectos, proyectos cada vez más ambiciosos, más complejos y de mayor calidad.

México está creciendo en el área espacial, cada día más jóvenes se interesan por la rama y cada vez hay más oportunidades entre las entidades de educación superior y en el gobierno. Con proyectos como éste se están formando recursos humanos capaces de diseñar y construir sistemas espaciales en el país. En pocos años, con la experiencia que se va adquiriendo no deberá sorprender que México ponga en órbita un satélite que él mismo ideó, diseñó y construyó.

Capítulo 6

Trabajo a Futuro

El sistema diseñado cumplió con los objetivos propuestos, pero aún hay maneras de mejorarlo. Considerando el caso de que sea incluido el SMPF a bordo de *Quetzal* habrá nuevas consideraciones que hacer. El vuelo actual fue a 32 km de altura, el ambiente no es muy agresivo para el sistema; La órbita de *Quetzal* andará alrededor de los 650 km, a esas alturas el ambiente es mucho más agresivo y se requerirá un análisis profundo de la radiación que afectará al sistema. Se necesitará implementar un sistema con redundancia. Para empezar se necesitará redundancia en memoria, fácilmente se podrá incluir una o dos memorias SD. Las memorias necesitarán blindaje. El microprocesador necesitará redundancia, al ser COTS no está preparado para el ambiente espacial. El diseño del SMPF podrá eliminar el acoplamiento para la tarjeta Arduino y dejar únicamente el ATmega328p con su circuito de funcionamiento mínimo ya que muy probablemente no se necesitará el interfaz USB, podrá usar I2C para comunicarse con los otros sub-sistemas. Se deberán eliminar los conectores entre tarjetas, por las fallas que generó debido a movimientos y vibraciones, se sugiere implementar un sistema de headers que podrán conectarse directamente entre pines, sin piezas móviles.

En cuanto a los componentes del sistema, se sugiere utilizar otro modelo de multiplexores de 16:1. También buscar un sensor de corriente más sensible con un offset menor, a fin de evitar un circuito de acondicionamiento tan complicado.

Observando el proceso de adquisición de datos, se podrá sustituir el micro-controlador por un FPGA, las secuencias de multiplexeo y procesamiento se podrán realizar de una manera mucho más rápida. Únicamente se necesitarán integrar los circuitos de acondicionamiento de señales para los sensores y todo el procesamiento se podrá llevar a cabo con el FPGA. Hay que buscar un método de fabricación más eficiente, mejorar el método de degradación por cloruro férrico es una opción adecuada, si no se pueden mandar a hacer. Debido a los cortos generados por la fabricación en CNC, eliminar el cobre en exceso evitará estos problemas.

Se buscará implementar la comunicación del dispositivo con otros sistemas, a fin de que en un futuro el sistema le pueda enviar el paquete de datos al sistema de telemetría para que tal complete los marcos de información, module y envíe la información a la Tierra.

La estampa de tiempo puede ser configurada a la hora actual, de buscará que

aunque el sistema esté apagado no se pierda la hora, esto evitará conflictos de datos no sincronizados. De acuerdo al consumo de microcontrolador en estado *dormido* se podrá integrar una pila adecuada al sistema.

Este trabajo apoya el desarrollo del sistema de telemetría de *Quetzal*. Que la experiencia y conocimiento plasmado en esta tesis puedan llevar a evitar los mismos errores y mejorar grandemente el diseño de sistemas espaciales llevado a cabo en el CAT, la UNAM, y en el país. Está en mis anhelos que *Quetzal* pueda orbitar la tierra algún día.

Apéndices

Apéndice A

Programas utilizados

A.1. Programa final para SMPF

```
#include <Time.h>
#include<SD.h>;

File TEMP;
//Variables para contadores
int i = 0;
int ii = 0;
//Variables del sistema
word sid = 2037;           //Id. del proceso de aplicacion
word cds = 0;             //Contador de secuencia de fuente
long lsum = 0;            //Longitud de paquete de datos
long t = 0;               //Header secundario, estampa de tiempo
//Variables para los diversos sensores
long temp1 = 0;
long temp2 = 0;
long temp3 = 0;
long corri = 0;
int humed = 0;
long presi = 0;
int acele = 0;

long temp1f = 0;
long temp2f = 0;
long temp3f = 0;
long corrif = 0;
int humedf = 0;
long presif = 0;
int acelef = 0;

void setup()
{
```

```

DDRD |= B11110000;    //Inicializar control de MUX
pinMode(10,OUTPUT);   //CS de memora SD
pinMode(9,INPUT_PULLUP);    //Diagnóstico select
pinMode(8,OUTPUT);    //Sensibilidad de Acelerómetro
if(digitalRead(9) == LOW)
    Serial.begin(9600); //Diagnóstico vía USB
while(!SD.begin(10)){ //Inicializa memoria SD
    delay(100);        //No inicia programa hasta que haya memoria
    if(digitalRead(9) == LOW)
        Serial.println("No hay memoria");
}
TEMP = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE); //Se crea archivo de "datos"
TEMP.println("Inicializada,");           //Se escribe inicialización de sesión de monitoreo
TEMP.close();                             //Se cierra archivo para guardar los datos
if(digitalRead(9) == LOW){
    Serial.println("Archivo creado"); //Mensaje de confirmación de creación de archivo
    Serial.end();
}
}

void loop()
{
    TEMP = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE); //Se vuelve a abrir archivo
    //*****DATOS DE CONTROL*****
    TEMP.print(sid);           //Identificador del proceso de operacion
    TEMP.print(',');
    TEMP.print(cds);          //Contador de secuencia actual
    TEMP.print(',');
    //*****TIEMPO*****
    TEMP.print(time_t t = now()); //Se escribe la estampa de tiempo UNIX
    //*****DIAGNOSTICO*****
    if(digitalRead(9) == LOW) //Se inicia comunicación serial para
        Serial.begin(57600); //diagnóstico
    //*****TEMP 1*****
    for(i = 0; i <= 240; i += 16) //Se muestran 16 sensores de temp.
    {
        PORTD = i;           //Se selecciona el sensor
        temp1 = 0;           //limpiar variable
        for(ii = 1; ii <= 20; ii++)
            temp1 += analogRead(A0); //Se muestrea el MUX-A 20 veces
        temp1 /= 20;         //Se promedia el valor
        temp1 *= 10000;      //Algoritmo de procesamiento
        temp1f = temp1 - 868352;
        temp1f /= 12288;
        TEMP.print(temp1f); //Se escribe el dato a la memoria
        TEMP.print(',');
        if(digitalRead(9) == LOW){ //Se envían los datos en modo de diag.

```

```

        Serial.print(temp1f);
        Serial.print(',');
    }
    delay(1);
}
//*****TEMP 2*****
for(i = 0; i <= 240; i += 16) //Se muestran 16 sensores de temp.
{
    PORTD = i;                //Se selecciona el sensor
    temp2 = 0;                //limpiar variable
    for(ii = 1; ii <= 20; ii++)
        temp2 += analogRead(A1); //Se muestrea el MUX-A 20 veces
    temp2 /= 20;              //Se promedia el valor
    temp2 *= 10000;           //Algoritmo de procesamiento
    temp2f = temp2 - 868352;
    temp2f /= 12288;
    TEMP.print(temp2f);      //Se escribe el dato a la memoria
    TEMP.print(',');
    if(digitalRead(9) == LOW){ //Se envían los datos en modo de diag.
        Serial.print(temp1f);
        Serial.print(',');
    }
    delay(1);
}
//*****TEMP 3*****
for(i = 0; i <= 240; i += 16) //Se muestran 16 sensores de temp.
{
    PORTD = i;                //Se selecciona el sensor
    temp3 = 0;                //limpiar variable
    for(ii = 1; ii <= 20; ii++)
        temp3 += analogRead(A2); //Se muestrea el MUX-A 20 veces
    temp3 /= 20;              //Se promedia el valor
    temp3 *= 10000;           //Algoritmo de procesamiento
    temp3f = temp3 - 868352;
    temp3f /= 12288;
    TEMP.print(temp3f);      //Se escribe el dato a la memoria
    TEMP.print(',');
    if(digitalRead(9) == LOW){ //Se envían los datos en modo de diag.
        Serial.print(temp1f);
        Serial.print(',');
    }
    delay(1);
}
//*****CORRIENTE*****
for(i = 0; i <= 48; i += 16) //Se muestran 4 sensores de corriente.
{
    PORTD = i;                //Se selecciona el sensor

```

```

corri = 0;
for(ii = 1; ii <= 20; ii++)
    corri += analogRead(A3); //Se muestrea el MUX-D 20 veces
corri /= 20; //Se promedia el valor
corri *= 100000; //Algoritmo de procesamiento
corrif = corri - 43008000;
corrif /= -65536;
TEMP.print(corrif); //Se escribe el dato a la memoria
TEMP.print(',');
if(digitalRead(9) == LOW){ //Se envían los datos en modo de diag.
    Serial.print(temp1f);
    Serial.print(',');
}
}
//*****HUMEDAD*****
for(i = 16; i <= 32; i += 16)
{
    PORTD = i; //Se selecciona el sensor
    humed = 0;
    for(ii = 1; ii <= 20; ii++)
        humed += analogRead(A4); //Se muestrea el MUX-E 20 veces
    humed /= 20; //Se promedia el valor
    humed *= 100; //Algoritmo de procesamiento
    humedf = humed - 19619;
    humedf /= 628;
    TEMP.print(humedf); //Se escribe el dato a la memoria
    TEMP.print(',');
    if(digitalRead(9) == LOW){ //Se envían los datos en modo de diag.
        Serial.print(temp1f);
        Serial.print(',');
    }
}
delay(1);
}
//*****PRESIÓN*****
for(i = 48; i <= 96; i += 16) //Se muestran 5 sensores
{
    PORTD = i; //Se selecciona el sensor
    presi = 0;
    for(ii = 1; ii <= 20; ii++)
        presi += analogRead(A4); //Se muestrea el MUX-E 20 veces
    presi /= 20; //Se promedia el valor
    presi *= 10000; //Algoritmo de procesamiento
    presif = presi - 7782;
    presif /= 90112;
    TEMP.print(presif); //Se escribe el dato a la memoria
    TEMP.print(',');
    if(digitalRead(9) == LOW){ //Se envían los datos en modo de diag.

```

```

        Serial.print(temp1f);
        Serial.print(',');
    }
    delay(1);
}
//*****ACELEROMETRO 1.5G*****
for(i = 48; i <= 80; i += 16) //Se muestrea el acelerómetro
{
    PORTD = i;                //Se selecciona un eje
    acele = 0;                //Se limpia la variable
    for(ii = 1; ii <= 20; ii++)
        acele += analogRead(A5); //Se muestrea el MUX-F 20 veces
    acele /= 20;              //Se promedia el valor
    if(i == 40)                //Algoritmo de procesamiento para cada eje
        acelef = map(acele,146,475,100,-100); //eje X
    else if(i == 64)
        acelef = map(acele,164,496,100,-100); //eje Y
    else
        acelef = map(acele,121,488,100,-100); //eje Z
    TEMP.print(acelef);        //Se escribe el dato a la memoria
    TEMP.print(',');
    if(digitalRead(9) == LOW){ //Se envían los datos en modo de diag.
        Serial.print(temp1f);
        Serial.print(',');
    }
    delay(1);
}
TEMP.println();
TEMP.close();                //Se guarda y cierra el archivo
if(digitalRead(9) == LOW)    //Se termina la comunicación serial
    Serial.println();        //para diagnóstico
    Serial.end();
    delay(5000);
}
cds++;                        //Incremento de contador de secuencia
if(cds > 16384)                //Si se sobrepasan los 14 bits
    cds = 0;                    //se reinicia la cuenta
}

```

A.2. Programa utilizado en SMPF

```

#include <Time.h>
#include<SD.h>;
//Se genera objeto tipo File llamado TEMP
File TEMP;
//Variables para contadores
int i = 0;

```

```

int ii = 0;
//Variables para algoritmos con tiempo
long t1 = 0;
long t2 = 0;
long t3 = 0;
//Variables para los diversos sensores
int temp1 = 0;
int temp2 = 0;
int corri = 0;
int hupre = 0;
int acele = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Diagnóstico vía USB
  DDRD |= B11110000; //Inicializar control de MUX
  pinMode(10,OUTPUT); //CS de memoria SD
  pinMode(8,OUTPUT); //Sensibilidad de Acelerómetro
  while(!SD.begin(10)){ //Inicializa memoria SD
    delay(100); //No inicia programa hata que haya memoria
    Serial.println("No hay memoria");
  }
  TEMP = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE); //Se crea archivo de datoa
  TEMP.println("Inicializada,");//Se escribe inicialización de sesión de monitoreo
  TEMP.close(); //Se cierra archivo para guardar los datos
  Serial.print("arch creado"); //Mensaje de confirmación de creación de archivo
}

void loop()
{
  TEMP = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE); //Se vuelve a abrir archivo
  //TIEMPO //Se escribe la marca de tiempo
  TEMP.print(hour());
  TEMP.print(':');
  TEMP.print(minute());
  TEMP.print(':');
  TEMP.print(second());
  TEMP.print(',');
  //TEMP 1
  for(i = 0; i <= 240; i += 16) //Se muestran 16 sensores de temp.
  {
    PORTD = i; //Se selecciona el sensor
    temp1 = 0;
    for(ii = 1; ii <= 20; ii++)
      temp1 += analogRead(A0); //Se muestrea el MUX-A 20 veces
    temp1 /= 20; //Se promedia el valor
  }
}

```

```

    TEMP.print(temp1);           //Se escribe el dato a la memoria
    TEMP.print(',');
    delay(1);
}
//TEMP 2
for(i = 0; i <= 240; i += 16) //Se muestran 16 sensores de temp.
{
    PORTD = i;                  //Se selecciona el sensor
    temp2 = 0;
    for(ii = 1; ii <= 20; ii++)
        temp2 += analogRead(A1); //Se muestrea el MUX-B 20 veces
    temp2 /= 20;                //Se promedia el valor
    TEMP.print(temp2);         //Se escribe el dato a la memoria
    TEMP.print(',');
    delay(1);
}
//CORRIENTE
for(i = 0; i <= 48; i += 16) //Se muestran 4 sensores de corriente.
{
    PORTD = i;                  //Se selecciona el sensor
    corri = 0;
    for(ii = 1; ii <= 20; ii++)
        corri += analogRead(A3); //Se muestrea el MUX-D 20 veces
    corri /= 20;                //Se promedia el valor
    TEMP.print(corri);         //Se escribe el dato a la memoria
    TEMP.print(',');
}
//HUMEDAD-PRESION
for(i = 16; i <= 80; i += 16) //Se muestran 5 sensores
{
    PORTD = i;                  //Se selecciona el sensor (humedad o presión)
    hupre = 0;
    for(ii = 1; ii <= 20; ii++)
        hupre += analogRead(A4); //Se muestrea el MUX-E 20 veces
    hupre /= 20;                //Se promedia el valor
    TEMP.print(hupre);         //Se escribe el dato a la memoria
    TEMP.print(',');
    delay(1);
}
//ACELEROMETRO 1.5G
for(i = 48; i <= 80; i += 16) //Se muestrea el acelerómetro
{
    PORTD = i;                  //Se selecciona el eje
    acele = 0;
    for(ii = 1; ii <= 20; ii++)
        acele += analogRead(A5); //Se muestrea el MUX-F 20 veces
    acele /= 20;                //Se promedia el valor
}

```

```

    TEMP.print(acele);          //Se escribe el dato a la memoria
    TEMP.print(',');
}
//ACELEROMETRO 6G
for(i = 48; i <= 80; i += 16) //Se muestrea el acelerómetro
{
    PORTD = i;                 //Se selecciona el eje
    acele = 0;
    digitalWrite(8,HIGH);      //Se establece la sensibilidad del acel. a 6g
    for(ii = 1; ii <= 20; ii++)
        acele += analogRead(A5); //Se muestrea el MUX-F 20 veces
    acele /= 20;               //Se promedia el valor
    TEMP.print(acele);         //Se escribe el dato a la memoria
    TEMP.print(',');
    digitalWrite(8,LOW);       //Se establece la sensibilidad del acel. a 1.5g
}
TEMP.println();
TEMP.close();                 //Se cierra el archivo, se guardan los datos
delay(51);                    //Retraso para 4 muestras por segundo
}

```

A.3. Programa utilizado en SMPF-E

```

#include <Time.h>
#include<SD.h>;
//Se genera objeto tipo File llamado TEMP
File TEMP;
//Variable para procesos
int var = 0;
//Variables para contadores
int i = 0;
int ii = 0;
void setup(){
    pinMode(53,OUTPUT); //CS para memoria SD
    while(!SD.begin(53)) //Verifica que la memoria SD este insertada
        delay(100);
    TEMP = SD.open("datos2.txt", FILE_WRITE); //Al detectar memoria crea archivo
    TEMP.println("Tiempo,T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10,T11,T12,T13,T14,T15,H1");
    TEMP.close(); //Se inicializa el archivo,
} //se plasman las variables, se guarda y se cierra

void loop(){
    TEMP = SD.open("datos2.txt", FILE_WRITE); //Archivo abierto para escritura
    //TIEMPO //Se escribe la estampa del tiempo
    TEMP.print(hour());

```



```

TEMP.print(':');
TEMP.print(minute());
TEMP.print(':');
TEMP.print(second());
TEMP.print(',');
//Variables
for(i = 0; i <= 15; i++){ //Se van a muestrear los 16 sensores
  for(ii = 1; ii <= 50; ii++)
    var += analogRead(i); //Se muestrea cada sensor 50 veces
  var /= 50; //Se promedia el valor
  TEMP.print(var); //Guardar variable
  TEMP.print(','); //Marcador de separación
  var = 0; //Limpiar variable
}
TEMP.println();
TEMP.close(); //Guardar y cerrar el archivo
delay(100); //Retardo para tomar muestras 4 veces por segundo
}

```

Apéndice B

Tablas de cálculos

B.1. Tablas de cálculos del rendimiento de los algoritmos

Figura B.1: Pruebas de rapidez de los algoritmos de variables

Pruebas de rapidez de algoritmos												
										Tiempo		
Temperatura	float	2688	2592	2588	2584	2584	2580	2584	2584	2592	2592	2597
	int	2420	2328	2336	2324	2344	2324	2336	2324	2328	2324	2339
Corriente	float	2668	2572	2580	2568	2580	2568	2572	2572	2568	2528	2578
	int	2428	2340	2340	2336	2332	2332	2328	2340	2332	2340	2345
Humedad	float	2676	256	2580	2580	2580	2576	2580	2584	2576	2580	2357
	int	2372	2272	2280	2284	2276	2276	2276	2276	2276	2276	2286
Aceleración	float	2748	2668	2660	2660	2668	2676	2668	2676	2668	2660	2675
	int	2412	2312	2316	2312	2312	2316	2316	2312	2312	2324	2324
Presión	float	2572	2492	2480	2484	2476	2476	2476	2476	2472	2476	2488
	int	2424	2340	2324	2324	2332	2328	2336	2324	2332	2328	2339

Figura B.2: Pruebas de precisión de los algoritmos

Precisión de resultados obtenidos											Promedio	Varianza	Desviación E	% Error
Temperatura @ 0.436 V - 2.62°C											2.697			
float	2.58	2.74	2.66	2.86	2.82	2.78	2.66	2.7	2.62	2.55				
	0.0016	0.0144	0.0016	0.0576	0.04	0.0256	0.0016	0.0064	0	0.0049		0.01537	0.1239758	
	1.526718	4.580153	1.526718	9.16031	7.633588	6.10687	1.526718	3.053435	0	2.67176				3.7786
int	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844	0.3844		0.3844	0.62
	23.66412	23.66412	23.66412	23.6641	23.66412	23.66412	23.66412	23.66412	23.6641	23.6641	23.6641			23.664
Temperatura @ 1.01V - 96.7 C											94.806			
float	95.01	94.66	94.89	94.93	94.85	94.66	94.7	94.81	94.85	94.7				
	2.8561	4.1616	3.2761	3.1329	3.4225	4.1616	4	3.5721	3.4225	4		3.60054	1.89750889	
	1.747673	2.109617	1.871768	1.8304	1.913133	2.109617	2.068252	1.954498	1.91313	2.06825				1.9586
int	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94	94		
	7.29	7.29	7.29	7.29	7.29	7.29	7.29	7.29	7.29	7.29	7.29		7.29	2.7
	2.792141	2.792141	2.792141	2.79214	2.792141	2.792141	2.792141	2.792141	2.792141	2.792141	2.792141			2.7921
Corriente @ 1.53 V - 178.125 mA											180.282			
float	180.33	180.25	180.33	180.25	180.25	180.25	180.25	180.33	180.4	180.18				
	4.862025	4.515625	4.862025	4.51563	4.515625	4.515625	4.515625	4.862025	5.17563	4.22303		4.65629	2.15784267	
	1.236472	1.191611	1.236472	1.19161	1.191611	1.191611	1.191611	1.236472	1.27572	1.15236				1.2096
int	180	181	181	181	180	181	180	180	180	181	181	180.4		
	3.515625	8.265625	8.265625	3.51563	3.515625	8.265625	3.515625	3.515625	3.51563	8.26563		5.41563	2.32714954	
	1.051422	1.61218	1.61218	1.05142	1.051422	1.61218	1.051422	1.051422	1.05142	1.61218				1.2757
Humedad @ 2.33 V - 44.69 %HR											44.223			
float	44.2	44.28	44.26	44.23	44.22	44.24	44.19	44.2	44.22	44.19				
	0.2401	0.1681	0.1849	0.2116	0.2209	0.2025	0.25	0.2401	0.2209	0.25		0.21891	0.46787819	
	1.096442	0.917431	0.962184	1.02931	1.051689	1.006937	1.118819	1.096442	1.05169	1.11882				1.045
int	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44		
	0.4761	0.4761	0.4761	0.4761	0.4761	0.4761	0.4761	0.4761	0.4761	0.4761	0.4761		0.4761	0.69
	1.54397	1.54397	1.54397	1.54397	1.54397	1.54397	1.54397	1.54397	1.54397	1.54397	1.54397			1.544
Aceleración @ 2.33 V - (-1.0121)g											-0.99			
float	-0.99	-0.99	-0.99	-0.99	-0.99	-0.99	-0.99	-0.99	-0.99	-0.99				
	0.000488	0.000488	0.000488	0.00049	0.000488	0.000488	0.000488	0.000488	0.00049	0.00049		0.00049	0.0221	
	2.183579	2.183579	2.183579	2.18358	2.183579	2.183579	2.183579	2.183579	2.18358	2.18358				2.1836
int	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99	-99		
	4.8841	4.8841	4.8841	4.8841	4.8841	4.8841	4.8841	4.8841	4.8841	4.8841	4.8841		4.8841	0.0221
	2.183579	2.183579	2.183579	2.18358	2.183579	2.183579	2.183579	2.183579	2.18358	2.18358				2.1836
Presión @ 1 V - 22.94kPa											22.322			
float	22.31	22.32	22.32	22.31	22.34	22.34	22.31	22.32	22.32	22.33				
	0.3969	0.3844	0.3844	0.3969	0.36	0.36	0.3969	0.3844	0.3844	0.3721		0.38204	0.61809384	
	2.746295	2.702703	2.702703	2.74629	2.615519	2.615519	2.746295	2.702703	2.7027	2.65911				2.694
int	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22		
	0.8836	0.8836	0.8836	0.8836	0.8836	0.8836	0.8836	0.8836	0.8836	0.8836	0.8836		0.8836	0.94
	4.097646	4.097646	4.097646	4.09765	4.097646	4.097646	4.097646	4.097646	4.09765	4.09765	4.09765			4.0976

Apéndice C

Diseño del filtro

En éste apéndice se deja una memoria de los cálculos realizados para el diseño del filtro paso bajas a 1 Hz utilizado en el SMPF. Se utilizó una configuración Sallen-Key para el filtro y se utilizaron algunas simplificaciones para el diseño. La primera consideración es que los capacitores y resistencias tengan el mismo valor entre sí ($C_1 = C_2$ y $R_1 = R_2$). Para la primera aproximación se propuso un valor de capacitor comercial. Con ese resultado se aproximó el valor de las resistencias a uno comercial y se presentó un valor final del filtro.

La frecuencia de corte del filtro se puede observar en la expresión C.1.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}} \quad (\text{C.1})$$

Considerando que $C_1 = C_2$ y $R_1 = R_2$, se puede simplificar la expresión C.1 como se observa en la expresión C.2.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (\text{C.2})$$

Ahora, se propondrá un valor comercial para los capacitores a fin de obtener una aproximación del valor para las resistencias. Como se había mencionado, la frecuencia de corte es de 1 Hz.

$$\begin{aligned} C &= C_1 = C_2 = 1\mu F \\ f_c &= 1Hz \\ f_c &= \frac{1}{2\pi RC} \\ R &= \frac{1}{2\pi C f_c} \\ R &= \frac{1}{2\pi \times (1 \times 10^{-6}) \times 1} \\ R &= \frac{1}{6.2831 \times 10^{-6}} \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

$$R = 159.13 \times 10^3 \approx 160k\Omega \quad (C.4)$$

Entonces por la expresión C.3 obtenemos el resultado de la expresión C.4: 160 kΩ. Éste no es un valor comercial para la resistencia, se hará un nuevo cálculo para el filtro tomando el valor C de los capacitores ya propuesto y ahora proponiendo un valor R para las resistencias. Se propone utilizar el valor de 100 kΩ, tal valor es comercial y hay en existencia en el Laboratorio de Sistemas Espaciales.

$$\begin{aligned} C &= C_1 = C_2 = 1\mu F \\ R &= R_1 = R_2 = 100k\Omega \\ f_c &= \frac{1}{2\pi RC} \\ f_c &= \frac{1}{2\pi \times (100 \times 10^3) \times (1 \times 10^{-6})} \end{aligned} \quad (C.5)$$

$$f_c = 1.5915Hz \quad (C.6)$$

Como se puede observar por la expresión C.5 y su resultado en la expresión C.6, la frecuencia de corte solo varía aproximadamente 0.6 Hz. Para fines de eliminar frecuencias mayores a DC éste filtro, con una frecuencia de corte de 1.6 Hz, es suficiente.

Por lo tanto, los valores del filtro son los siguientes:

$$\begin{aligned} C_1 &= 1\mu F \\ C_2 &= 1\mu F \\ R_1 &= 100k\Omega \\ R_2 &= 100k\Omega \\ f_c &= 1.59Hz \end{aligned} \quad (C.7)$$

La función de transferencia se puede observar en la expresión C.8 y con valores en la expresión C.10.

$$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{s^2 + s \left(\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} \right) + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (C.8)$$

$$G(s) = \frac{\frac{1}{0.01}}{s^2 + s(10 + 10) + \frac{1}{0.01}} \quad (C.9)$$

$$G(s) = \frac{100}{s^2 + 20s + 100} \quad (C.10)$$

Bibliografía

- [1] Carlos Romo. Satellite project quetzal unam-mit. *Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2013 6th International Conference on*, pages 903–907, 2013.
- [2] El Universal. Crean en México pixqui, dispositivo parecido a un satélite. <http://www.eluniversal.com.mx/computacion-tecno/2013/mexico-pixqui-satelite-79879.html>, Octubre 2013.
- [3] Anil K. Maini. *Satellite Technology Principles and Applications*. Wiley, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom, 2nd. edition, 2011.
- [4] Michael D. Griffin. *Space Vehicle Design*. AIAA Education, USA, 2nd. edition, 2004.
- [5] Stephen John Horan. *Introduction to PCM telemetering systems*. CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431, 2nd. edition, 2002.
- [6] The Worlds of David Darling - Encyclopedia of Alternative Energy. Satellite mass categories. http://www.daviddarling.info/encyclopedia/S/satellite_mass_categories.html, Octubre 2013.
- [7] James R. Wertz. *Space Mission Analysis and Design*. Microcosm Press, El Segundo, California, 3rd. edition, 2005.
- [8] John Stark. *Spacecraft Systems Engineering*. Wiley, West Sussex, England, 3rd. edition, 2003.
- [9] Frank Carden. *Telemetry Systems Engineering*. Artech House, 41, 1st. edition, 2002.
- [10] National Instruments. Qué es adquisición de datos? <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>, Mayo 2013.
- [11] H. Rosemary Taylor. *Data Acquisition for Sensor Systems*. Chapman and Hall, Great Britain, 1st. edition, 1997.

- [12] John Park. *Practical Data Acquisition for Instrumentation and Control Systems*. Elsevier, Great Britain, 1st. edition, 2003.
- [13] Wikipedia. Analog-to-digital converter. http://en.wikipedia.org/wiki/Analog-to-digital_converter, Mayo 2013.
- [14] Priyabrata Sinha. *Speech Processing in Embedded Systems*. Springer, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA, 1st. edition, 2010.
- [15] Jacob Fraden. *Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs, and Applications*. Springer, USA, 3rd. edition, 2004.
- [16] Kaj Iwansson. *Handbook of Sensors and Actuators - Measuring Current, Voltage and Power*. Elsevier Science B.V., Sara Burgerhartstraat 25, P.O. Box 211, 1000 AE Amsterdam, The Netherlands, 1st. edition, 1999.
- [17] Digikey. The basics of current sensors. <http://www.digikey.com/us/en/techzone/sensors/resources/articles/the-basics-of-current-sensors.html>, Noviembre 2013.
- [18] Alan S. Morris. *Measurement and Instrumentation Principles*. Butterworth-Heinemann, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 3rd. edition, 2001.
- [19] GEM Sensors. Rotorflow-operating-principle. <http://www.gemssensors.com/CustomerSupport-CN/Literature-pdfs/Operating-Principle-Installation-and-Maintenance/RotorFlow-Operating-Principle>, Mayo 2013.
- [20] Mark N. Horenstein. *Circuitos y Dispositivos Microelectrónicos*. Prentice Hall Hispanoamérica, México, 2a. edition, 1997.
- [21] Richard S. Figliola. *Theory and Design for Mechanical Measurements*. Wiley, 111 River Street, Hoboken, NJ, 5th. edition, 2011.
- [22] Farnell. Belden 83026 001100 hook-up wire specifications. <http://www.farnell.com/datasheets/1748300.pdf>, Noviembre 2013.
- [23] Wikipedia. Politetrafluoroetileno. <http://es.wikipedia.org/wiki/Politetrafluoroetileno>, Noviembre 2013.
- [24] Wikipedia. Microprocesador. <http://es.wikipedia.org/wiki/Microprocesador>, Noviembre 2013.
- [25] Wikipedia. Microcontrolador. <http://es.wikipedia.org/wiki/Microcontrolador>, Noviembre 2013.
- [26] Atmel Corporation. *Atmel 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes In-System Programmable Flash*, 2012.

- [27] Range Commanders Council Telemetry Group. *DOCUMENT 106-13*. Secretariat, Range Commanders Council, White Sands Missile Range, New Mexico, 88002, 2013.
- [28] Consultative Committee for Space Data Systems. *CCSDS 102.0-B-5, Packet Telemetry*. CCSDS, Washington, DC 20546, USA, 2000.
- [29] Joe E. Brewer. *Nonvolatile Memory Technologies with Emphasis on Flash*. IEEE Press, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 088554, 1st. edition, 2008.
- [30] Wikipedia. Eeprom. <http://en.wikipedia.org/wiki/EEPROM>, Noviembre 2013.
- [31] Wikipedia. Flash memory. http://en.wikipedia.org/wiki/Flash_memory, Noviembre 2013.
- [32] Wikipedia. Ferroelectric ram. http://en.wikipedia.org/wiki/Ferroelectric_RAM, Noviembre 2013.
- [33] National Aeronautics and Space Administration - Space Environments and Effects Program. The layers of the earth's atmosphere. <http://see.msfc.nasa.gov/tte/tteimages/figure1.gif>, Agosto 2013.
- [34] Hiroki Ashida. Design of tokyo tech nano-satellite cute-1.7 + apd ii and its operation. page 1, 2008.
- [35] Jeffery Lin. Project spartnik: Microsatellite design, construction, testing, and operation by undergraduate students at san josé state university. page 1, 1998.
- [36] I.Galysh. Cubesat: Developing a standard bus for picosatellites. *The StenSat Group*, 2008.
- [37] CubeSat Kit. A versatile, space-proven architecture with multiple cpu choices. <http://www.cubesatkit.com/content/electronics/fm430.html>, Octubre 2013.
- [38] Wikipedia. ArduSat. <http://en.wikipedia.org/wiki/ArduSat>, Octubre 2013.
- [39] eoPortal. Flying laptop. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/f/flying-laptop>, Octubre 2013.
- [40] Arduino. Arduino board uno. <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>, Noviembre 2013.
- [41] Wikipedia. Universal asynchronous receiver/transmitter. <http://es.wikipedia.org/wiki/UART>, Noviembre 2013.
- [42] Atmel. Serial eeprom i2c memories. <http://www.atmel.com/products/memories/serial/i2c.aspx>, Noviembre 2013.
- [43] Fujitsu. Stand-alone memory - fram. <http://www.fujitsu.com/global/services/microelectronics/product/memory/fram/standalone/>, Noviembre 2013.

- [44] Microchip. Serial eeprom. <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/products/memory/serialEEPROM/home.html>, Noviembre 2013.
- [45] Kingston. Sdc4 datasheet. http://www.kingston.com/datasheets/sdc4_us.pdf, Noviembre 2013.
- [46] wikipedia. Secure digital. http://en.wikipedia.org/wiki/Secure_Digital, Noviembre 2013.
- [47] Arduino. Spi library. <http://arduino.cc/en/Reference/SPI>, Noviembre 2013.
- [48] Arduino. Print(). <http://arduino.cc/en/Reference/FilePrint>, Noviembre 2013.
- [49] Arduino. Write(). <http://arduino.cc/en/Reference/FileWrite>, Noviembre 2013.
- [50] Ardiuino. Close(). <http://arduino.cc/en/Reference/FileClose>, Noviembre 2013.
- [51] Thermal Analysis of AEMB-F1 v3_09_07_2013. Samuel p. c., gustavo m. t. *Instituto de Ciencias Nucleares - UNAM*, 2013.
- [52] Arduino. Boarduno - schematic & reference design. arduino-uno-Rev3-reference-design.zip, Noviembre 2013.
- [53] Sparkfun. Lecture 10 - eagle: Creating a new part. <https://www.sparkfun.com/tutorials/110>, Junio 2013.
- [54] M.O. Dominguez J.A.E. Serna. Fabricación de circuitos impresos doble cara sobre placas pcb utilizando una máquina de cnc en el centro de alta tecnología en juriquilla, querétaro. Technical report, CAT - UNAM, 2013.
- [55] Wikipedia. Wire wrap. http://en.wikipedia.org/wiki/Wire_wrap, Noviembre 2013.