Proyecto de Grado de la Carrera Ingeniería Eléctrica.

Plataforma Hardware para Globosats.

Gonzalo Caudullo
gonchicaudullo@gmail.com,
Manuel Fajardo
gallegofs@gmail.com,
Matías Lens
matiaslens@gmail.com.

6 de abril de 2009

Tutores:
Sebastián Fernández,
Juan Pechiar,
Co - Tutor:
José Luis Vila.

Instituto de Ingeniería Eléctrica.
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
Montevideo, Uruguay.

Agradecimientos:

A nuestras familias, Sebastián Fernández, CX5BT Juan Pechiar, CX2AN José Luis Vila, Anthony Figueroa, Nicolás Arburúas, Washington «Canario» Luna, Inés Scapinello, Emiliano Pastorino, Natacha Reyes, Tabaré Camargo, Federico Cancela, AGA, Ingeniero Ultra, Bromyros, Raoul Velazco, Leonardo Steinfeld, Paul Peronnard, IIE, Red Alfa-Nicron, CX6BT Carlos Pechiar, Claudia Santo, Pablo Constantino, Ofelia Robatto, Andrea Sica, Fiorella Haim, LATU, Fundación Ricaldoni, Pablo Cancela, Rafaella Fiorelli, Rafael Grompone, Nelly Bentancourt, Washington Puppi, Familia Iribarren, DINACIA, Fuerza Aérea Brigada II.

Lista de Contenidos

1. Introducción. 1

1.1. Proyecto Laí. . . . 2
1.2. Red Alfa Nicron. . . . 2
1.3. Efectos de la radiación sobre componentes electrónicos. . . . 2
1.3.1. Tipos de fallas. . . . 3
1.3.2. Efecto del voltaje de polarización en la sensibilidad. . . . 4
1.3.3. Ensayos. . . . 4
1.4. Globos Estratosféricos. . . . 5
1.5. Antecedentes y estado del arte. . . . 5
1.6. Grupo de estudiantes del proyecto de fin de carrera Teleglobosats. . . . 7
1.7. Objetivos, alcance y definición del proyecto. . . . 8

2. Modularización del Sistema. 11

2.1. Primer diseño. . . . 11
2.1.1. Descripción del funcionamiento. . . . 11
2.1.2. Administración del consumo. . . . 11
2.2. Diseño final. . . . 12
2.2.1. Cambios respecto al primer diseño. . . . 12
2.2.2. Interfaces de comunicación entre la placa *Main* y los demás dispositivos. . . . 13
2.2.3. Descripción del funcionamiento. . . . 13

3. Selección de componentes. 15

3.1. Microcontrolador. . . . 15
3.2. Sensores. . . . 19
3.2.1. Sensores de temperatura. . . . 19
3.2.1.1. Sensor de temperatura externa. . . . 19
3.2.1.2. Sensor de temperatura interna. . . . 20
3.2.2. Sensor de Humedad. . . . 21
3.2.3. Sensor de Presión. . . . 22
3.3. GPS. . . . 23
3.4. Memorias. . . . 25
3.5. Relés. . . . 25
3.5.1. Generalidades. . . . 26
3.6. Fuentes reguladas. . . . 26

3.7. Otros componentes. 28
3.7.1. Implementación de las interfaces serie entre los distintos dispositivos. 28
3.7.2. Componentes varios. 29
3.8. Batería. 29

4. Placa de fuentes. 35
4.1. Diseño. 35
4.2. Primera versión. 35
4.3. Problemas en el diseño original frente a la RF. 36
4.4. Diseño final. 39
4.5. Consideraciones de uso. 41
4.6. Cambios para la siguiente versión. 42

5. Placa *Main*. 43
5.1. Objetivos. 43
5.2. Características - Requerimientos. 43
5.3. Diseño primera versión. 44
5.3.1. Alimentación. 44
5.3.2. Interfaces de comunicación y conexión de dispositivos. 45
5.3.2.1. Interfaces RS232. 45
5.3.2.2. Interfaz SPI - Programación. 46
5.3.2.3. Interfaz Two - Wire. 46
5.3.2.4. I / O General. 48
5.3.3. Relés para conexión y desconexión de módulos. 49
5.3.4. Conexionado del Reset. 50
5.3.5. Consideraciones sobre la configuración del los canales del ADC del microcontrolador. 50
5.3.6. Medición de temperatura externa. 52
5.3.7. Consideraciones sobre la resolución en la medida de la temperatura externa. 52
5.3.8. Primer Diseño del circuito para medición de temperatura externa. 53
5.3.9. Características del sensor de presión. 53
5.3.10. Características del sensor de humedad. 54
5.3.11. Determinación del Vcc y la tensión de referencia para el ADC. . . 54
5.3.12. Características de la medida de presión. 54
5.3.13. Monitor de batería. 55
5.3.14. Filtros de voltaje. 56
5.4. Quema tanza. 56
5.5. Implementación del circuito para la medición de temperatura externa. . . 57
5.6. PCB de la placa Main primera versión. 58
5.7. Cambios para la siguiente versión. 59

6. Placas para medición de temperatura externa. 63
6.1. Diseños. . . . 63
6.1.1. 1º Diseño. . . . 64
6.1.2. 2º Diseño. . . . 66
6.2. Consideraciones de uso. . . . 68
6.3. Cambios para siguientes versiones. . . . 68

7. Calibración y pruebas realizadas. 69
7.1. Software empleado en las calibraciones. . . . 69
7.1.1. Software cargado en el microcontrolador. . . . 69
7.1.2. Software ejecutado en la PC: RealTerm. . . . 70
7.2. Preparación de la calibración. . . . 71
7.3. Calibración del sistema de medida de presión. . . . 73
7.4. Calibración del sistema de medida de temperatura externa. . . . 75
7.4.1. Fórmulas resultado de la calibración de temperatura externa. . . . 80
7.4.1.1. Placa 1 + Placa de termocupla 1. . . . 80
7.4.1.2. Placa 2 + Placa de termocupla 2. . . . 81

8. Placa anti *Latchup*. 83
8.1. Objetivos. . . . 83
8.2. Diseño. . . . 83
8.3. Primera versión. . . . 85

9. Software. 87
9.1. Generalidades del Software. . . . 87
9.2. Funciones. . . . 88
9.2.1. `adc_init2.c`. . . . 88
9.2.2. `apagar_DUT.c`. . . . 89
9.2.3. `apagar_memorias.c`. . . . 89
9.2.4. `apagar_sensores.c`. . . . 90
9.2.5. `EE_PTR_INIT.c`. . . . 90
9.2.6. `get_DUT_status.c`. . . . 91
9.2.7. `get_gps_frame.c`. . . . 93
9.2.8. `get_humedad.c`. . . . 95
9.2.9. `get_presion.c`. . . . 95
9.2.10. `get_temperatura.c`. . . . 96
9.2.11. `get_Vss.c`. . . . 97
9.2.12. `HW_Init.c`. . . . 98
9.2.13. `memory_write.c`. . . . 99
9.2.14. `OCRnA_16BITWrite.c`. . . . 102
9.2.15. `prender_DUT.c`. . . . 102
9.2.16. `prender_memorias.c`. . . . 103
9.2.17. `prender_sensores.c`. . . . 103
9.2.18. `quemar_tanza.c`. . . . 104

9.2.19. `send_paq.c`. . . . 104
9.2.20. `TIM_16BitReset.c`. . . . 106
9.2.21. `timer1_init.c`. . . . 106
9.2.22. `timer4_init.c`. . . . 106
9.2.23. `Timer4_Interrupt.c`. . . . 107
9.2.24. `TMP100_config.c`. . . . 108
9.2.25. `TMP100_read.c`. . . . 109
9.2.26. `TMP100_temp_reg`. . . . 110
9.2.27. `tmp_termocupla.c`. . . . 110
9.2.28. `TWI_COMM.c`. . . . 111
9.2.29. `UART_Init.c`. . . . 113
9.2.30. `UART_Recieve.c`. . . . 114
9.2.31. `Uart_transmit.c`. . . . 116
9.2.32. `WD_Int.c`. . . . 116
9.3. Consideraciones adicionales. . . . 117
9.4. Programación y Reset. . . . 118
9.5. Primera programación del microcontrolador. . . . 119

10. Liberaciones. 121
10.1. Logística. . . . 121
10.1.1. Introducción. . . . 121
10.1.2. Métodos, Tareas y Medios para la liberación de un globo estratosférico. . . . 121
10.1.3. Procedimientos. . . . 128
10.1.4. Estimación de costos. . . . 131
10.1.4.1. Estimación de costos mínimos. . . . 131
10.1.4.2. Estimación de costos de la 3º liberación. . . . 132
10.2. Primera Liberación. . . . 132
10.2.1. Objetivos y motivaciones. . . . 132
10.2.2. Problemas. . . . 133
10.2.3. Resultados. . . . 134
10.2.4. Conclusiones. . . . 134
10.3. Segunda Liberación. . . . 135
10.3.1. Objetivos y motivaciones. . . . 135
10.3.2. Problemas. . . . 135
10.3.3. Resultados. . . . 136
10.3.4. Conclusiones. . . . 138
10.4. Tercera Liberación. . . . 139
10.4.1. Objetivos y motivaciones. . . . 139
10.4.2. Problemas. . . . 139
10.4.3. Resultados. . . . 140
10.4.4. Conclusiones. . . . 142

11. Conclusiones Finales del Proyecto. 143
11.1. Conclusiones. . . . 143
11.2. Trabajos a Futuro. . . . 145

A. Listas de componentes. 147

B. Conexionado de pines. 153

C. Planificación. 155
C.1. Plan del Proyecto. . . . 155
C.2. Resumen del Plan del Proyecto. . . . 155
C.3. Análisis de los principales cambios en la Planificación. . . . 157

D. Proyectos de SW para testeo de HW y funciones implementadas. 159
D.1. Proyecto `get_humedad_test`. . . . 159
D.2. Proyecto `get_presion_test`. . . . 160
D.3. Proyecto `get_Vss_test`. . . . 161
D.4. Proyecto `Quema_Tanza_TEST`. . . . 162
D.5. Proyecto `tmp_termocupla_test`. . . . 162
D.6. Proyecto `UART_Init_Test`. . . . 163
D.7. Otros proyectos de test. . . . 164
D.7.1. Proyecto `calibracion`. . . . 164
D.7.2. Proyecto `prende_apaga_test`. . . . 165
D.7.3. Proyecto `Memory_test_read.c`. . . . 167
D.7.4. Proyecto `Prueba_ADC`. . . . 168

E. Descripción de las Liberaciones de los Globosats. 171
E.1. Descripción de la liberación del GS01. . . . 171
E.2. Descripción de la liberación del GS02. . . . 176
E.3. Descripción de la liberación del GS03. . . . 182

F. ♠ Compendio de Piques ♠. 191
F.1. Cuidados de las baterias de LiPo. . . . 191
F.2. Características y cuidados de la Power Board. . . . 191
F.3. Bus I^2C. . . . 192
F.4. Voltaje de referencia ADC. . . . 192
F.5. Placas de acondicionamiento de la señal de la termocupla. . . . 193
F.6. Recomendacion Comunicación PC con PLACA MAIN. . . . 193
F.7. Precauciones en la determinación del origen de reinicio del microcontrolador. 194
F.8. Consejos para las liberaciones. . . . 194

G. † Homenaje a los caídos †. 195

H. Esquemáticos. 197
H.1. Power Board. . . . 199

H.2. Main Board v 1.0. 201
H.3. Anti Latchup Board. 203
H.4. Thermocouple Board v 1.0. 205
H.5. Thermocouple Board v 2.0. 207

Bibliografía **209**

Lista de Figuras

1.1. Flujo de neutrones atmosféricos de 1 - 10 MeV en función de la altitud basado en mediciones mediante aeronaves y globos [Nor96]. 3

1.2. Primer diseño para la placa del grupo HWGLOBOSATS. En este diseño el FPGA, la fuente de alimentación y el control de la alimentación para sensores, placa de telemetría, DUT y FPGA, se encontraban dentro de la placa. Las flechas oscuras indican alimentación, mientras que las claras denotan señales. Los detalles se analizan en la sección 2. 9

2.1. Esquema del diseño final para el sistema en su totalidad. Para una mayor claridad no se incluye en el esquema la alimentación desde la placa de fuentes hacia el microcontrolador. Nuevamente, las flechas de color oscuro indican alimentación, mientras que las de color claro indican señales. Adicionalmente, para la implementación del monitoreo de la batería, debería ingresarse el voltaje de la misma a la placa HWGLOBOSATS para su medición. Obsérvese la migración del módulo **GPS / Control de vuelo** desde la placa HWGLOBOSATS hacia la placa TELEMET, con la consiguiente presencia de dos interfaces de comunicación hacia la placa de telemetría.. 14

3.1. Sensor de Humedad HIH-4031-001. 22

3.2. Sensor de presión ASCX15AN. 23

3.3. Horas de vuelo en función del tiempo sin transmisión para las placas de fuentes con reguladores lineales y *switcheados*. 34

4.1. Dos diseños de las placas de fuentes implementadas. 38

4.2. Último diseño fabricado para la POWER BOARD. 40

4.3. Consideraciones de uso de la POWER BOARD. 41

5.1. Alimentación de MAIN BOARD. 44

5.2. Interfaces RS232 de la MAIN BOARD. Para evitar ambigüedades con las denominaciones **TX** y **RX**, las flechas rojas indican entrada o salida de datos hacia o desde la MAIN BOARD. 45

5.3. Pines de programación del ATmega2560 - interfaz SPI. 46

5.4. Memorias EEPROM I²C y sensor de temperatura interior TMP 100, colgados como esclavos del *bus Two - Wire*. 47

5.5. Pinos de entrada - salida de propósito general. 48

5.6. Manejo de relés mediante transistores [OmTI]: 5.6a mediante un transistor NPN, y 5.6b mediante un transistor PNP. Es importante recordar que los relés seleccionados poseen dos bobinas de control: una de `set` y otra de `reset`, como se muestra en la figura 5.6c. Se deberá utilizar un esquema como el de las figuras 5.6a o 5.6b por cada bobinado. En la figura 5.6d se puede ver uno de los relés de la Main Board. 49
5.7. Mecanismo de `reset` del microcontrolador. (1) *Chip* generador de *reset* y *jumper* que selecciona entre el *reset* del programador y el *reset* del *switch*. (2) Se empleó un *switch* en lugar de un pulsador para evitar *resets* involuntarios. 50
5.8. Diagrama de bloques de la estructura del ADC del `ATmega2560` [Atmel]. 51
5.9. Sistema de medida de presión de la Main Board. 5.9a - Circuito de regulación del *offset* implementado en la Main Board y 5.9b - Imagen del sensor de presión en la Main Board. 55
5.10. Monitor de batería de la placa Main. 56
5.11. Esquemático del circuito Quema Tanza. 57
5.12. Foto del PCB fabricado para la placa MAIN versión 1. 59
5.13. *Layout* de la versión 2.0 de la Main Board. 61

6.1. Primer diseño de la placa de acondicionamiento de la señal de la termocupla. 6.1a Foto. 6.1b *Layout*. 65
6.2. Segundo diseño de la placa de acondicionamiento de la señal de la termocupla. 6.2a Foto. 6.2b *Layout*. 67

7.1. Esquema del conexionado necesario para realizar las calibraciones. Por razones de claridad se omitieron las señales de `GND` y 5.0 V para la placa de la termocupla, así como la señal `GND` para la Main Board. 72
7.2. Gráfico de los datos de la tabla 7.1, junto a las funciones de primer orden que mejor ajustan las curvas de presión para cada placa. 74
7.3. Imágenes de los preparativos para las calibraciones de temperatura. 76
7.4. Imágenes durante la calibración de los sistemas de medida de temperatura. 78
7.5. Gráficos de los datos de la tabla 7.2, junto a las funciones de primer orden que mejor ajustan las curvas de voltajes mínimos y máximos para los conjuntos *Placa Main 1 + Placa de Termocupla 1* y *Placa Main 2 + Placa de Termocupla 2*. 80

8.1. *Layout* de la placa anti Latchup. 84
8.2. Placa anti Latchup. 85

9.1. Diagrama de flujo para la función `get_DUT_status`.
(*) La espera del **FIN DE TEST** está implementada mediante un `while`, el cual requiere de una condición la cual, de no presentarse, puede ocasionar que se la función permanezca en un bucle del cual sólo se salga mediante un *reset* provocado por el `watchdog timer`. . 92
9.2. Diagrama de flujo para la función `get_GPS_frame`. 94
9.3. Divisor resistivo para el escalado de la batería. 97
9.4. Diagrama de flujo para la primera parte de la función `memory_write`. 100
9.5. Diagrama de flujo para la segunda parte de la función `memory_write`. 101

9.6. Diagrama de flujo de la función `send_paq`. 105
9.7. Diagrama de flujo para la función `Timer4_Interrupt`. 108
9.8. Diagrama de flujo para la función `TMP100_read`. 109
9.9. Diagramas de flujo para las funciones del archivo `TMP100_config.c`. 110
9.10. Diagrama de flujo para el comando `START`. 112
9.11. Diagrama de flujo para los comandos `SLA+R` y `SLA+W`. 112
9.12. Diagrama de flujo de los comandos `REC_BYTE_ACK` y `REC_BYTE_NACK`. 113
9.13. Diagrama de flujo de la función `UART_Recieve`. 115
9.14. Indicación de la posición de los *headers* y el *switch* según la función que se desee. . . . 118

10.1. Foto satelital de los puntos de partida y arribo del GLOBOSAT01. 135
10.2. Trayectoria del GLOBOSAT02 representada en el GOOGLE EARTH. 137
10.3. Gráficas de los datos recabados por sensores y GPS. 138
10.4. Reconstrucción de la trayectoria del GLOBOSAT03 utilizando el *software* GOOGLE EARTH. 141
10.5. Gráficas de los datos recabados por sensores y GPS. 141
10.6. Gráficas de los datos recabados por sensores y GPS. 142

D.1. Diagrama de flujo para el proyecto `get_humedad_test`. 159
D.2. Diagrama de flujo para el proyecto `get_presion_test`. 160
D.3. Diagrama de flujo para el proyecto `get_Vss_test`. 161
D.4. Diagrama de flujo para el proyecto `Quema_Tanza_Test`. 162
D.5. Diagrama de flujo para el proyecto tmp_termocupla_test. 163
D.6. Diagrama de flujo para el proyecto `UART_Init_Test`. 164
D.7. Diagrama de flujo para el proyecto `prende_apaga_test`. 166
D.8. Diagrama de flujo para el proyecto `Memory_test_read`. 168

E.1. Equipo utilizado para la recepción de los datos transmitidos desde la cápsula. 172
E.2. Señalamos mediante «**1**» la *handycam*, «**2**» la batería, «**3**» la ranura media de la cápsula en que se encontraban el transmisor y la placa del grupo TELEGLOBOSAT y «4» el circuito QUEMA TANZA. 172
E.3. Medición de la balanza y cálculos realizados. 173
E.4. El jefe del proyecto en el momento de la liberación del GLOBOSAT01. 174
E.5. Momentos de la recuperación de la cápsula. 175
E.6. Equipo de personas en el proceso de inflado del globo. De derecha a izquierda, TABARÉ CAMARGO, EMILIANO PASTORINO, NATACHA REYES, GONZALO CAUDULLO, MATÍAS LENS, SEBASTIÁN FERNÁNDEZ, FEDERICO CANCELA, periodista oriundo de DURAZNO. . 178
E.7. Tareas realizadas en paralelo en la preparación de la segunda liberación. 180
E.8. *Laptops* con el *software* de decodificación de paquetes, en las cuales se pueden visualizar los datos recibidos. 181
E.9. Momento de la caída de la cápsula en conjunto con el paracaídas desde la azotea de Facultad, comprobando el funcionamiento del último. 183
E.10. Tareas realizadas en paralelo en la preparación de la segunda liberación. 185
E.11. Momento en que el jefe del proyecto realizaba la liberación del GLOBOSAT03. 186
E.12. Búsqueda y recuperación de la carga útil. 187

E.13. Posición en la que fueron encontrados la cápsula, el paracaídas y los restos del globo. . 188
E.14. Charlando con Iribarren y su familia, dueños del establecimiento vecino al de Carrasco, donde fue encontrada la cápsula. Abajo a la izquierda se puede apreciar la cabeza del Kiwi. 189

Lista de Tablas

3.2. Diferentes opciones de microcontroladores manejadas y algunas de sus características. Por más detalles referirse a [BOM1]. 16
3.4. Características de las principales opciones de sensores de temperatura interna. 21
3.5. Distintas opciones de sensores de humedad relativa. El sensor de TDK y el HIH 3610 fueron descartados principalmente por no abarcar el rango de RH deseado el primero, y por no encontrarse disponible para su adquisición en el distribuidor en el que se adquirirían el resto de los componentes el segundo. 22
3.6. Alternativas para los sensores de presión. 23
3.7. Límites de operación del módulo receptor GPS Lassen IQ [LaIQ]. 24
3.8. Características de los reguladores preseleccionados [1374, 1767]. 27
3.9. Posibles voltajes de salida para el regulador LT1374CS8, y los respectivos valores para dos resistencias de su diseño [1374]. 28
3.10. Resumen de las características de diferentes tipos de batería [Wiki]. 30
3.11. Resumen de características de los modelos de batería de Li - Po encontrados en plaza. Los detalles de la elección del voltaje nominal y capacidad de las mismas se explican en los párrafos siguientes. 31
3.12. Lista de componentes y sus respectivos voltajes de alimentación y corrientes consumidas. El transmisor no estaba determinado al momento de realizar la selección, sin embargo se sabía que su alimentación sería mayor de 5.0 V menor o igual a 12 V. Según esta estimación se concluye que como mínimo casi 0.6 A deben preverse para que sean entregados por las fuentes reguladas para independientemente del consumo del transmisor. 32
3.13. Consumo medido para el sistema formado por: la primera placa de fuentes, el módulo GPS, la primera versión de la placa de telemetría y un transmisor modelo TH-21AT de Kenwood. La señal PTT (*Push-To-Talk* o también *Press-To-Transmit*) controla los momentos en que se realiza la transmisión de los datos.
(*) - Tomado paramétrico para el estudio de la duración de la batería. 33

4.1. Ensayos realizados por Sebastián Fernández en Grenoble sobre la placa de Fuentes. Los ensayos fueron realizados en las condiciones de un voltaje fijo de entrada igual a 11 V y una carga variable que se lista en las columnas 2 a 5. La eficiencia está calculada como $\frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$.
* Eficiencia teórica de un regulador lineal en las mismas condiciones. 40
4.2. Estudio del *ripple* para la placa de fuentes en las condiciones de prueba $V_{in} = 10\,V$ y resistencia de carga de 10 Ω. El ancho de banda del canal del osciloscopio era de 150 MHz. 40

6.1. Voltajes de salida del AD594 y termocupla J vs Temperatura de la termocupla. 64

7.1. Resultados de la calibración de los sensores de presión para las placas 1 y 2. . . 74
7.2. Resultados de las calibraciones de los conjuntos *Placa Main 1 + Placa de Termocupla 1* y *Placa Main 2 + Placa de Termocupla 2*. 79

9.1. Pinout de conector ISP en placa. Referirse al conector para programación en la figura 9.14. 118

10.1. Estimación de costos mínimos. 131
10.2. Resumen de la estimación de costos de la tercera liberación. 132

A.1. Lista de componentes para la placa DE FUENTES. Los nombres de los componentes listados se corresponden con los de la figura H.1. 147
A.2. Lista de componentes placa tratamiento de señal termocupla 1º Diseño. Los nombres de los componentes listados se corresponden con los de la figura H.5. 148
A.3. Lista de componentes placa tratamiento de señal termocupla 2º Diseño. Los nombres de los componentes listados se corresponden con los de la figura H.6. 148
A.4. Lista de componentes de la placa ANTI LATCHUP. La columna NOMBRES se corresponde con las denominaciones de la figura H.4. Como se había mencionado en la sección 8.2, la representación esquemática del circuito se nos había brindado, con lo cual la mayor parte de los componentes necesarios, ya estaban identificados, debiéndose únicamente realizar la búsqueda de los mismos en el distribuidor FARNELL. También se determinaron y agregaron a la lista de componentes a adquirir aquellos que eran necesarios debido a las modificaciones que se hicieron. 150
A.5. Lista de componentes para la MAIN BOARD versión 1. Los nombres de los componentes listados se corresponden con los de la figura H.2. 152

B.1. Resumen del conexionado de contactos del `ATmega2560`. 154

1. Introducción.

El presente trabajo se encuentra vinculado a dos proyectos de mayor alcance: el Proyecto Laí[1] y trabajos de la red Alfa Nicron[2], cuyos respectivos intereses serán descriptos en las secciones 1.1 y 1.2.

Teniendo en cuenta los objetivos y requerimientos de ambas partes, se diseñó, implementó y testeó una plataforma *hardware* capaz de monitorear experimentos sobre dispositivos electrónicos a grandes alturas, así como recabar datos del entorno en que se realizan dichos experimentos. Adicionalmente, el sistema desarrollado es capaz de realizar la transmisión de la información obtenida hacia un sistema de telemetría y presenta la capacidad de llevar a cabo un plan de vuelo, i.e. ejecución de tareas específicas según la altura y posición en las que se encuentre. Asimismo dentro del marco de desarrollo del proyecto se trabajó en aspectos como la optimización del consumo, y debido a las condiciones ambientales en las que debería operar la electrónica diseñada, se volvió necesario el estudio de una aislación térmica adecuada.

Para realizar la prueba de los diseños se efectuó una serie de liberaciones de *globos sonda*[3]. Se participó en la planificación, en la liberación propiamente dicha, y en la etapa de recuperación de la carga útil en cada liberación.

La estructura de este documento está organizada en un primer capítulo de introducción en el que se presentan conceptos importantes para comprender el marco del proyecto y sus objetivos dentro del mismo. En los capítulos siguientes[4] se detalla la implementación del proyecto propiamente dicho a nivel de *hardware*, pasando primero por la definición de los requerimientos para el sistema a diseñar, la separación de las funcionalidades en distintos módulos, el agrupamiento de estos módulos en placas y finalmente las características de las placas fabricadas. Luego se realizará el estudio detallado de las rutinas de software implementadas, para posteriormente concluir con un capítulo explicativo de los procedimientos, resultados y conclusiones obtenidos para cada una de las liberaciones llevadas a cabo hasta la fecha, y el último capítulo se analizan las conclusiones generales del proyecto y trabajos a futuro.

Como apéndices del documento se incluyen la listas de los componentes empleados, los esquemáticos de los circuitos diseñados[5] y las conexiones de los pines del microcontrolador como referencias para la comprensión y utilización del *hardware*, luego se incluye

[1] http://iie.fing.edu.uy/twiki/bin/view.cgi/Satelite/WebHome.
[2] http://tima.imag.fr/qlf/alfa-nicron/.
[3] La mecánica de los experimentos mediante *globos sonda* se detalla en la sección 1.4.
[4] Capítulos 2 al 8.
[5] Colocados en el último capítulo del apéndice por la forma de su presentación.

un análisis de la planificación del proyecto y modificaciones que sufrió el mismo. En los dos restantes capítulos del apéndice se incluyen una compilación de observaciones y consejos útiles y un pequeño homenaje.

1.1. Proyecto Laí.

El Proyecto Laí es un proyecto surgido en el Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República. Tiene como objetivo a mediano plazo la «*construcción, lanzamiento y operación de un satélite experimental*» [Lai]. Es un proyecto multidisciplinario en el que se pueden realizar proyectos de fin de carrera en áreas como por ejemplo radiofrecuencia, telemetría, modelado térmico, gestión de energía, electrónica aplicada, inmunidad ante radiaciones, etc.

1.2. Red Alfa Nicron.

El principal objetivo de la red Alfa Nicron es el fortalecimiento de la investigación y cooperación entre universidades de Latinoamérica y Europa, con la finalidad de difundir el conocimiento de técnicas de diseño de circuitos tolerantes a fallas entre los países participantes [AlN].

1.3. Efectos de la radiación sobre componentes electrónicos.

Desde hace poco más de dos décadas, dados los cambios en la tecnología de circuitos integrados[6], el estudio de la sensibilidad de componentes electrónicos ante radiaciones ha venido aumentando en importancia [Zie]. Los componentes que se muestran como los más afectados son, debido a su área y su mayor número de bits, las RAMs tanto estáticas como dinámicas [Nor96]. No obstante, se pueden encontrar también numerosos trabajos que reportan sobre la performance de microprocesadores bajo radiación [SKW+92, KSC91, HSS92, HTG89, Pou05, AUV+98, VKC92].

La radiación puede llegar a la electrónica desde varias fuentes. Parte de ella se ha encontrado por ejemplo en emisiones de partículas alfa debidas a impurezas de Uranio-238 y Torio-232[7] presentes en los encapsulados. Este tipo de problemas se solucionan mediante el control de impurezas en los encapsulados o mediante la aislación entre el encapsulado y el silicio [KHP04].

Otra parte de la radiación es fruto de los rayos cósmicos y partículas cargadas que llegan a las capas de la alta atmósfera de la Tierra, y en este caso pueden ser más sutiles y difíciles

[6] Como por ejemplo la tendencia a la reducción voltajes de polarización y el aumento en la capacidad de las memorias.

[7] Y productos de sus respectivas descomposiciones.

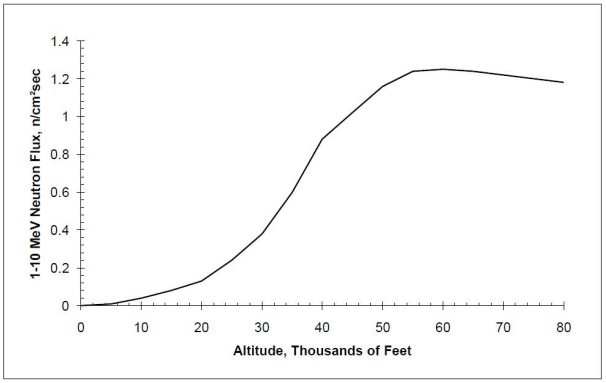


Figura 1.1.: Flujo de neutrones atmosféricos de 1 - 10 MeV en función de la altitud basado en mediciones mediante aeronaves y globos [Nor96].

de tratar. En este caso, la atmósfera actúa absorbiendo gran cantidad de las partículas antes de que éstas lleguen al nivel del mar. De este modo, se ha verificado [NB93, Nor96] que por ejemplo el flujo de neutrones tiene un máximo en aproximadamente 60.000 pies de altura, llamado el Máximo de Pfotzer. Además de la altura, se establecieron dependencias respecto de la latitud, longitud[8] y el ciclo solar.

La mayor parte de las partículas problemáticas presentes a grandes alturas son justamente neutrones de alta energía [Nor96], presentando el inconveniente de que debido a su carga eléctrica neta nula, queda descartada una medida de blindaje como medida de protección. Las fallas en el caso de los neutrones se dan luego del impacto de los neutrones con átomos en la electrónica y descomposiciones en partículas cargadas secundarias.

1.3.1. Tipos de fallas.

Ya sea que el impacto sea directamente de una partícula cargada parte de la radiación, o de un impacto secundario como consecuencia del choque con un neutrón, el resultado son corrientes que alteran la carga en nodos - y por lo tanto afectan el valor almacenado - del circuito afectado [MK95].

Entre los efectos del impacto de la radiación en la electrónica se pueden mencionar los denominados *Total Ionizing Dose* (TID), y los *Single Event Effects* (SEE)[9]. Dadas las características de la tecnología CMOS actual, se puede considerar que los problemas vinculados al TID como un tema no demasiado preocupante. No obstante, los SEE

[8] En menor medida.

[9] Algunos otros efectos de la radiación son los denominados: SHE - *Single Hard Error*, SEB - *Single Event Burnout*, SEGR - *Single Event Gate Rupture*, MBU - *Multiple Bit Upset*, etc.

parecen ser más complicados de solucionar. Éstos últimos a su vez se pueden separar principalmente en:

- *Single Event Latchup* (SEL).
- *Single Event Upset* (SEU).
- *Single Event Transient* (SET).

El primero de ellos es el más destructivo. Se produce por la activación de transistores bipolares parásitos presentes en los transistores CMOS. En la práctica se traduce en un incremento significativo de la corriente consumida que puede llevar a la destrucción del circuito de no mediar ninguna medida de limitación de corriente. Para reponerse de este tipo de falla es necesario, una vez detectada la sobrecorriente, interrumpir la alimentación y luego de cierto tiempo proveerla de nuevo.

Los otros dos tipos de SEE pueden eventualmente corregirse previéndolos desde la etapa de diseño. En el caso del SEU, se trata del cambio en el valor almacenado por ejemplo en un *flip - flop*, mientras que en el caso del SET, consiste en pulsos transitorios de varios cientos de picosegundos que introducidos a la salida de una compuerta lógica, eventualmente pueden ser *latcheados* por un *flip - flop* y producir un error equivalente a un SEU [Pou05].

1.3.2. Efecto del voltaje de polarización en la sensibilidad.

Los efectos del voltaje de polarización en la sensibilidad ante los SEE dependen del *tipo* de SEE, y en algunos casos hasta van en sentidos opuestos. Por ejemplo en el caso de los SEL, se ha reportado una relación inversa entre la sensibilidad y el voltaje de polarización. Mientras tanto, en el caso de los SEU el efecto es el contrario, es decir que cuanto más alto sea el voltaje de polarización menor será la sensibilidad ante este tipo de fenómeno [MK95].

1.3.3. Ensayos.

Existen mecanismos complementarios con el fin de evaluar el *Soft Error Rate* (SER[10]) de los chips. Entre ellos se encuentran [Zie]:

✍ **Modelado del dispositivo.** Se trata de atacar el problema identificando potenciales partes del diseño con particular sensibilidad.

✍ **Testeo acelerado.** Se exponen los chips a varios tipos de radiación y a bajo costo. Tiene la desventaja de requerir que los chips estén avanzados en su etapa de fabricación, por lo que son pocas las eventuales correcciones de diseño que se pueden realizar.

[10]Término equivalente a SEE [Zie].

✍ **Testeo en condiciones nominales.** Es la manera más precisa de estimar el SER de los chips. Se prueban cientos de chips en condiciones nominales. Presenta la desventaja de un alto costo y su extensión en períodos de tiempo inaceptables en muchos casos. Las alternativas que existen ante estas demoras son el testeo de un mayor número de dispositivos, o disponer la electrónica bajo prueba en condiciones de mayor sensibilidad ante este fenómeno, como por ejemplo empleando voltajes de polarización reducidos.

1.4. Globos Estratosféricos.

Los *globos estratosféricos* - o *high altitude balloons* por su denominación en inglés, consisten en una plataforma para la realización de mediciones o experimentos llevados a cabo en una carga útil elevada por un globo hasta grandes alturas. Algunos de ellos alcanzan alturas cercanas a los treinta mil metros de altura. Una vez alcanzada determinada altura, el globo estratosférico explota como consecuencia del tamaño adquirido debido a las bajas presiones a esas alturas, y posteriormente la carga desciende amortiguada por un paracaídas. Éstos experimentos son realizados por estudiantes y grupos de investigación de varios países del mundo.

Como se mostrará en la sección 1.5, los datos que se recopilan en los experimentos y demás mediciones se pueden transmitir en radiofrecuencia o almacenarse para su análisis luego de la recuperación de la carga útil.

1.5. Antecedentes y estado del arte.

Dentro de la Facultad de Ingeniería no existen antecedentes sobre este tema, que se inició con la creación del Proyecto Laí dentro del Grupo de Tecnología Aeroespacial. Tampoco se encontraron antecedentes o proyectos similares en Uruguay.

En cambio, dentro del panorama mundial se encontraron diversos proyectos en los cuales se utiliza un globo estratosférico con la finalidad de realizar experimentos a altitudes cercanas al límite de la tropósfera[11] o incluso superando este límite alcanzando la estratósfera[12]. Los lanzamientos son llevados acabo por grupos con diversos objetivos y constituciones. Pueden involucrarse desde aficionados hasta investigadores avanzados, lo que trae aparejada una diferencia importante de la complejidad de los experimentos realizados.

Algunos de estos proyectos poseen un formato muy similar al del que trata el presente trabajo. En ellos se propone el lanzamiento de una carga útil conteniendo circuitería con el fin de tomar mediciones de características ambientales tales como temperatura, humedad, radiación UV, presión, etc. Estos datos luego serían analizados con el propósito

[11] El límite de la tropósfera se encuentra entre 8 y 16 km de altura variando según la latitud [Wiki2].
[12] Capa de la atmósfera que sigue a la tropósfera [Wiki2].

de determinar la dependencia de estas magnitudes con la altura o entre ellas y así determinar el porqué de algunas características particulares que presenta la atmósfera a grandes alturas.

A continuación haremos referencia a tres proyectos similares al que deseamos ejecutar. Cabe destacar que estos proyectos comprenden la realización del *balloonsat* en su totalidad, tarea que en este caso será dividida entre dos grupos de proyecto.

✍ **McNeese Radiation Experiment [Go06]:** En este proyecto se tenía el objetivo de simplemente relevar la temperatura en diferentes capas de la atmósfera.
Se lanzó un globo con tres sensores de temperatura, los cuales registraban la temperatura interna, la temperatura en una de las paredes (para estudiar el efecto de las pérdidas caloríficas por radiación) y la temperatura exterior a la cápsula.
A medida que el globo ascendía tomaba muestras de las lecturas de los sensores, las cuales eran almacenadas en una memoria EEPROM. No se menciona la transmisión de datos relevados hacia tierra.
Una vez finalizado el vuelo y recuperada la cápsula mediante el uso de localización por GPS, los datos fueron exportados de la memoria para su tratamiento por computadora.
No se discutieron asuntos sobre los efectos de la radiación en las celdas de memoria de la EEPROM.
Sí se discutió una solución a las pérdidas térmicas de forma de lograr una temperatura adecuada para el funcionamiento de los circuitos.

✍ **HUSP experiment [HRBM05]:** En este caso se trataba de medir la intensidad de radiación UV y humedad absoluta en función de la altura. Para esto se emplearon un sensor de radiación UV y un sensor de humedad relativa. Por otra parte, los valores de altura eran proporcionados por la NASA. Al igual que el caso anteriormente citado, los valores provistos por los sensores eran muestreados y almacenados en una EEPROM.
Las pérdidas caloríficas también fueron controladas mediante un mecanismo que medía la temperatura con el fin de mantenerla estable utilizando para ello un par de calentadores. En este proyecto tampoco se trató el tema de los efectos de la radiación en los componentes del HW de la placa dentro de la carga útil.

Los dos proyectos mencionados estaban enmarcados dentro de un programa de la NASA llamado ACES [LaS] enfocado en brindar a estudiantes universitarios experiencia en la administración de proyectos, construcción de experimentos, adquisición de datos así como su análisis e interpretación, etc. Existen gran cantidad de proyectos realizados dentro de este marco.

✍ **Cygnus High Altitude Balloon [Ur06]:** Este proyecto es el que presenta mayor cantidad de puntos en común con el proyecto que realizaremos. El mismo fue llevado a cabo por un aficionado polaco y no tiene un objetivo específico, además del interés del realizador. Dentro de la cápsula incluyó un *hardware* capaz de adquirir datos y almacenarlos. También fueron colocadas dos cámaras digitales que tomaban imágenes del ascenso y el descenso desde dos ángulos distintos.

El sistema de sensores incluía sensores de temperatura externa e interna. Además se contaba con el monitoreo de temperatura de la radio y las baterías y un sensor de presión absoluta de aire.
En un principio se buscó incluir un sensor de humedad pero no fue posible contar con él al momento del lanzamiento.
El control se realizaba mediante un microcontrolador que manejaba los demás componentes del circuito de acuerdo a los datos relevados.
Se contaba además con un GPS para obtener la localización del *globosat*[13], un modulador FSK y transmisor de radio que no pudieron ser testeados debido a problemas previos al lanzamiento del globo. El otro sistema de comunicación utilizado fue un celular GSM a través del cual se enviaba la información del GPS vía mensajes de texto.
Fue previsto un sistema de emergencia por el cual la carga útil se desprendía del globo, un led ultra brillante en caso de que se necesitara realizar una búsqueda nocturna y un timbre para localizar el globo luego del aterrizaje.
Los datos recabados y las fotografías tomadas por las cámaras eran descargados por USB a una computadora.
Entre las diferencias del proyecto que debemos llevar a cabo y el proyecto Cygnus High Altitude Balloon se encuentra principalmente la experimentación del efecto de la radiación sobre determinados dispositivos a testear. En el caso de Cygnus High Altitude Balloon no se consideró que los datos almacenados en memoria podrían cambiar debido al efecto de la radiación. Otra diferencia que se presentará a la hora de la prueba del presente proyecto es el hecho de hacer funcionar correctamente los sensores de humedad y la radio, las cuales por diferentes motivos no pudieron finalmente ser instaladas en la carga útil en el primer caso o no funcionaron en el caso de la radio. Finalmente, los datos, tanto de posicionamiento como experimentales, serán transmitidos por RF.

1.6. Grupo de estudiantes del proyecto de fin de carrera Teleglobosats.

El grupo de estudiantes que conforma el proyecto de fin de carrera Teleglobosats (de aquí en adelante grupo Teleglobosats) trabajó en estrecha cooperación con el grupo HWGlobosats. Ellos fueron los encargados de lograr la transmisión de la información recopilada en la carga útil hacia la estación de tierra. Para la transmisión de dichos datos debieron seleccionar e implementar un protocolo de comunicación adecuado a tales fines.

Entre otras de las tareas que cayeron dentro de la competencia de este grupo se encuentran el desarrollo del SW con el plan de vuelo y la colaboración en las tareas necesarias para llevar a cabo cada una de las liberaciones realizadas.

[13] Traducción dada a *balloonsat*, término utilizado por aspirantes a *satélites* para denominar el conjunto: globo *estratosférico* y carag útil.

1.7. Objetivos, alcance y definición del proyecto.

Se diseñará el PCB y se construirá una placa en la cual estarán conectados todos los sensores, el controlador (microcontrolador), y el sistema de localización global.

- La placa del microcontrolador deberá contar con interfaces para la comunicación con las placas de transmisión en RF y la placa que contiene el DUT (*Device Under Test*), que en este caso será un banco de RAMs estáticas controladas por un circuito implementado en un FPGA.
- Dentro de los sensores que se deben conectar a la placa se encuentran dos sensores de temperatura, un sensor de presión absoluta y un sensor de humedad.
- Se debe conectar un sistema de ubicación global (GPS).
- El sistema diseñado será capaz de monitorear y reportar el nivel de tensión de la batería.
- El circuito a cargar en el dispositivo programable (FPGA) que actuará verificando que no haya errores en la RAM, será proporcionado por el cliente. Se deberá estudiar la implementación VHDL del mismo, realizando correcciones o agregados al mismo para lograr un correcto funcionamiento del sistema que realiza el testeo del DUT (sobre todo teniendo en cuenta restricciones de consumo).
- Se desarrollarán las rutinas de SW necesarias para el manejo y obtención de datos de todos los sensores, y el pasaje de información a través de las interfaces entre el microcontrolador y el GPS, DUT y cualquier otro eventual dispositivo que se disponga para dialogar con el microcontrolador.
- Se deberá prever un manejo inteligente del consumo de toda la electrónica en la carga útil.
- Se implementará algún mecanismo de forma de poder controlar que la posición de la carga útil permanezca dentro de un espacio prefijado.
- Otras características que también deben ser implementados son el diseño de circuitos de detección y protección ante fallos, tales como *latchup* o problemas de recuperación del sistema.
- El sistema diseñado deberá ser capaz de operar en las condiciones ambientales (temperatura, humedad, presión, radiación, etc.) presentes en las alturas cercanas a los treinta kilómetros de altura.

Los objetivos enumerados con anterioridad son aquellos que fueron presentados en el documento de planificación del proyecto, estos sufrieron cambios, siendo los principales la eliminación del estudio del VHDL iría en el FPGA de la placa del DUT y la disminución de la prioridad en la implementación de un circuito anti *latchup*. Para un mayor detalle sobre estos puntos referirse al apéndiceC.

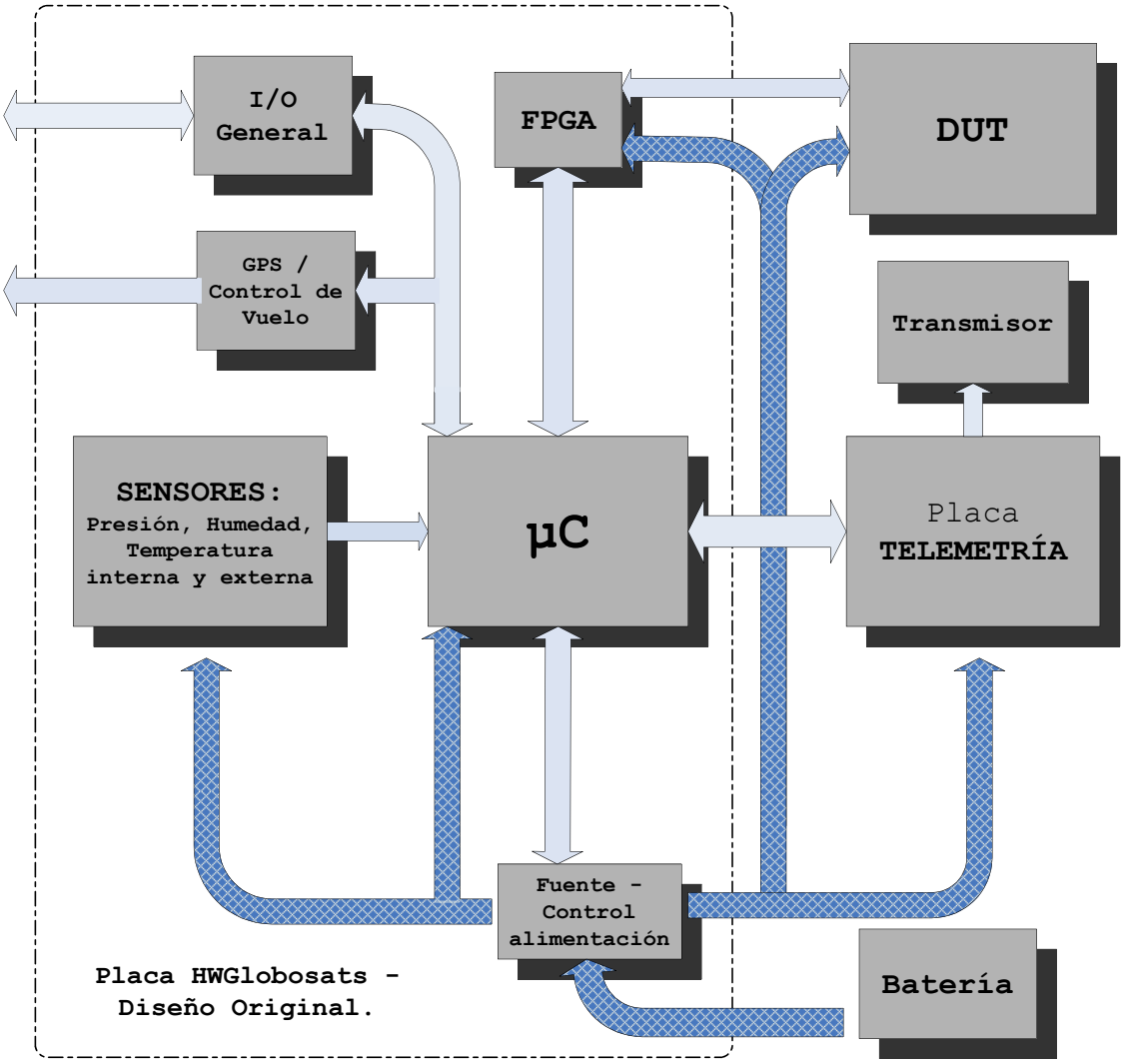


Figura 1.2.: Primer diseño para la placa del grupo HWGlobosats. En este diseño el FPGA, la fuente de alimentación y el control de la alimentación para sensores, placa de telemetría, DUT y FPGA, se encontraban dentro de la placa. Las flechas oscuras indican alimentación, mientras que las claras denotan señales. Los detalles se analizan en la sección 2.

2. Modularización del Sistema.

Una vez determinados los requerimientos del sistema en su totalidad[1], se planificó el reparto de tareas entre los grupos de estudiantes de los proyectos HWGlobosats y TeleGlobosats. Como los nombres lo sugieren, los aspectos que por su naturaleza se pudieran asociar al terreno de las telecomunicaciones - telemetría se asignarían al grupo TeleGlobosats, mientras que los asociados al nivel de *hardware* se asignarían al grupo HWGlobosats.

2.1. Primer diseño.

Un primer esbozo del reparto de tareas ensayado es el que se ilustra en la figura 1.2. Como se señala en el epígrafe de dicha figura, en primera instancia se disponía de una placa principal que incluía un microcontrolador, un FPGA, GPS y mecanismos de control de vuelo, los sensores indicados y la regulación del voltaje de la batería para proporcionar los niveles de alimentación requeridos por todos los dispositivos que fueran necesarios.

2.1.1. Descripción del funcionamiento.

El funcionamiento podría resumirse de la siguiente manera: en el corazón del sistema estaba el microcontrolador. Éste sería el encargado de tomar los valores de los sensores, también de energizar y desenergizar los distintos circuitos, tales como el DUT, FPGA y sensores. A su vez, debería dialogar con el FPGA para recibir los reportes del experimento que este último llevaría a cabo con el DUT, mientras que para enviar la información relevante hacia el exterior, se dispondría de otra interfaz de comunicación, hacia la placa de telemetría. En la placa de telemetría se adaptaría convenientemente esta información para ser enviada al transmisor. La información sobre la posición sería entregada al microcontrolador a través de otra interfaz hacia el GPS.

En caso de que la carga útil se escapara de una zona prefijada, el microcontrolador accionaría un mecanismo de desprendimiento entra la carga útil y el globo.

2.1.2. Administración del consumo.

Los criterios seguidos para la disposición de la alimentación a los diversos dispositivos son de *optimización de consumo* y proveer un mecanismo de *ubicación de la carga útil*

[1] Referirse a la sección 1.7.

del globo una vez que ésta se encontrara nuevamente en tierra. De esta manera, una vez conectado el sistema y durante el ascenso y parte del descenso se alimentarían todos los dispositivos. Cuando la carga útil del globo comenzara su descenso, sería apropiado, luego de encontrarse a menos de determinada altura, desconectar los sensores y el FPGA - DUT, ya que la información que pudieran proporcionar a partir de ese instante no sería relevante. No ocurriría lo mismo con el GPS, la placa Telemet y el transmisor, ya que la información de posición es importante en todo momento, particularmente una vez finalizado el vuelo para poder ubicar el lugar de aterrizaje y de este modo recuperar la carga útil. Es por esto que los dispositivos que recibirían alimentación de manera constante serían lógicamente el microcontrolador, GPS, la placa Telemet y el transmisor.

2.2. Diseño final.

El principal aporte del primer diseño discutido fue conformar una base de diseño suficiente como para tener presentes aspectos de los requerimientos que de otro modo serían descuidados, y avanzar hacia un diseño más detallado que tuviera en cuenta aspectos de la implementación que se describirán en los párrafos siguientes.

2.2.1. Cambios respecto al primer diseño.

- Basados en el criterio de lograr flexibilidad para poder desarrollar y evaluar funcionalidades paso a paso, y luego ir integrando todo en un único diseño, se decidió migrar el módulo `GPS / Control de Vuelo` desde la placa principal o Main hacia la placa Telemet. Esta medida tendría la ventaja de que se podría desarrollar un conjunto de funcionalidades *esenciales*[2] para realizar una primera liberación de prueba enteramente dentro de una sola placa, independientemente del trabajo que se realizara para el desarrollo de la placa Main. De este modo se lograba mayor independencia entre los trabajos de ambos grupos, ya que cada uno de ellos trabajaría en placas separadas, y se podía ir avanzando simultáneamente hacia un diseño definitivo de la parte de comunicación y de *hardware* de la placa Main.
- Dado que el cliente se encargaría de la elaboración de una placa que contendría el FPGA y el DUT, se quitó de la placa principal al FPGA. Sólo se debía especificar la alimentación requerida por esta placa y el protocolo de comunicación entre el microcontrolador y el FPGA.
- También por razones similares a las del primer ítem, se decidió realizar la regulación de voltajes de la batería en una placa dedicada, denominada placa de Fuentes.
- Como medida de contingencia respecto al funcionamiento de las comunicaciones entre la carga útil y las estaciones de tierra, se dispone a modo de «*caja negra*» de un módulo denominado **`MEMORIA`**, cuya composición será analizada en la sección 3.4.

[2]Se entiende por *esenciales*: recibir datos del GPS, modularlos y transmitirlos.

El diseño final se muestra en la figura 2.1.

2.2.2. Interfaces de comunicación entre la placa *Main* y los demás dispositivos.

Por razones de simplicidad se decidió que el tipo de interfaz entre el microcontrolador y los demás dispositivos sería del tipo serie, RS232. La mínima cantidad de interfaces de este tipo que debería poseer el microcontrolador debería ser de tres, ya que debería comunicarse con el FPGA de la placa DUT, el módulo GPS presente en la placa TELEMET y un PIC encargado de la modulación[3] ubicado también en la placa de telemetría.

2.2.3. Descripción del funcionamiento.

Una vez conectada la batería el microcontrolador comenzará un ciclo en el que recolectará los datos de los sensores, de la placa DUT, y el GPS. Posteriormente a esta recolección de datos, pero siempre dentro del ciclo antes mencionado, formará la trama determinada por el grupo TELEGLOBOSATS y la transmitirá hacia el PIC encargado de la modulación ubicado en la placa TELEMET. Una vez recibida la trama, el PIC la enviará modulada en un determinado protocolo[4] hacia el transmisor, el cual la transmitirá cuando el PIC se lo indique.

Una vez que comience el descenso de la carga útil y luego de encontrarse por debajo de una altura dada, se desconectará la alimentación a la placa DUT, a los sensores, y al bloque `MEMORIA`. El microcontrolador seguirá obteniendo la posición a partir del GPS y enviándolo hacia la placa de telemetría tal como se describió anteriormente.

Del mismo modo antes descripto, si ocurre que en el transcurso del vuelo la carga útil se sale por fuera de una zona determinada, se romperá el vínculo entre la carga útil y el globo y se dejará caer amortiguada por el paracaídas.

[3] Tal como se dispuso por sugerencia del grupo TELEGLOGOSATS.

[4] El protocolo seleccionado por el grupo TELEGLOBOSATS para el armado de las tramas es APRS, y la modulación se realiza según el protocolo Bell 202 (AFSK). El transmisor opera en FM, a la frecuencia de 145.030 MHz [PRS08].

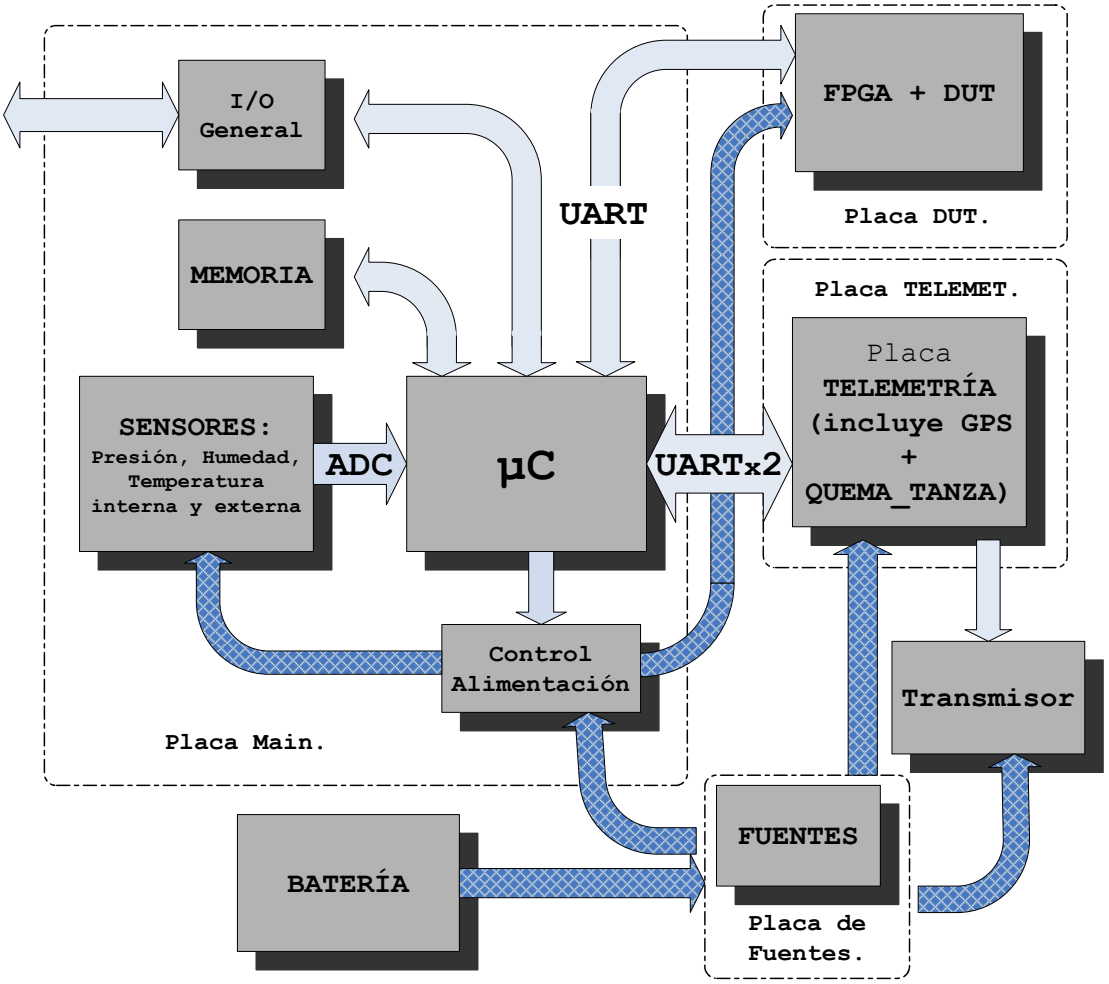


Figura 2.1.: Esquema del diseño final para el sistema en su totalidad. Para una mayor claridad no se incluye en el esquema la alimentación desde la placa de fuentes hacia el microcontrolador. Nuevamente, las flechas de color oscuro indican alimentación, mientras que las de color claro indican señales. Adicionalmente, para la implementación del monitoreo de la batería, debería ingresarse el voltaje de la misma a la placa HWGlobosats para su medición. Obsérvese la migración del módulo `GPS / Control de vuelo` desde la placa HWGlobosats hacia la placa Telemet, con la consiguiente presencia de dos interfaces de comunicación hacia la placa de telemetría..

3. Selección de componentes.

En las siguientes secciones se describe el proceso de selección de los componentes necesarios para cumplir los requerimientos.

3.1. Microcontrolador.

La elección de este componente resultaba crucial para las etapas siguientes y la implementación de los objetivos. A pesar de esto se sucedieron varios cambios en los criterios para la definición del modelo a usar.

En un principio se buscó un micro que fuera capaz de correr un sistema operativo *embedded*, ya que se pensaba utilizar este proyecto como base para la realización de un satélite experimental, el que seguramente necesitará un procesador de una capacidad de procesamiento considerable. Luego se descartó esta opción, considerándola demasiado compleja para los fines que se perseguían en esta instancia, además de que una de las características que se deseaba era la robustez frente a la radiación, lo que se creía capaz de mejorar utilizando un micro cuya fuente de alimentación fuera lo más alta posible[1], característica con la que no contaban los micros de última generación con gran capacidad de procesamiento, cuyas tensiones de polarización muestran tendencias decrecientes.

Durante este período de tiempo tampoco se había definido claramente la modularización del proyecto, por lo que no se sabía si se iba a compartir el microcontrolador con el grupo TELEGLOBOSATS, lo que hizo que se buscaran también procesadores que realizaran operaciones específicas de DSP, útiles para realizar la modulación por ejemplo. Utilizando este criterio se llegó a incluir dentro de las opciones un DSPIC, que contaba además con la característica de utilizar una alimentación de 5V.

[1] Referirse a la sección 1.3.2. En los momentos de selección del microcontrolador se tuvo este aspecto en cuenta. Sin embargo, con posterioridad y luego de charlas con RAOUL VELAZCO, resultó bastante razonable suponer que no iban a presentarse anomalías por radiación en el microcontrolador dada su superficie y el tiempo de exposición aunque se seleccionara un microcontrolador de alimentación relativamente baja, por ejemplo menor o igual a 3.3 V.

Por otra parte, como medida de protección ante un evento de *latchup* es conveniente un voltaje de alimentación bajo; aunque contra este efecto se pueden implementar - como de hecho se implementaron - otras medidas de protección como circuitos *anti - latchup*. Detalles de esta protección se pueden encontrar en la sección 8.

Micro	Voltaje (V)	Consumo	Interfaces	Canales ADC	Otros
Microchip **dsPIC30F6010**	2.5 - 5.5	5 mA - 3.3 V @ 0.128 MIPS 155 mA - 5 V @ 30 MIPS	2 UART I²C 2 SPI 2 CAN	16 de 10 bits	1 KB RAM 24 KB *Flash* 1 KB EEPROM 5 16-bit Timer/Counters Funciones de DSP [Micr07]
Texas Instruments **TMS470**	1.71 - 2.05	115 mA operating mode @ 2.05 V 1.25 mA máx standby mode @ 2.05 V 365 µA máx halt mode @ 2.05 V	2 SPI I²C 2 SCI 1 CAN	12 de 10 bits	384 KB *Flash* 32 KB RAM 48 MHz
Atmel **TCS695F**	4.5 - 5.5	1.0 W Typ @ 20 MIPs 0.7 W Typ @ 10 MIPs	Chip Select Generator Wait State Generation Memory Protection General Purpose Interface Dual UART	-	General Purpose Timer Real-Time Clock Timer Watchdog Timer Endurecido para trabajar expuesto a radiación
Atmel **ATMEGA2560**	1.8 - 5.5 para 0 MHz $\leq$ $f_{CLK} \leq$ 8 MHz	**Ultra-Low Power Consumption:** Active Mode: 1 MHz, 1.8V: 500 µA Power-Down Mode: 0.1 µA @ 1.8V	4 USARTs 1 SPI *2-Wire* (I²C)	16 de 10 bits	8 KB SRAM 256 KB *Flash* 4 KB EEPROM 2 8-bit Timer/Counters 4 16-bit Timer/Counters Watchdog Timer
Rabbit **Rabbit3000**	1.8 – 3.6	2 $^{mA}/_{MHz}$ @ 3.3 V	**Serial ports:** 6 CMOS-compatible Digital I/O: 56+ (7 puertos de 8 bits)	-	*Timers:* 10 8-bit, 1 10-bit 2 match registers, 1 16-bit timer

Tabla 3.2.: Diferentes opciones de microcontroladores manejadas y algunas de sus características. Por más detalles referirse a [BOM1].

También se realizaron búsquedas en otros fabricantes como Texas Instruments, Atmel, Rabbit, Phillips e Intel, dándole preferencia a chips de Atmel, Texas Instruments y Rabbit debido a la experiencia de utilización de micros de estos fabricantes en algunos proyectos de la facultad.

La tabla 3.2 lista algunas de las alternativas manejadas. Podemos apuntar de cada uno de los micros que se listan:

✍ dsPIC30F6010

- Posee una cantidad y variedad de interfaces tal que permitiría controlar varios periféricos con este tipo de interfaces. Entre ellos podrían contarse por ejemplo sensores y memorias.
- Varios canales de ADC que servirían para conectar sensores de salida analógica.
- Admite voltajes de alimentación altos.
- Presenta funciones de DSP.
- Su consumo es de un valor intermedio entre los que aparecen listados.
- La cantidad de UARTs es de 2. Sin embargo, de elegirse esta opción el PIC modulador de la placa de telemetría se podría obviar y eliminar una interfaz serie entre la placa Main y la placa Telemet[2], aunque el trabajo de ambos grupos vinculados al proyecto perdería un poco de independencia.

✍ TMS470

- Su consumo es de un nivel medio - alto comparado al del resto.
- Presenta interfaces indicadas para manejar periféricos como sensores y memorias, etc.
- Varios canales de ADC que servirían para conectar sensores de salida analógica.
- Su alimentación es de un nivel bastante bajo.
- No tiene UARTs, lo que le quita posibilidades frente a los demás microcontroladores listados.

✍ TCS695F

- Es un micro endurecido para trabajar en entornos de radiación.
- Opera con voltajes de alimentación altos.
- Su consumo es bastante elevado comparado al del resto de las opciones.

[2]En este caso sería suficiente con 2 UARTs para el microcontrolador.

- No tiene canales ADC, lo que haría necesaria la utilización de un módulo ADC separado adicional.
- No posee interfaces apropiadas de manejo de sensores.
- Tiene una sola UART.

✍ ATMEGA2560

- Es orientado a aplicaciones de bajo consumo[3].
- El nivel de su voltaje de alimentación es de 3.3 V, aunque admite alimentación de 5.0 V.
- Tiene varios canales ADC.
- Tiene varias interfaces útiles para manejar sensores y memorias.
- Tiene mayor cantidad de RAM, *Flash* y EEPROM que el DSPIC.
- La cantidad de UARTs es de 4, por lo que incluso estaría sobrando una de ellas que permitiría realizar testeos para correcciones de *software* y *hardware*.

✍ Rabbit3000

- Su consumo es de un nivel medio - bajo.
- Su alimentación es de nivel bajo.
- No tiene canales ADC, lo que haría necesaria la utilización de un módulo ADC separado adicional.
- No posee interfaces apropiadas de manejo de sensores.
- No tiene UARTs, lo que le quita posibilidades frente a los demás microcontroladores listados.

Vista la anterior comparación, el criterio de elección que primó en última instancia fue el de la cantidad de interfaces serie del tipo RS232 que debía poseer el microcontrolador seleccionado. Esto fue así ya que el mismo debía ser capaz de comunicarse con el DUT, la placa Telemet y el GPS a través de este tipo de interfaz. Además de poseer un mínimo de tres UARTs, se buscó que contara con la mayor cantidad de interfaces posibles para el manejo de los sensores, tales como I²C, SPI además de conversores analógico - digitales.

En base a lo mencionado el modelo elegido fue el `ATMEGA2560` de Atmel, ya que el mismo posee cuatro UARTs y además cuenta con una interfaz I²C (TWI - *Two - Wire Interface*) , SPI, y 16 canales para ADC. Es un microcontrolador basado en arquitectura AVR de 8 bits, de bajo consumo (de importancia teniendo en cuenta que el sistema será

[3] *Ultra-Low Power Consumption.*

alimentado por batería), reloj de 0 - 16 MHz y cuenta con alguna característica más como *watchdog* para controlar el funcionamiento del sistema y poderlo reiniciar ante una falla grave. Otra de las ventajas que ofrece este microcontrolador es la experiencia en su uso por parte de docentes de la Facultad, así como la facilitación de herramientas de programación.

La opción del DSPIC fue finalmente desestimada, dada que implicaba un nuevo cambio en la modularización del proyecto definida con anterioridad[4], y el grupo TELEGLOBOSATS ya se encontraba trabajando en el diseño del modulador en el PIC, lo que de este modo requeriría del uso de 3 UARTs indefectiblemente.

3.2. Sensores.

Como se puntualizó en la sección 1.7, los sensores que se deben incluir como parte de la carga útil son sensores de presión, humedad, temperatura interna y temperatura externa. En esta sección se detallan las selecciones realizadas y los criterios empleados en las mismas. Más adelante, en el capítulo 5 se pueden encontrar detalles del conexionado realizado y las características del sistema de medida implementado para cada una de las magnitudes *en su totalidad*[5].

3.2.1. Sensores de temperatura.

Se preveía realizar mediciones tanto de la temperatura interna de la cápsula como de la externa. Se buscó entonces para la medición de la temperatura externa un sensor capaz de cubrir todo el rango de temperaturas, que abarcaba de -70 ºC a 35 ºC aproximadamente, siendo el más relevante de estos dos límites el inferior ya que era la temperatura que esperamos encontrar a las altitudes máximas que puede alcanzar el globo[6], del entorno de los 30 km. La totalidad de los sensores disponibles en formato de circuitos integrados no eran capaces de medir temperaturas tan bajas, por lo que se optó por la utilización de una termocupla. Para la temperatura interna la situación era distinta, ya que se tomarían medidas para mantenerla en valores suficientemente altos como para un correcto funcionamiento de la electrónica.

3.2.1.1. Sensor de temperatura externa.

Como se menciona en el apartado 3.2.1 se optó por una termocupla para realizar la medición de esta temperatura. El tipo de termocupla elegido es el J, cuyo rango de temperaturas de trabajo comprende entre -100 ºC a 700 ºC. Dicha termocupla se conectará

[4] Ver sección 2.

[5] Abarcando sensor más el respectivo canal ADC del microcontrolador

[6] Los modelos para la estimación de la temperatura en función de la altura encontrados prevén temperaturas mínimas de aproximadamente -55 ºC [NASA], pero supusimos un mínimo mucho más conservador de -70 ºC.

a un amplificador integrado[7] que realiza la compensación de punta fría, linealización y amplificación de la señal de la termocupla. Debido a los rangos de entrada para los canales del conversor AD del micro seleccionado, es necesario introducir un *offset* en uno de los contactos de este amplificador. Este tema se tratará más en detalle en la sección 6.1.

3.2.1.2. Sensor de temperatura interna.

Como ya se mencionó, para la medición de temperatura interna no se presenta el inconveniente de las bajas temperaturas que se debía tener en cuenta para la medición de la temperatura exterior, ya que la situación sería distinta siendo que el diseño de la aislación tendría el objetivo de mantener la temperatura interna por sobre los $-10\,^{o}C$ de forma de asegurar un correcto funcionamiento de la electrónica presente en la carga útil.

Se buscó dentro de distintas alternativas de interfaces disponibles, las más adecuadas para dialogar con el microcontrolador[8]. Asimismo se tuvo en cuenta el consumo y la complejidad que los sensores ofrecieran.

La tabla 3.4 muestra las principales alternativas encontradas. Dado que el microcontrolador seleccionado poseía una única interfaz SPI que sería utilizada con otros fines que no serían los de manejar los sensores ni las memorias, se contaba con varios periféricos a controlar y no se consideraba necesario lograr un alto *troughput* en el flujo de datos entre el microcontrolador y los sensores y memorias que se seleccionarían; la interfaz I²C presentaba ventajas de simplicidad para la implementación y manejo del *bus* tanto de *software* como de *hardware*[9] [Sch00, Kal02]. Los dos sensores que presentaban este tipo de interfaz de entre los que se manejaban como opciones eran el `TMP 100` de Texas Instruments y el `ADT7411` de Analog Devices.

Entre estos dos sensores restantes se puede ver que:

- El `TMP 100` exhibe un consumo menor al del `ADT7411`.
- El rango de temperaturas de operación para el `ADT7411` es mayor al del `TMP 100`, no obstante lo cual las temperaturas en que difieren estos rangos de operación no representan particular interés dado el ambiente que pretendemos lograr en el interior de la cápsula de la carga útil del *globosat*.
- Un aspecto que no se detalla en la tabla 3.4, pero que es importante resaltar: el precio del `ADT7411` es más del doble que el del `TMP 100`[10]. Inspeccionando la hoja de datos del `ADT7411` se puede apreciar la mayor complejidad de éste respecto al

[7] `AD594AQ` de Analog Devices.
[8] Recordemos que el microcontrolador posee una interfaz I²C y una interfaz SPI.
[9] Sobre todo teniendo en cuenta la reducción en área de PCB que representaría el uso de simplemente dos líneas del protocolo I²C.
[10] Por ejemplo: En el distribuidor Digikey la diferencia era de USD 4.43 contra USD 2.13, en Jameco de USD 4.35 contra USD 2.05, y en Farnell de 5.14 € contra 1.79 €.

Nombre	Alimentación	Interfaz	Rango de Temperatura	Consumo
TMP 100	2.7 V - 5.5 V	I²C	-25 ºC a- 85 ºC	Bus Inactivo 45 µA typ, 75 µA max Bus Activo, f_{SCL} = 400 kHz: 70 µA Bus Activo, f_{SCL} = 3,4 MHz: 150 µA
TMP 121	2.7 V - 5.5 V	SPI	-25 ºC a 85 ºC	Bus Inactivo 35 µA (typ) 50 µA (max). Bus Activo no se presentan datos en la datasheet.
ADT7411	2.7 V - 5.5 V	I²C	-40 ºC a 125 ºC	Normal Mode: 2.2 mA max @ V_{DD} = 5V Power Down Mode: 10 μA max @ V_{DD} = 5V

Tabla 3.4.: Características de las principales opciones de sensores de temperatura interna.

TMP 100, lo cual creemos que puede justificar la diferencia de precios, pero esta diferencia no se justifica para el tipo de medida que pretendemos realizar en esta oportunidad.

Basados en todas las consideraciones precedentes, el sensor seleccionado es el TMP 100 de Texas Instruments. Como ya se señaló, éste opera en rangos de temperaturas de -25 ºC y 85 ºC con una exactitud de ± 2 ºC.

Consideraciones adicionales.

En el caso del amplificador de la termocupla es necesario alimentarlo proporcionándole tensiones de ± 5 V, para poder operar en un rango expandido de temperaturas tanto positivas como negativas. En cuanto al consumo, éste puede considerarse relativamente bajo (aproximadamente menor a 1 mW).

3.2.2. Sensor de Humedad.

Para la medida de la humedad se buscaron sensores que abarcaran un rango de medida de 0 % a 100 % de humedad relativa (RH).

Se intentó buscar sensores de interfaz digital, pero el único que se encontró de este tipo[11] presentaba una interfaz particular implementada por el fabricante optimizada para

[11] SHT11 Sensirion, sensor de humedad relativa en el rango de 0 % a 100 %, **y de temperatura** entre -40 ºC y 123.8 ºC.

Sensor	Voltaje	Corriente (típico)	Rango RH (%)	Rango de Temperaturas de Funcionamiento
TDK `CHS-UGS, -UPS`	5.0 V	600 μA	5 - 95	+5 ºC a +45 ºC
Honeywell `HIH - 3610`	5.0 V	200 μA	0 - 100	−40 ºC a +85 ºC
Honeywell `HIH - 4031`	5.0 V	200 μA	0 - 100	−40 ºC a +85 ºC

Tabla 3.5.: Distintas opciones de sensores de humedad relativa. El sensor de TDK y el `HIH 3610` fueron descartados principalmente por no abarcar el rango de RH deseado el primero, y por no encontrarse disponible para su adquisición en el distribuidor en el que se adquirirían el resto de los componentes el segundo.

consumo, que no es compatible con I^2C ni con ninguna otra interfaz que ya tuviéramos disponible en el microcontrolador elegido.

Nuevamente, otro de los factores tenidos en cuenta fue el de las tensiones de alimentación y consumo de corriente requeridos para el funcionamiento del sensor.

Finalmente se optó por el sensor `HIH-4031-001` de HONEYWELL con salida analógica y que operaba dentro de todo el rango de humedad que se deseaba medir (0 - 100 %), además de cumplir con otras de las características solicitadas: su voltaje de alimentación es de 5.0 V y su consumo es de 200 µA típico y 500 µA máximo. Opera entre -40 ºC y 85 ºC con muy buena linealidad en prácticamente todo el rango de RH a medir.

Figura 3.1.: Sensor de Humedad `HIH-4031-001`.

Otras alternativas tenidas en cuenta se listan en la tabla 3.5.

3.2.3. Sensor de Presión.

Para la selección de este componente se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- El tipo de medida debe ser de *presión absoluta* y no relativa.
- El rango de presiones a medir debe estar comprendido entre los 0 y 15 psi[12].

[12] 15 psi ~ 1 atm.

Sensor	Tipo de Medida	Rango de Presión	Voltaje	Consumo	Tipo de Salida
Motorola `MPX2200A`	*Absoluta*	0 a 200 kPa	10 V	6 mA típico	*Analógica*
Honeywell `ASCX15AN`	*Absoluta*	0 a 15 psi	5 V	4 mA sleep mode	*Analógica*

Tabla 3.6.: Alternativas para los sensores de presión.

- El voltaje de alimentación sería conveniente que fuera menor o igual a 5 V, ya que este valor era común a varios de los demás sensores que debíamos utilizar y de otro modo se agregaría la complicación de la generación de otra tensión adicional (con el correspondiente gasto que esto implica: regulador, etc.) para alimentar un único sensor.
- El consumo debería ser el menor posible.

Las alternativas manejadas se listan en la tabla 3.6.

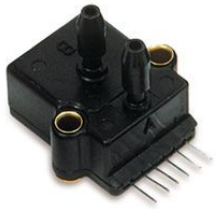


Figura 3.2.: Sensor de presión `ASCX15AN`.

El voltaje de alimentación fue una de las razones por la cual se descartó el `MPX2200A` ya que el mismo requería 10 V típico y 16 V máximo. Este sensor representaba un gasto económico menor pero por otro lado su consumo resultaba inviable (6 mA @ 10 V). El sensor elegido que cumplía con los requerimientos buscados resultó ser el `ASCX15AN` de Honeywell. El mismo requiere ser alimentado con 5 V y su consumo en reposo ronda los 4 mA, lo que es sensiblemente menor al del sensor antes mencionado[13].

3.3. GPS.

En un principio se habían sugerido dos opciones de fabricantes por parte de los tutores: Trimble y Holux. Se realizaron entonces búsquedas en Internet para identificar modelos adecuados para nuestros propósitos. En un principio las preferencias se volcaron hacia Trimble debido a sugerencias realizadas por docentes vinculados al proyecto que contaban con experiencia en el uso de módulos GPS de este fabricante.

[13] La diferencia en el consumo en Watts es de 60 mW contra 20 mW.

Operación	Límite
Aceleración	4 g ($39{,}2\ \frac{m}{s^2}$)
Tirón	$20\ \frac{m}{s^3}$
Velocidad	$500\ \frac{m}{s}$
Altitud	$18000\,m$

Tabla 3.7.: Límites de operación del módulo receptor GPS `Lassen IQ` [LaIQ].

Con posterioridad se podría confirmar que HOLUX no era una buena opción con bases más sólidas, cuando se encontraron reportes de experiencias fallidas de *balloonsats* equipados con GPS de HOLUX [TeBG]. Por otro lado, en las hojas de datos de TRIMBLE se remarcaba la funcionalidad a las grandes alturas a las que se pretendía trabajar.

Se identificaron dos posibles modelos de TRIMBLE:

✍ **Trimble's Lassen™ SQ module.**

- http://www.trimble.com/lassensq.shtml
- Consumo / Voltaje: 100 mW @ 3.3 V.

✍ **Trimble's Lassen™ IQ module.**

- http://www.trimble.com/lasseniq.shtml
- Consumo / Voltaje: 86 mW (26 mA) @ 3.3 V.

Gracias a la colaboración de docentes de Facultad, se podría contar con el módulo `Lassen IQ` sin necesidad de la adquisición, por lo que se optó por esta opción. Otra de las razones para esta elección fue el menor consumo de este tipo de módulo GPS frente a la otra opción manejada.

La interfaz hacia el micro es de tipo serie, y se conectará a una de las UART's de las que el micro dispone.

Como se puede observar en la tabla 3.7, en primera instancia el GPS opera hasta un límite de altura menor al que ascenderían los globos liberados, pero se aclara por parte del fabricante que este límite puede ser excedido mientras no se exceda el límite de velocidad al mismo tiempo. Como esto no ocurriría y como se señala también por parte del fabricante, el modelo empleado no presenta problemas en la utilización del mismo en globos de gran altitud [LaIQ].

Durante el transcurso de la segunda liberación se comprobó que el GPS reporta la altura con overflow en los 10.000 metros, siendo que al superar esta altura el dato reportado pasa a -10.000 metros y se incrementa hasta llegar nuevamente a los 10.000 metros.

3.4. Memorias.

Las memorias se incluyen para guardar datos que se deseen conservar independientemente del funcionamiento de la transmisión de los mismos. La idea surgió luego de encontrar varios experimentos con *balloonsats* que no utilizaban un transmisor sino que guardaban los datos requeridos en memoria, como por ejemplo [Go06].

En [Go06] el tipo de memoria utilizada contaba con una interfaz I²C, por lo que pensamos que dado que nos íbamos a disponer a implementar dicho *bus* de todos modos, era una buena idea agregar algunas memorias como esclavos.

Al momento de realizar la selección de las mismas no se contaba con una idea definida de la longitud de los mensajes que se transmitirían[14], así como tampoco se había definido el tiempo entre cada una de las transmisiones, ni se tenía idea la duración del vuelo.

Las memorias seleccionadas son EEPROMs seriales de interfaz I²C, modelo `24FC512` de Microchip. Ellas se dispondrán como esclavos en el *bus* I²C que se implementará en la placa Main. Cada una de ellas tiene un tamaño de 64 kB y se utilizarán cuatro de ellas en total, por lo que ***la memoria total disponible será de 256 kB***. Algunas de sus características eléctricas importantes:

- Estas memorias admiten una alimentación de 5.0 V.
- Bajo esta tensión de alimentación son capaces de funcionar hasta una frecuencia de 1 MHz.
- A 400 kHz tienen un consumo máximo de 400 μA en lectura y de 5 mA en escritura.
- Su corriente de reposo es de 1 μA para un rango de temperaturas de entre -40 ºC a $+85$ ºC.
- Tienen tres contactos de dirección, por lo que se podrían conectar hasta ocho de ellas en el *bus*.

Una opción *equivalente* a esta memoria podría ser el modelo `24C512` de Atmel.

3.5. Relés.

Los relés se constituyeron en la manera más viable de conectar o desconectar la alimentación de determinados componentes con el fin de realizar el manejo de la potencia consumida a la batería. Por ejemplo, como se mencionaba en la sección 2.1.2, para ahorrar energía se podrían desconectar los sensores y la placa del DUT, manteniendo el sistema de ubicación y el transmisor encendidos durante la bajada del globo o en casos en que se detecte el bajo nivel de la alimentación.

[14] Y por lo tanto, de la longitud de los mensajes a almacenar dentro de las memorias.

3.5.1. Generalidades.

Se disponía de varios tipos de relés para cumplir con la función de conexión y desconexión, no obstante el requisito de más importancia resultó ser la corriente consumida al abrir y cerrar los relés, o para eventualmente mantener el estado de apertura o clausura de los mismos. De estos requisitos surgió la necesidad de estudiar los diferentes tipos de relés disponibles: *non - latching*, *single - winding latching* y *double - winding latching relays* [Om90, OmTI].

- Los relés ***non - latching*** poseen un estado normal, en el cual se mantienen si no se encuentra excitada su bobina mediante una tensión[15], y un estado al que llegan una vez ésta es exitada, pero como su nombre lo indica, no almacenan o retienen el valor de su salida una vez que cesa esta excitación. Por lo tanto, dado su consumo considerable y constante, no eran una opción aceptable para realizar las conexiones o desconexiones requeridas.
- Los ***latching relays*** sí mantienen su salida[16] aunque no sean excitados. Poseen un tipo de excitación para abrirlos y otro para cerrarlos. Por el tipo de excitación se distinguen las dos clases de *latching relays* mencionadas anteriormente: *single - winding latching* y *double - winding latching relays*.
  - Los ***single - winding latching relays*** constan solamente de una bobina de control, y según el sentido de la corriente[17] que circule por ella será el estado del relé.
  - Los ***double - winding latching relays*** en cambio constan de dos bobinas de control, operando de un modo similar a un *latch* SR. Cuando se activa una de dichas bobinas, el relé se abre, y cuando se activa la otra, el relé se cierra.

Por razones prácticas, ya que los relés serían manejados por el microcontrolador, se tornaba más sencillo el uso de los relés del tipo *double - winding latching*. Los *single - winding* presentan el inconveniente de requerir dos polaridades distintas para la misma bobina de control, mientras que para comandar los del tipo *double - winding* basta con dedicar dos pines del micro y fijar un nivel alto en la bobina correspondiente según se quiera abrir o cerrar el relé.

El modelo seleccionado es el `G6HK-2100 5 DC` de OMRON, cuya potencia consumida es de aproximadamente 200 mW. Su tensión nominal es de 5 V, mientras que las tensiones para hacerlo conmutar son del 75 % de su tensión nominal.

3.6. Fuentes reguladas.

Lo que se buscó en este caso fueron componentes simples capaces de brindarnos una buena *estabilidad* en los voltajes de alimentación para los distintos dispositivos, así como

[15] NO – *Normally Opened*, NC – *Normally Closed*.
[16] Entendiendo como salida el estado *abierto – cerrado* del relé.
[17] O tensión impuesta.

también una buena *eficiencia* en la conversión del voltaje. Esto debía ser así ya que al ser el sistema alimentado por una batería se deseaba inmunidad frente a la descarga progresiva que la misma iba a experimentar con las consecuencias que esto trae, además de posibles caídas repentinas que podría sufrir su voltaje frente a picos de corriente durante los períodos de transmisión.

Se tomó como opción una sugerencia de Sebastián Fernández, que consistía en utilizar fuentes *switcheadas* del fabricante Linear Technology, las cuales ya habían sido utilizadas en otros casos con buenos resultados. La principal ventaja que presentan estos reguladores frente a reguladores lineales es su eficiencia, la cual no depende de la diferencia de voltaje entre la entrada y la salida de los mismos. Se inició una búsqueda dentro del sitio *online* del fabricante tomando como criterios los voltajes deseados, el voltaje de la batería a utilizar que se sabía estaría dentro del rango de 10 V a 15 V, así como la cantidad de corriente consumida por la totalidad del diseño, la cuál fue estimada *grosso modo* con el fin de tener una idea para la elección de los reguladores.

Se eligieron primeramente tres reguladores: `LT1767EMS8E-3.3`, `LT1767EMS8E-5` y `LT1374CS8`. Los dos primeros son de similares características, excepto por el voltaje de salida que es de 3,3 y 5 V respectivamente, mientras que en el tercero es posible obtener cualquier voltaje de salida, seleccionando de una tabla presente en la hoja de datos los valores de las resistencias a colocarse como divisor resistivo entre los contactos `Out` y `Feedback`. Este último regulador se seleccionó porque es capaz de entregar una mayor corriente que los primeros. El `LT1767` es capaz de entregar hasta 1,5 A y la mínima eficiencia que presenta es de 75 %. Por otro lado el `LT1374` es capaz de suministrar hasta 4,5 A, con una eficiencia mínima similar. Un resumen de estas características se lista en la tabla 3.8.

	Voltaje de Salida	Corriente Máxima	Eficiencia Mínima
`LT1767EMS8E-3.3`	3.3 V	1.5 A	75 % - 78 %
`LT1767EMS8E-5`	5.0 V	1.5 A	75 % - 78 %
`LT1374CS8`	Ver tabla 3.9	4.5 A	77 % apróx.

Tabla 3.8.: Características de los reguladores preseleccionados [1374, 1767].

Voltaje de Salida (V)	R_2 (kΩ)	R_1 (kΩ) **(Más cercano al 1 %)**	**Error posible en la salida debido a los saltos de los resistores al 1 %**
3	4.99	1.21	+0,23
3.3	4.99	1.82	+0,08
5	4.99	5.36	+0,39
6	4.99	7.32	−0,5
8	4.99	11.5	−0,04
10	4.99	15.8	+0,83
12	4.99	19.6	−0,62
15	4.99	26.1	+0,52

Tabla 3.9.: Posibles voltajes de salida para el regulador `LT1374CS8`, y los respectivos valores para dos resistencias de su diseño [1374].

3.7. Otros componentes.

Además de la selección de cada uno de los componentes mencionados en las anteriores secciones, se debieron estudiar las respectivas hojas de datos buscando componentes necesarios para la interconexión de los mismos, tales como transistores, resistores, capacitores e inductancias. La elección de estos últimos se realizó directamente en el motor de búsquedas del sitio *web* de FARNELL[18] o DIGIKEY[19], los cuales fueron acordados como dos de los distribuidores y proveedores a los que se adquirirían los componentes.

3.7.1. Implementación de las interfaces serie entre los distintos dispositivos.

Para la implementación de la interfaz serie entre la placa DUT y la placa MAIN se seleccionó, como se muestra en la tabla 3.12, el integrado `MAX232ACWE`. El mismo realiza la adaptación de niveles de voltaje de hasta dos interfaces desde RS232 a TTL y viceversa. Como se analizará en el capítulo 5, este mecanismo nos permitirá implementar[20] una vía de comunicación entre una PC y el microcontrolador, lo que será de utilidad a la hora de realizar depuración del *software* que se implemente.

Para la comunicación entre el microcontrolador y el módulo GPS no fue necesario realizar ninguna adaptación de niveles de voltaje, ya que el módulo GPS utiliza niveles compatibles con CMOS.

[18] `www.farnell.com`.
[19] `www.digikey.com`.
[20] Cuando no se encuentre conectado el DUT a la respectiva UART del microcontrolador.

En el caso de la interfaz entre el microcontrolador y el PIC de la placa TELEMET, tenemos la misma situación que la del párrafo anterior.

3.7.2. Componentes varios.

Se efectuó la selección de resistencias, capacitores, inductancias y algún otro componente como transistores para el manejo de relés. Las funciones que cumplirán estos componentes van desde servir como *pull-ups* o desacople en el caso de resistencias y capacitores respectivamente, hasta funciones más específicas sugeridas en las notas de aplicaciones de los componentes como sensores, reguladores de voltaje o el propio microcontrolador. Algunas de estas sugerencias se dan por ejemplo a efectos de disminuir la circulación innecesaria de corriente por las pistas de alimentación del micro, y proporcionar de este modo una tensión lo menos ruidosa posible.

3.8. Batería.

En el momento de realizar la selección de la batería se tuvieron en cuenta las experiencias de proyectos similares que involucraran globos sonda y la experiencia de aficionados al aeromodelismo, cuyos criterios resultaban relevantes ya que deben enfrentar problemas asociados a eficiencia energética con respecto al peso, resistencia interna de la batería, capacidad de corriente, etc.

Los más importantes aspectos tenidos en cuenta a la hora de la selección de la batería son [Alo07]:

✍ **Tipo de Batería.** Los principales tipos de batería manejados en los ámbitos mencionados son los de *Níquel - Cadmio* (NiCd), *Níquel - Hidruro Metálico* (NiMH), *Ion de Litio* (Li - Ion), *Polímero de Litio* (Li - Po) y *Celdas Primarias de Litio* [Ur06].

La tabla 3.10 muestra un resumen de algunas características de los tipos de batería mencionados. A partir de ella se puede concluir que las baterías de Litio poseen mejores prestaciones comparadas a las de Níquel. Sin embargo y como es esperable, esto se traduce en un mayor costo de las primeras frente a las últimas. Comparando entre sí las baterías de Níquel[21] se puede agregar que [Alo07] las de NiMH pueden llegar a tener bastante más capacidad que las de NiCd, no emplean Cadmio (tóxico) y aparentemente son más resistentes a un mal uso[22].
Por otro lado poseen una mayor resistencia interna, lo que les quita oportunidades en aplicaciones de grandes consumos de corriente frente a las de NiCd. Adicionalmente presentan un mayor tiempo de carga.
Con respecto a las baterías de Li - Po, cabe señalar que su gran desventaja se da

[21] Más baratas.
[22] No pierden su capacidad debido al mal uso.

Tipo de Batería	NiCd	NiMH	Li - Ion	Li - Po
$\text{Energía}/\text{Peso}$ $[\text{Wh}/\text{kg}]$	40 - 60	30 - 80	130 - 200	160
$\text{Energía}/\text{Tamaño}$ $[\text{Wh}/\text{l}]$	50 150	140 - 300	300	270
$\text{Potencia}/\text{Peso}$ $[\text{W}/\text{kg}]$	150	250 - 1000	hasta 2800	1800
Eff de carga - descarga	70 % - 90 %	66 %	99.8 %	99.9 %
Tasa de auto - descarga	10 % / mes	30 % / mes	5 % / mes	5 % - 10 % / mes
# Ciclos carga - descarga	2000	500 - 1000	$>$ 1000	$\approx$1200
Voltaje nominal de celda	1.24 V	1.2 V	3.7 V	3.6 / 3.7 V

Tabla 3.10.: Resumen de las características de diferentes tipos de batería [Wiki].

alrededor de los cuidados que hay que tener en su manejo: carga, descarga, etc. Algunos de estos cuidados son [Alo07]:

♠ *Observaciones vistas para baterías de Li-Po:*

- Nunca cargarlas con un cargador diseñado para baterías de NiCd ni de NiMH.
- El voltaje nominal de las celdas de litio es de 3.7 V. No se debe permitir que se descarguen a menos de 3.0 V, ni que se carguen por encima de los 4.3 V. En caso de que la batería esté formada por n celdas, se multiplican los valores anteriores por n. Por ejemplo:
  - Para una batería de voltaje nominal igual a 11.1 V, es decir de 3 celdas serie, debe cumplirse: $9{,}0\,\text{V} \leq V_{Batería} \leq 12{,}9\,\text{V}$.
  - Para una batería de voltaje nominal igual a 14.8 V, es decir de 4 celdas serie, debe cumplirse $12\,\text{V} \leq V_{Batería} \leq 17{,}2\,\text{V}$.

De no cumplirse con estos cuidados, la batería puede explotar, perder vida útil o hasta experimentar el fenómeno de *inversión de polaridad* en algunas de sus celdas[a].

[a] Si se deja que la batería se descargue demasiado, el desapareo entre las capacidades (C, $[C]$= mAh) de cada una de las celdas que forman la batería lleva a que primero se descargue la más débil de ellas mientras las que todavía están cargadas hacen que circule corriente con la polaridad inversa por la celda más débil.

Finalmente, luego de la sugerencia realizada por José Luis Vila nos decantamos por la opción de las baterías de Li - Po, encontrando en un proveedor también sugerido por él dos modelos útiles, cuyas características se pueden observar en la tabla 3.11. Dada la poca diferencia en los precios y la mayor capacidad del modelo PM1263, seleccionamos

justamente este modelo[23]. La explicación para los voltajes nominales de 11.1 V se encuentra en el siguiente ítem de la lista.

Modelo	PM1262	PM1263
Voltaje	11.1 V	11.1 V
Capacidad	1600 mAh	2200 mAh
Descarga	15 C	10 C
Conectores	T	T
Tamaño	103mm×33mm×20mm	62mm×30mm×23mm
Peso	120 gramos	165 gramos
Precio	U$S 66,00	U$S 70,00

Tabla 3.11.: Resumen de características de los modelos de batería de Li - Po encontrados en plaza. Los detalles de la elección del voltaje nominal y capacidad de las mismas se explican en los párrafos siguientes.

✍ **Voltaje Nominal.** El nivel de voltaje mínimo aceptable para la batería estaría dado por la placa de reguladores. El voltaje nominal de la batería debe ser lo suficientemente alto como para que los reguladores tengan la posibilidad de producir el voltaje de salida más alto de todos los requeridos. En este caso el elemento que necesita el mayor nivel de tensión es el transmisor, el cual requiere de 8.0 V para su funcionamiento. Se debe tener en cuenta que según tipo de batería seleccionado serán los niveles de voltaje que se puedan adquirir en el mercado.

✍ **Capacidad.** Para la estimación de la capacidad requerida se debe tener una idea del consumo que presentará la carga útil *en su totalidad*. La tabla 3.12 provee una estimación que no tiene en cuenta uno de los elementos de mayor consumo, como lo es el transmisor. Por lo tanto, como una primera aproximación más rigurosa al consumo esperable y para comprobar que el modelo seleccionado tenía una capacidad aceptable, se decidió realizar el conexionado de todos los elementos de la carga útil del *globosat* disponibles al momento de la selección de la batería, y medir el consumo total.

El mismo se podía separar claramente en un consumo durante la transmisión de datos y otro en los momentos sin transmisión. Los consumos medidos se listan en la tabla 3.13 junto a la duración correspondiente. El consumo de 500 mA para los reguladores lineales con el `PTT ON` se debía a, como se indica en la sección 4.3, los efectos de la radio frecuencia sobre los reguladores switcheados que provocaban que el voltaje a su salida aumentara considerablemente, lo que a su vez provocó el

[23] 6 % más caro el modelo PM1263 frente al PM1262, y 38 % más capacidad del modelo PM1263 frente al PM1262.

Descripción	Nombre	Voltaje de Alimentación	Estimación de Consumo de Corriente	Descripción de la Estimación de Corriente
Microcontrolador	`ATMEGA2560`	5.0 V	200 mA	Corriente máxima permitida para los contactos `VCC` y `GND`
Sensor temperatura interna	`TMP 100`	5.0 V	70 μA	Corriente típica para una $f_{SCL} = 400kHz$
Amplificador termocupla	`AD594AQ`	$\pm$5,0 V	200 μA	Consumo máximo menor a 1 mW, alimentación de $\pm$5,0 V
Sensor humedad	`HIH-4031-001`	5,0 V	500 μA	Consumo máximo en el contacto `VCC`
Sensor presión	`ASCX15AN`	5,0 V	4 mA	Consumo máximo en reposo
GPS	`Lassen IQ`	3,3 V	27 mA	Requerimientos de alimentación del GPS
PIC de la Placa Telemet	`16F877A`	5,0 V	200 mA	$\frac{\text{Potencia disipada máxima}}{5.0\text{ V}}$
Transmisor	-	?	?	?
Memorias	`24FC512`	5,0 V	5 mA	Corriente típica de escritura @ $f_{SCL} = 400kHz$
Relés	`G6HK-2100 5 DC`	5,0 V	120 mA (40 mA $\times$ 3)	Consumo para la bobina de comando del relé
Interfaz RS232	`MAX232ACWE`	5,0 V	15 μA	Corriente típica para el contacto `VCC`.
		Total	**0.556 A**	$\sum estimaciones$ $\neq$ **Transmisor, Telemet**

Tabla 3.12.: Lista de componentes y sus respectivos voltajes de alimentación y corrientes consumidas. El transmisor no estaba determinado al momento de realizar la selección, sin embargo se sabía que su alimentación sería mayor de 5.0 V menor o igual a 12 V. Según esta estimación se concluye que como mínimo casi 0.6 A deben preverse para que sean entregados por las fuentes reguladas para independientemente del consumo del transmisor.

quemado del módulo GPS incrementando su consumo respecto al funcionamiento normal del mismo. Por lo tanto se decidió emplear para la estimación el consumo de los reguladores lineales durante la transmisión (274 mA), bajo la hipótesis de que el consumo de corriente con una placa de reguladores *switcheados* que no sufriera los efectos de la RF sería menor que el obtenido utilizando reguladores lineales (esto se cumple para los consumos sin transmisión - sin RF, en los que se puede ver que los reguladores *switcheados* consumen ***la mitad*** de la corriente que los lineales). Por lo tanto asumimos una cota de corriente consumida para los reguladores *switcheados* igual a la corriente consumida por los reguladores lineales.

	REGULADORES LINEALES		REGULADORES SWITCHEADOS	
	PTT ON	**PTT OFF**	**PTT ON**	**PTT OFF**
Consumo	274 mA	94 mA	500 mA (274 mA)	47 mA
Duración	3 s	(*)	3 s	(*)

Tabla 3.13.: Consumo medido para el sistema formado por: la primera placa de fuentes, el módulo GPS, la primera versión de la placa de telemetría y un transmisor modelo `TH-21AT` de KENWOOD. La señal `PTT` (*Push-To-Talk* o también *Press-To-Transmit*) controla los momentos en que se realiza la transmisión de los datos.
(*) - Tomado paramétrico para el estudio de la duración de la batería.

Para verificar que la capacidad de la batería seleccionada fuera suficiente se calculó el consumo de mA de un ciclo *transmisión - no transmisión*. Dividiendo la capacidad de la batería en mAh entre los mAh consumidos en cada uno de los ciclos antes mencionados obtenemos la cantidad de horas de vuelo que permitiría la batería:

$$\left(\frac{\text{Capacidad Batería}}{t_{TX} \times I_{Transmisión} + t_{sin\,TX} \times I_{Sin\,Transmisión}}\right)\left(t^{ciclo}_{TX+\text{No}\,TX}\right) \geq \Delta t_{VUELO} \tag{3.1}$$

En resumen, tomando un tiempo de duración de la transmisión igual a tres segundos[24], lo que se impuso fue:

$$\left(\frac{2200\,mAh}{3\,s \times I_{Transmisión} + t_{sin\,TX} \times I_{sin\,TX}}\right)(3\,s + t_{sin\,TX}) \geq \Delta t_{VUELO} \tag{3.2}$$

Con $I_{Transmisión}$, $I_{sin\,TX}$ y $t_{sin\,TX}$ de la tabla 3.13. Los resultados de la estimación para las horas de vuelo se ilustran en la figura 3.3.

[24] $t_{TX} = 3\,\text{s}$.

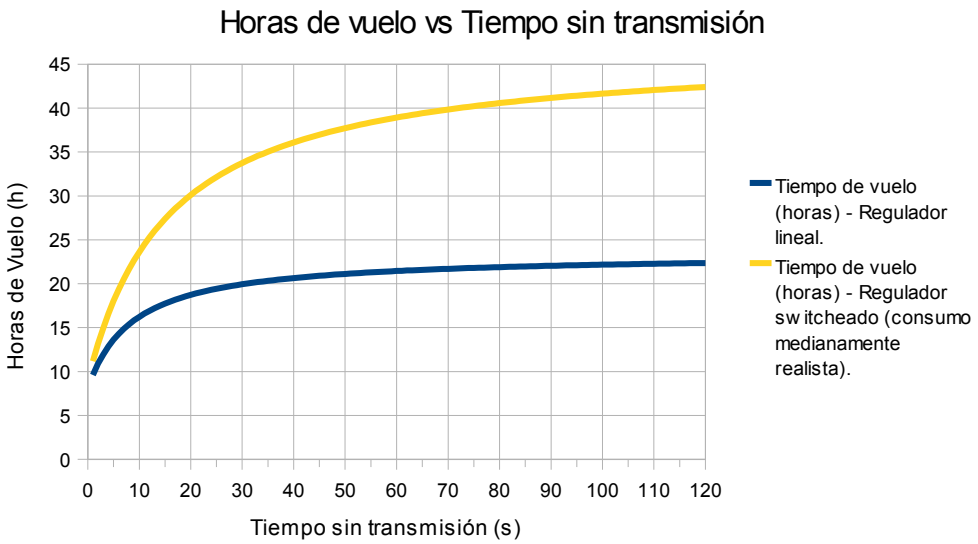


Figura 3.3.: Horas de vuelo en función del tiempo sin transmisión para las placas de fuentes con reguladores lineales y *switcheados*.

Es fácil ver que de acuerdo al modelo planteado en la ecuación 3.2, ***para tiempos entre transmisiones grandes, la cantidad de horas de vuelo está determinada básicamente por los consumos en los momentos sin transmisión***. Esto se puede ver en el comportamiento asintótico de las curvas para ambos reguladores. Para los ***reguladores lineales*** esta asíntota es de ***23.4 horas***, mientras que para los ***reguladores switcheados*** es de ***46.8 horas***[25].
Asimismo, se verifica para toda cantidad de segundos sin transmisión que las horas de vuelo que permiten los reguladores *switcheados* es superior a la de los reguladores lineales. Teniendo en cuenta que el consumo de los reguladores *switcheados* durante las transmisiones será inferior al supuesto, se confirmaría que la elección de los reguladores *switcheados* es una muy buena opción.

[25]Las asíntotas están dadas por $\frac{2200\,mAh}{I_{Sin\,TX}}$.

4. Placa de fuentes.

4.1. Diseño.

Como fue mencionado en la sección 3.6 el objetivo de esta placa es brindarnos una buena estabilidad en los voltajes de alimentación para el resto de los circuitos. Estos voltajes debido a la totalidad de componentes elegidos quedaron estandarizados en 5 V y 3,3 V. Se analizaron dos posibilidades para la implementación de las fuentes, la primera era utilizar reguladores lineales, y la segunda utilizar fuentes *switcheadas*.

Al ser el sistema alimentado a partir de una batería se debía lograr la mayor eficiencia en el consumo de la energía que esta nos puede brindar, esto nos inclinó por lo tanto a la utilización de las fuentes *switcheadas*, ya que presentan una mayor eficiencia. Otras características de este tipo de fuentes, que son convenientes para el sistema que se quiere implantar son, el aceptar un rango de voltajes amplio a su entrada, que en algunos casos este voltaje puede llegar a tener un valor menor al de la salida de la fuente, y a su vez, que la resistencia de salida es muy pequeña, pudiendo entregar picos de corriente sin afectar el voltaje.

El principal aspecto que jugaba a favor de la utilización de reguladores lineales es su extrema simplicidad, con lo cual se ahorraría en cantidad de componentes, tiempo, espacio y costo. Por otro lado, la peor característica que presentan este tipo de fuentes es su eficiencia, la cual depende directamente de la diferencia de voltajes entre la entrada y la salida y básicamente la potencia consumida por estos reguladores es la diferencia entre los mencionados voltajes multiplicado por la corriente que consume el circuito. Por lo tanto si el voltaje de entrada fuera 10 V y la salida de 5 V la potencia disipada por el regulador sería equivalente a la entregada al circuito que se está alimentando.

4.2. Primera versión.

Siguiendo la sugerencia de nuestro tutor nos inclinamos entonces por las fuentes *switcheadas*. Quien además nos sugirió que buscáramos los modelos de fuentes *switcheadas* dentro de los ofrecidos por el fabricante Linear Technology. Luego de haber estimado *grosso modo* el consumo del sistema y de saber que el rango de la batería a utilizar sería entre 10 V y 15 V se inició una búsqueda en la página del fabricante de la cual resultaron elegidos los dos *chips* siguientes `LT1767EMS8E-3.3`, `LT1767EMS8E-5`.La única diferencia entre estos dos modelos es el voltaje que los mismos son capaces de entregar a

la salida, estos son 3,3 y 5 V respectivamente. Estos dos *chips* eran convertidores DC-DC del tipo *step-down*.

Como se explicó en el capítulo 2 en un principio se pensaba incluir todos los diseños en un mismo PCB, idea que fue cambiando con la evolución del proyecto. Lo que impulsó la primera versión de una placa de fuentes separada del resto del diseño fue la realización de una primera liberación con el objetivo de testear el funcionamiento de lo que es el sistema de comunicación de datos, tanto de posición GPS como de los demás datos a ser relevados durante el vuelo, así como el funcionamiento de las propias fuentes.

En el diseño de esta primera versión de la placa de fuentes se incluyó además el GPS y el circuito liberador de la cápsula. El diseño del circuito de las fuentes fue tomado directamente de una de las aplicaciones de la hoja de datos de los mismos. En la realización del layout se tuvieron en cuenta las principales recomendaciones presentes en dicha documentación. Se debió realizar entonces una lista con todos los componentes necesarios para la implementación del circuito que fue hecha seleccionándolos en el distribuidor Digikey.

La fabricación de la placa se hizo utilizando el método de planchado de una impresión en toner sobre el cobre y la posterior eliminación del cobre no deseado utilizando percloruro de hierro. Una vez fabricado el PCB se soldaron los componentes y se procedió a testear el diseño. Primero se midieron los voltajes de salida en vacío verificando que los mismos fueran 3,3 V y 5 V. Ya verificado esto los mismos fueron observados en un osciloscopio, pudiéndose observar claramente el *ripple* en forma de onda triangular característico de los conversores DC-DC de este género.

Luego de corroborado el correcto funcionamiento de las fuentes, se realizó la interconexión de las mismas con el *hardware* diseñado por el grupo Teleglobosats y el transmisor que sería utilizado para la mencionada primer liberación. Fue durante las pruebas realizadas con este conjunto de circuitos que serían la carga útil del primer globo, cuando se percibió el recalentamiento excesivo del GPS, componente que acabó por quemarse. Las causas de este inconveniente serán explicitadas en la sección 4.3.

4.3. Problemas en el diseño original frente a la RF.

Inmediatamente percibido el problema mencionado al final de la sección 4.2 se buscó su causa, resultando ser ésta el brusco levantamiento del voltaje de salida de la fuente de 3,3 V cada vez que se transmitían datos. Esto nos condujo a la percepción de un problema que era realmente grave: los reguladores de voltaje se estaban viendo afectados por la radiofrecuencia, ya que también se pudo comprobar el mismo comportamiento en la fuente de 5 V.

En ese momento lo primero que se hizo fue buscar información sobre los efectos de la radiofrecuencia en circuitos eléctricos, especialmente si se habían detectado problemas similares con fuentes como las utilizadas. No se encontró documentación relacionada con

los efectos de la radiofrecuencia sobre reguladores *switcheados*, pero si una vasta cantidad de material sobre los efectos de este fenómeno sobre los circuitos en general.

Quedó en evidencia entonces la complejidad del tema, y luego de leer algunos documentos y hacer consultas a gente con mayor experiencia en el tema, se pusieron en consideración varias causas para el inconveniente sufrido. La primera, era la presencia en la implementación de las fuentes, de dos bobinas, una por fuente, de forma toroidal y de gran tamaño, las cuales podrían ver inducido en su núcleo flujos magnéticos debidos a la presencia de las ondas de radiofrecuencia, provocando así el efecto indeseado.

Otra posibilidad era la inducción de voltajes en las pistas, debido a las formas que se les había dado en el *layout*, provocando cambios en las referencias de los componentes, que se veían reflejados en la salida. Estos voltajes pueden ser inducidos debido a que la forma de las pistas puede presentar una impedancia muy alta a frecuencias altas, comportándose como inductancias.

Los efectos de las ondas electromagnéticas podían haber sido propagados tanto por el aire, como por las conexiones realizadas mediante cables, de forma directa en el caso del cable de alimentación conectado entre el transmisor y la batería, que también estaba conectado a la entrada de los reguladores, así como la conexión de tierra que era compartida por todos los circuitos. También las ondas pueden afectar los voltajes en cables utilizados como puentes en la placa los que funcionarían como antenas.

Sabido esto, lo se procedió a:

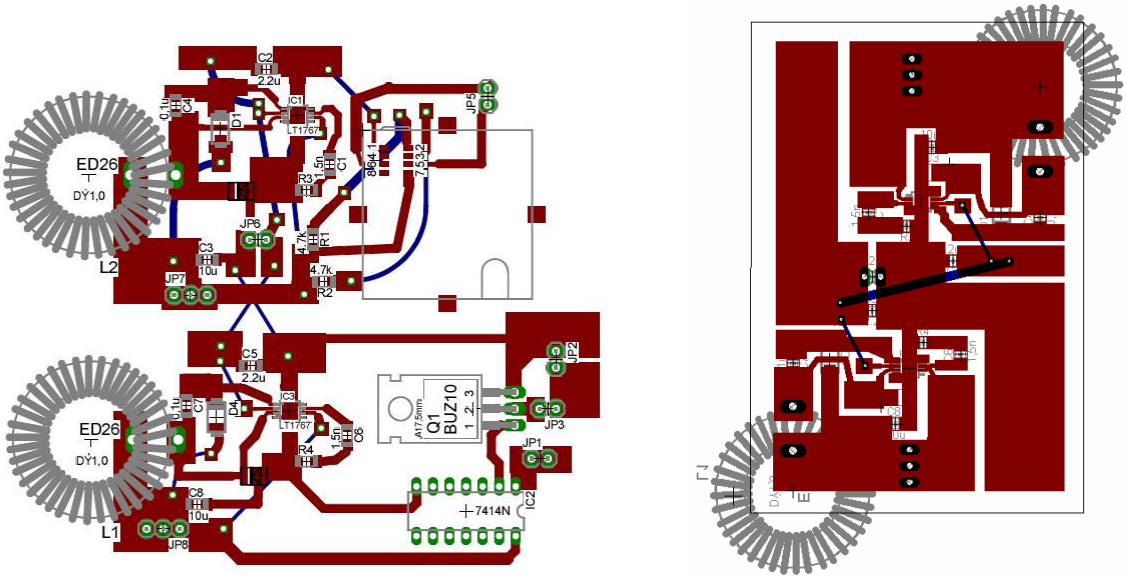
✍ **Blindar la placa de las fuentes.** El blindaje fue hecho con hojalata y con el mismo se buscaba atenuar el efecto sobre las bobinas y la inducción de voltajes en las pistas y puentes.

✍ **Acortar el cable de alimentación desde la batería,** ya que el mismo era de una longitud excesiva y de este modo podía provocar caídas de tensión inconvenientes.

Una vez construído el blindaje y acortados los cables, se probó nuevamente el funcionamiento de las fuentes y la reacción que estas tenían frente al RF, sin obtener resultados significativamente positivos.

Luego se decidió modificar el *layout* de la placa de forma de minimizar el recorrido de las pistas, evitando vueltas innecesarias y la utilización de cables como puentes entre señales. Estas placas también fueron fabricadas con el mismo método que las anteriores. Una vez que estuvieron prontas y luego de verificar los voltajes de salida se procedió a someterlas al efecto del transmisor.

Nuevamente se comprobó que los voltajes de salida se disparaban a valores entorno a los 7 V para las dos fuentes, sin alcanzar entonces ninguna mejora en el comportamiento del circuito. Finalmente se construyó un blindaje para estas placas y siendo *testeadas* de la misma forma, tampoco se consiguieron mejoras frente al efecto inducido por la radiofrecuencia.



(a) Primer diseño de la placa de fuentes, elaborado con motivo de la primera liberación.

(b) Segundo diseño de la placa de fuentes, elaborado con motivo de la primera liberación.

Figura 4.1.: Dos diseños de las placas de fuentes implementadas.

En la figura 4.1 se pueden comparar los diseños realizados para las dos placas de fuentes implementadas. La figura 4.1a muestra el primer diseño de la placa de fuentes implementada, la cual incluía además de las dos fuentes el GPS y el circuito quema tanza; mientras que en la figura 4.1b se puede observar el *layout* de la placa con los reguladores de voltaje realizada con el fin de mejorar el desempeño de la primera frente a los efectos de las ondas de radio frecuencia. Se puede observar la disminución de la cantidad de puentes, así como el mayor área de las pistas tratando de disminuir su impedancia.

♠ Una de la razones señaladas para la inducción del voltaje en las fuentes no pudo ser evitada: la *inclusión de las bobinas toroidales*, ya que no se contaba con otro tipo de bobinas para sustituirlas. *Es de importancia señalar esto ya que se cree que uno de los principales motivos del mal funcionamiento es justamente la presencia de estos componentes.*

Debido al fracaso de los dos diseños implementados, se decidió probar con una fuente de 3,8 V implementada con un regulador *switcheado* del mismo fabricante que las anteriores pero de otro modelo. Cuando se sometió este diseño[1] frente a las ondas electromagnéticas generadas por el transmisor, se observó que la fuente no sufría alteraciones en el voltaje de salida frente a este tipo de interferencia.

[1]Realizado por nuestro tutor.

♠ Como principales características que diferenciaban a esta fuente de las realizadas previamente, se puede señalar:

- Las mismas fueron fabricadas por un fabricante de PCBs.
- La ***bobina*** utilizada para su implementación era ***blindada***[a] .
- Contaba con un ***plano de tierra*** que aseguraba una buena referencia de potencial cero, además de utilizar otro modelo de regulador *switcheado*.

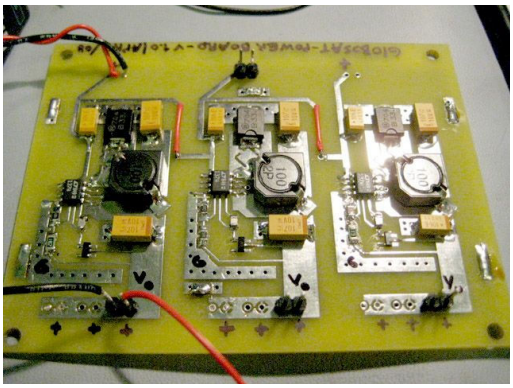
[a] O *shielded*.

4.4. Diseño final.

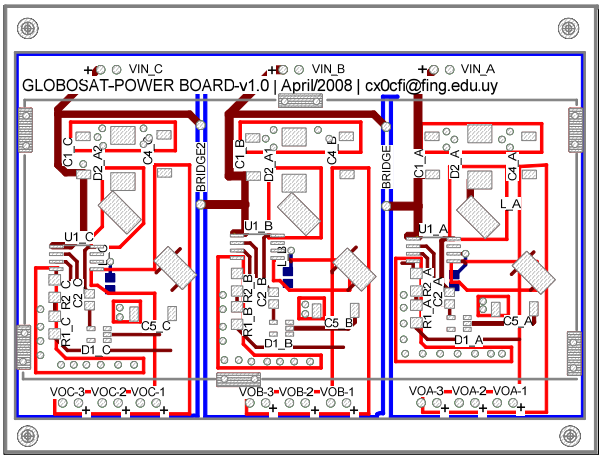
Como conclusión por lo tanto se decidió realizar una implementación lo más similar posible al diseño proporcionado por el tutor, adaptándolo a nuestras necesidades: básicamente la posibilidad de generar fuentes de 3,3 V , 5 V y 8 V. Luego de esto Sebastián Fernández nos proporcionó los archivos del esquemático y *board* que había generado con el *software* Eagle para su diseño, además de la lista de componentes que había utilizado. Tomando esto como base se generó el diseño de las placas de fuentes, con tres reguladores *switcheados*, cada uno de los cuales genera uno de los voltajes mencionados.

Una vez terminado este diseño utilizando componentes buscados en el distribuidor Farnell fue enviado al tutor quien decidió realizarle algunas modificaciones tanto al *layout* de la placa como a los componentes utilizados de forma de mejorar el rendimiento de la misma, y optimizar su costo.

El diseño final que se decidió fabricar puede ser observado la figuras 4.2a y 4.2b.



(a) Imagen de la Power Board de la que se dispone actualmente.



(b) *Layout* de la Power Board de la que se dispone actualmente.

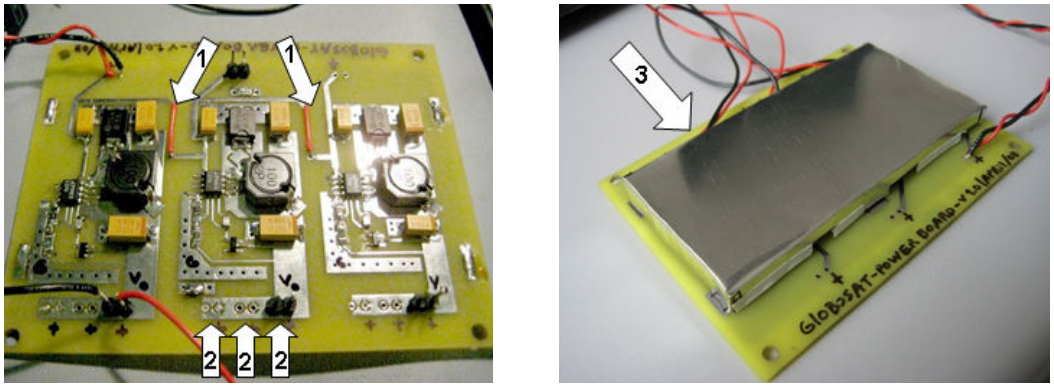
Figura 4.2.: Último diseño fabricado para la Power Board.

Variables	3.3V @ 15.3 Ω	5V @ 15.3 Ω	8V @ 15.3 Ω	3.3V @ 10 Ω
I_{in}	110 mA	210 mA	500 mA	170 mA
V_{out}	3.36 V	5.08 V	8.1 V	3.36 V
I_{out}	220 mA	330 mA	540 mA	360 mA
Eff	**62 %**	**73 %**	**79 %**	**65 %**
Eff^{*}_{Lin}	**31 %**	**46 %**	**73 %**	**31 %**

Tabla 4.1.: Ensayos realizados por Sebastián Fernández en Grenoble sobre la placa de Fuentes. Los ensayos fueron realizados en las condiciones de un voltaje fijo de entrada igual a 11 V y una carga variable que se lista en las columnas 2 a 5. La eficiencia está calculada como $\frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$.
* Eficiencia teórica de un regulador lineal en las mismas condiciones.

Variables	Fuente de 3.3 V	Fuente de 5.0 V	Fuente de 8.0 V
I_{out}	340 mA	530 mA	860 mA
V_{out}	3.33 V	5.06 V	8.1 V
Ripple	< 50 mV		

Tabla 4.2.: Estudio del *ripple* para la placa de fuentes en las condiciones de prueba $V_{in} = 10\,V$ y resistencia de carga de 10 Ω. El ancho de banda del canal del osciloscopio era de 150 MHz.



(a) (b)

Figura 4.3.: Consideraciones de uso de la Power Board.

4.5. Consideraciones de uso.

Actualmente en la entrada de los conversores DC-DC hay condensadores de 20 μF y 25 V, por lo tanto se recomienda colocar voltajes de entrada que como máximo lleguen a los 12 V. Los conversores pueden independizarse, admitiendo diferentes voltajes de entrada. Si se quiere alimentar de forma independiente, cada uno de los conversores, es posible hacerlo quitándole los puentes que existen entre ellos. Estos puentes son los cables rojos que se observan en la figura 4.3a, señalados por las flechas 1.

Cada fuente, como se puede ver en la figura 4.3a posee 3 pares de conectores con $\texttt{V}_{\texttt{out}}$ y GND. Actualmente las fuentes están ajustadas para los siguientes voltajes regulados de salida[2]: 3,3 V, 5 V y 8 V.

Como ya se mencionó, debido a todos los inconvenientes encontrados en las fuentes anteriores, podemos ver en la figura 4.3b el blindaje que se le realizó a la placa.

♠ *El blindaje se encuentra conectado a tierra.* Por lo tanto se debe tener mucho cuidado al manipular los cables para la alimentación de las fuentes y los voltajes de salida de forma de no cortocircuitarlos con el blindaje.

Las placas diseñadas fueron ensayadas por Sebastián Fernández en Grenoble. Los resultados de los ensayos se listan en las tablas 4.1 y 4.2.

[2]Voltajes de salida, de izquierda a derecha en la figura 4.3a.

Posteriormente a las pruebas realizadas en FRANCIA las placas fueron enviadas a URUGUAY de forma que pudieran ser testeadas frente a transmisores. Estas pruebas mostraron comportamientos acordes a lo esperado.

4.6. Cambios para la siguiente versión.

Los cambios para la siguiente versión son muy pocos. En primer lugar se le agrego una resistencia de 4,7 kΩ en serie con el capacitor de 1,5 nF para darle una mayor estabilidad a la fuente y una mejor compensación en frecuencia. También se cambiaron los encapsulados de las resistencias pertenecientes a los divisores resistivos. Éstas eran del tipo `0806` y para estandarizar todas las resistencias utilizadas en todas las placas se decidió seleccionar todos los encapsulados del tipo `1206`.

5. Placa *Main*.

5.1. Objetivos.

Lo que se buscaba lograr con la implementación de este diseño es una plataforma para *globosats* capaz de monitorear los experimentos que se llevarían acabo. El diseño será capaz de monitorear las condiciones ambientales en que los mismos transcurren y a partir de los datos generar la trama a ser transmitida.

Los criterios utilizados para la elección de los principales componentes que en un principio integran este circuito fueron mencionados en la sección 3 y en caso de posibles modificaciones de estos para la siguiente versión, se harán referencia en la sección 5.7.

5.2. Características - Requerimientos.

Dentro de las características deseadas se buscaba realizar un diseño que fuera robusto y de dimensiones lo más pequeñas posibles dadas las condiciones austeras a las que iba a ser sometido durante la realización de las liberaciones y el espacio reducido con el que se contaba adentro de la cápsula.

Las funcionalidades que debía cumplir esta placa eran: realizar la adquisición de datos, monitoreo del experimento que se llevara a cabo, armado de las tramas a ser transmitidas y envío de las mismas a la placa de telemetría, recepción de los datos de GPS y ejecución del plan de vuelo según los datos recabados. Para cumplir con estas funcionalidades, en el diseño de la placa serían incluídos todos los sensores, el microcontrolador, un banco de memorias utilizado como caja negra y relés para la activación y desactivación de algunos de los circuitos y componentes incluídos en la carga.

La adquisición de datos, se refiere a la obtención de muestras de los datos proporcionados por los sensores, cuya frecuencia sería determinada luego en la implementación del la rutina principal a ser cargada en el micro. En el caso de los sensores analógicos se debe leer el valor del voltaje a la entrada del ADC y luego realizar la conversión del mismo a las unidades correspondientes a la lectura realizada.

El monitoreo del experimento que se lleva acabo se realizaría mediante una interfaz serie RS232 a través de un protocolo establecido que puede variar según cuál sea el DUT. Por lo tanto la plataforma puede adaptarse fácilmente a diferentes tipos de experimentos, siempre y cuando el dispositivo a ser testeado cuente con una interfaz del tipo mencionado.

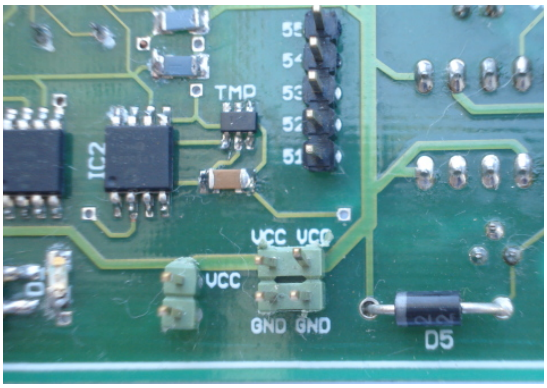
La recepción de los datos de GPS es un punto clave y muy importante, ya que estos datos que serán transmitidos a la base terrestre son necesarios para el seguimiento de la carga útil así como para su posterior ubicación. La interfaz de este tipo de dispositivos también es serial RS232. Los datos obtenidos del GPS además de ser transmitidos a tierra son muy importantes para la ejecución del plan de vuelo, el cuál debe entre otras cosas monitorear y administrar la carga de la batería desactivando circuitos mediantes los relés, y liberar la carga en caso de que la misma se salga de un perímetro preestablecido activando el circuito encargado de desacoplar la carga.

5.3. Diseño primera versión.

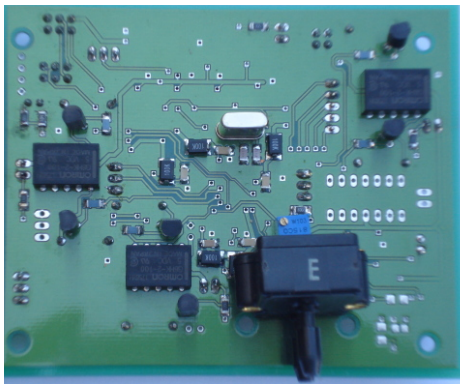
5.3.1. Alimentación.

La alimentación de la placa será conectada a la Power Board, a la salida de 5 V de la última. Se buscó uniformizar los voltajes en la placa y se logró la utilización de un único voltaje de alimentación del valor mencionado. Esta posibilidad y su determinación surgieron del estudio de las diferentes posibilidades de conexión de los componentes, especialmente los sensores analógicos. La discusión sobre las variantes analizadas se describe posteriormente.

Se buscó realizar la distribución del voltaje de alimentación mediante pistas lo más anchas posibles, mientras que la tierra es distribuida mediante un plano de tierra del lado inferior, tratando de disminuir al máximo la impedancia vista por las corrientes de retorno.



(a) Voltajes de alimentación. Se pueden apreciar los pines de conexión (etiquetados como `VCC` y `GND`), y el mayor grosor de las pistas de alimentación respecto a las pistas de señales.



(b) Plano de tierra de la Main Board.

Figura 5.1.: Alimentación de Main Board.

En las figuras 5.1a y 5.1b se pueden apreciar las pistas de distribución del voltaje de alimentación y el plano de tierra de la Main Board, respectivamente.

5.3.2. Interfaces de comunicación y conexión de dispositivos.

5.3.2.1. Interfaces RS232.

Con respecto a la comunicación con los diferentes dispositivos se dejaron disponibles tres interfaces del tipo serie RS232, las cuales serán utilizadas para cumplir con las funcionalidades anteriormente mencionadas en la sección 5.2.

Quedaron disponibles para la interconexión con el GPS y la placa de telemetría las señales de `Tx` y `Rx` con niveles entre 0 V y 5 V y un *pin* adicional de referencia a tierra, mientras que para la comunicación con el DUT se colocó un `MAX232` de forma de disponer de las dos señales en nivel TTL.

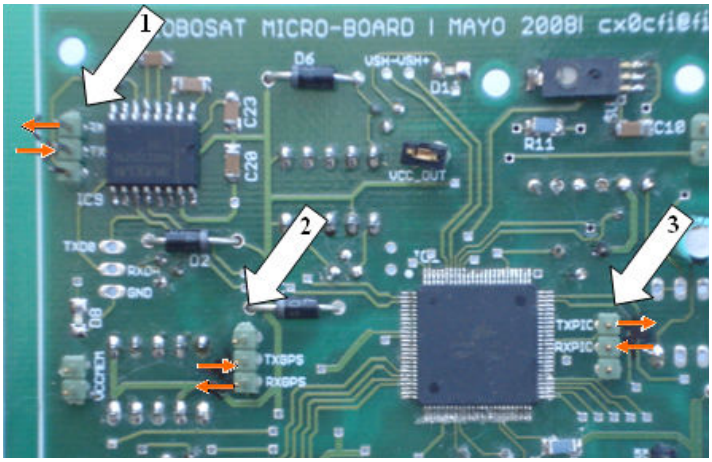


Figura 5.2.: Interfaces RS232 de la Main Board. Para evitar ambigüedades con las denominaciones `TX` y `RX`, las flechas rojas indican entrada o salida de datos hacia o desde la Main Board.

En la figura 5.2 se señalan las interfaces RS232 de la Main Board. Las mismas están etiquetadas de acuerdo a:

✍ **«1»** UART comunicada a la placa del DUT.

✍ **«2»** UART dedicada al GPS.

✍ **«3»** UART dedicada al PIC.

Por detalles sobre el conexionado referirse al anexo H y a la tabla B.1 del anexo B.

5.3.2.2. Interfaz SPI - Programación.

También se dejo disponible la interfaz SPI del procesador tanto para la programación del mismo como para la comunicación con la placa anti *latchup* en la cual se encuentra un DAC cuyo valor a la salida se escribe mediante esta interfaz. Debido a que son compartidos algunos de los *pines* de esta interfaz por estos dos dispositivos se colocó un *jumper* para conectar las señales de la interfaz SPI del `ATmega2560` a las señales que provienen del programador o a las señales del DAC.

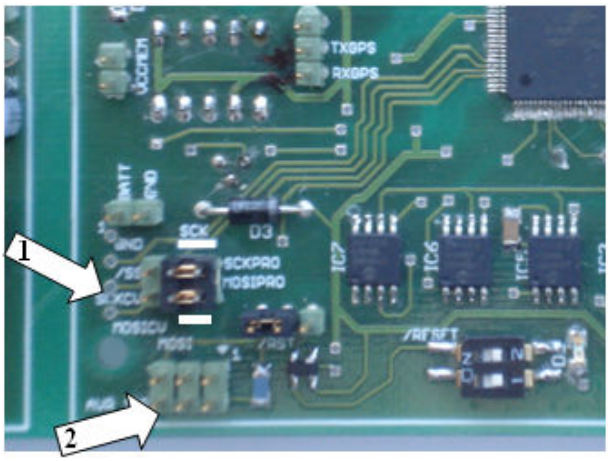


Figura 5.3.: Pines de programación del `ATmega2560` - interfaz SPI.

La disposición de los contactos en la Main Board fabricada se puede observar en la figura 5.3. Se etiquetan mediante flechas numeradas:

- ✍ **«1»** *Pines* destinados al bus SPI. Si se deseara utilizar el *bus* SPI se deben colocar los *jumpers* hacia la izquierda, mientras que para realizar la programación del microcontrolador se deben colocar los *jumpers* hacia la derecha.
- ✍ **«2»** *Pines* destinados a la conexión del programador. El contacto alineado con la muesca del zócalo del programador está etiquetado el la placa mediante un « ▼1».

Por detalles sobre el conexionado referirse al anexo H y a la tabla B.1 del anexo B.

5.3.2.3. Interfaz Two - Wire.

La interfaz *Two - Wire* fue utilizada para la conexión del micro con cuatro memorias EEPROM de 512 Kbits en las cuales se pretende guardar los datos recabados del experimento en transcurso, y en el caso en que fallaran las comunicaciones poder contar con

dichos datos, inclusive si se recupera el sistema después que este se quedara sin energía por el agotamiento de la batería.

Además de las memorias se conectó a la interfaz *Two - Wire* un sensor de temperatura, modelo `TMP 100`, el cual proveerá al sistema la información sobre la temperatura interna de la cápsula. Esta interfaz no se dejó disponible a través de *pines* ya que la misma no será utilizada por ningún dispositivo externo.

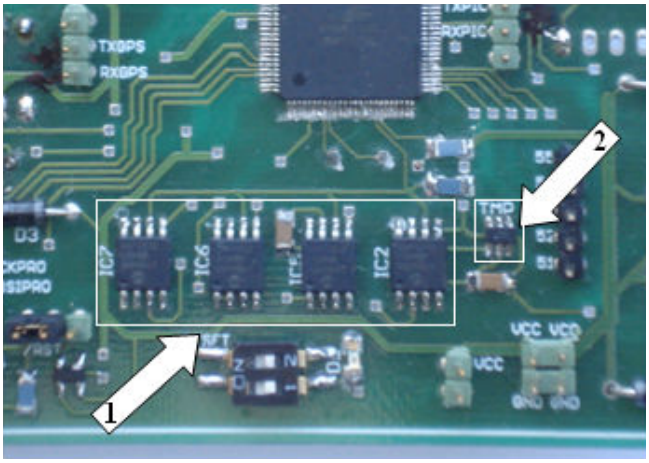


Figura 5.4.: Memorias EEPROM I²C y sensor de temperatura interior `TMP 100`, colgados como esclavos del *bus Two - Wire*.

En la figura 5.4 se pueden ver las memorias y el sensor de temperatura, colgados como esclavos en el *bus Two - Wire*.

Se etiquetan como:

✍ **«1»** Memorias I²C.

✍ **«2»** Sensor de temperatura interna `TMP 100`.

Por detalles sobre el conexionado referirse al anexo H y a la tabla B.1 del anexo B.

♠ **Sobre la selección para los valores de las resistencias de *pull - up* para las señales `SDA` y `SCL` del protocolo *Two - Wire* [Atmel]:**

Condición	Mín	Máx	Unidad
$f_{SCL} \leq 100\,\text{kHz}$	$\frac{V_{CC}-0{,}4\,\text{V}}{3\,\text{mA}}$	$\frac{1000\,\text{ns}}{C_b}$	Ω
$f_{SCL} > 100\,\text{kHz}$	$\frac{V_{CC}-0{,}4\,\text{V}}{3\,\text{mA}}$	$\frac{300\,\text{ns}}{C_b}$	Ω

C_b = Capacidad de la línea para ese contacto.

♠ La capacidad total (esto es, la sumatoria de las capacidades de cada uno de los dispositivos) que «*se cuelgue*» de cada línea del *bus* deberá ser menor de 400 pF [Atmel].

5.3.2.4. I / O General.

Para conexiones externas de señales digitales entre 0 V y 5 V con cualquier propósito que no hubiese sido previsto se cuenta con cinco *pines* generales de I / O . Como se busca la mayor flexibilidad de diseño posible sería deseable poder haber dejado disponible la mayor cantidad posible de *pines*, pero en este caso nos vimos limitados por el espacio disponible para la implementación del diseño. Los *pines* del micro disponibles son: PG0, PG1, PC0, PC1 y PC2.

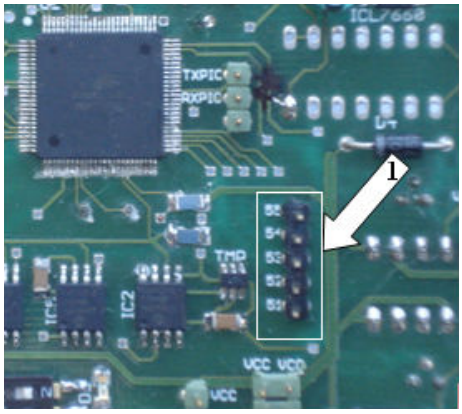


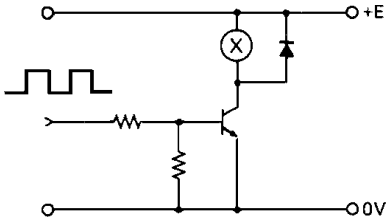
Figura 5.5.: Pinos de entrada - salida de propósito general.

En la figura 5.5 se señalan los contactos de entrada - salida de propósito general disponibles en el diseño de la Main Board con el que se cuenta en la actualidad.

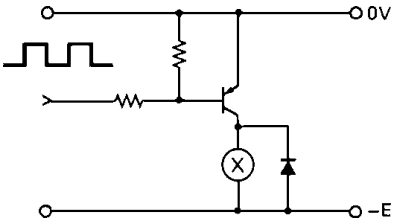
Por detalles sobre el conexionado referirse al anexo H y a la tabla B.1 del anexo B.

5.3.3. Relés para conexión y desconexión de módulos.

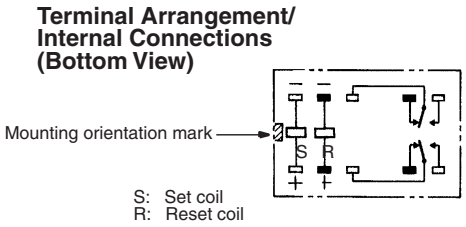
Fueron integrados al diseño tres relés que estarán encargados de energizar y des - energizar los sensores, las memorias y el DUT en los casos en que sea requerido de forma de ahorrar en el consumo de energía. Cada uno de los relés está asociado a un led que indica la presencia de energía a la salida de los mismos. Este *led* puede ser conectado o desconectado mediante un *jumper*, evitando el consumo de energía innecesario durante el vuelo, en el cual la información proporcionada por los *leds* no es útil.



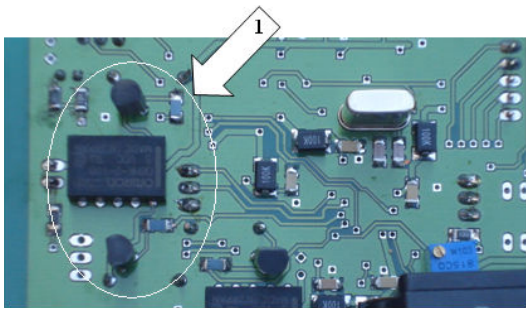
(a) Transistor NPN.



(b) Transistor PNP.



(c) *Pinout* de los relés del tipo *double - winding latching*.



(d) Imagen de uno de los relés de la Main Board.

Figura 5.6.: Manejo de relés mediante transistores [OmTI]: 5.6a mediante un transistor NPN, y 5.6b mediante un transistor PNP. Es importante recordar que los relés seleccionados poseen dos bobinas de control: una de `set` y otra de `reset`, como se muestra en la figura 5.6c. Se deberá utilizar un esquema como el de las figuras 5.6a o 5.6b por cada bobinado. En la figura 5.6d se puede ver uno de los relés de la Main Board.

El comando de los relés se realiza mediante un contacto de I / O del micro el cual a su vez actúa sobre la base de un transistor BJT el cual fuerza el pulso de corriente necesario para energizar una de las bobinas del relé provocando el cambio de estado de los contactos del mismo (`Set` o `Reset`). Esto se puede observar en la figura 5.6.

Por detalles sobre el conexionado referirse al anexo H y a la tabla B.1 del anexo B.

5.3.4. Conexionado del Reset.

Para realizar el *reset* del microprocesador se utilizará un *switch* con el cual se podrá provocar un pulso a cero en la entrada del manejador de *reset*. El cual es el encargado de generar la señal de `reset` de entrada al microcontrolador sin rebotes y de ancho adecuado. Este *chip* generador de reset es el modelo `MAX811` y es recomendado su uso para la correcta generación de pulsos de `reset`.

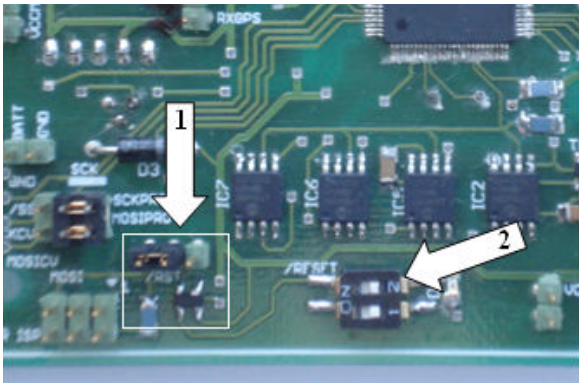


Figura 5.7.: Mecanismo de `reset` del microcontrolador. (1) *Chip* generador de *reset* y *jumper* que selecciona entre el *reset* del programador y el *reset* del *switch*. (2) Se empleó un *switch* en lugar de un pulsador para evitar *resets* involuntarios.

En la figura 5.7 se puede observar el mecanismo de reset de la Main Board.

Debido a que el programador del `ATMEGA2560` actúa sobre la señal de `reset` del micro se instaló un jumper que hace un puente entre la señal que proviene del `MAX811` y la señal de `reset` del programador, para seleccionar cual de estas señales es conectada a la entrada `reset` del microcontrolador.

5.3.5. Consideraciones sobre la configuración del los canales del ADC del microcontrolador.

Antes de describir los circuitos diseñados para la conexión de los sensores analógicos a los distintos canales del conversor analógico digital del microcontrolador debemos realizar un estudio sobre las variaciones que nos permite dicho conversor.

El voltaje de referencia elegido para la conversión de los distintos voltajes puede ser elegido de cuatro opciones distintas, pero con varias restricciones en cada caso. Las

cuatro opciones para la conexión del voltaje de referencia son: `AVCC`, `AREF` (conectados a *pines* del micro) y dos voltajes internos de 1,1 V y 2,56 V. El voltaje `AVCC` esta ligado directamente al voltaje de alimentación del microcontrolador, siendo que su valor queda restringido al rango $[(\texttt{VCC} - 0{,}3\,\text{V})\,;(\texttt{VCC} + 0{,}3\,\text{V})]$.

A su vez, el voltaje `AREF` también presenta restricciones en su valor, las cuales son distintas si el canal utilizado es *single ended* o diferencial:

✍ ***Single ended:*** `AREF` debe estar comprendido entre 1 V y `AVCC`.

✍ **Diferencial:** el rango para `AREF` se reduce a $[2{,}7\,\text{V}; (\texttt{AVCC} - 0{,}5\,\text{V})]$.

♠ También es muy importante señalar que si se realiza la opción de utilizar un voltaje externo conectado a `VREF` no podrá ser utilizado en ningún momento y para ninguno de los canales del ADC otro de los voltajes disponibles (`AVCC`, 1,1 V o 2,56 V) ya que **esto provoca un cortocircuito entre el voltaje seleccionado y `VREF`**. Esto se puede observar en la figura 5.8.

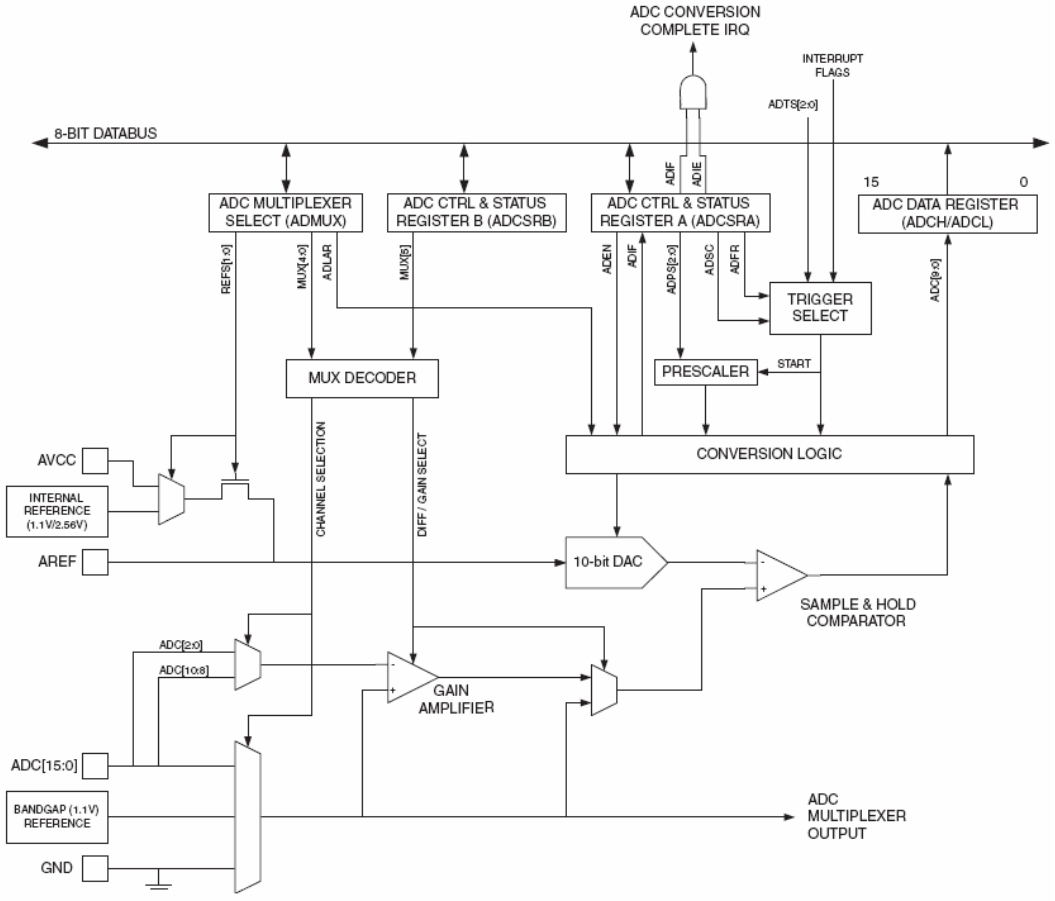


Figura 5.8.: Diagrama de bloques de la estructura del ADC del `ATmega2560` [Atmel].

Finalmente, tomando en cuenta todas estas consideraciones y además las impuestas por los sensores, las cuales serán analizadas en las respectivas secciones dedicadas a los mismos, se decidió que el único voltaje de referencia que sería utilizado sería `AVCC`, y que este sería conectado además a través de un filtro al voltaje de alimentación de la placa de 5 V.

5.3.6. Medición de temperatura externa.

Para la medición de la temperatura externa se planteó el uso de una termocupla tipo J. Dado que sería poco práctico realizar una conversión numérica directamente con la tensión proporcionada por la termocupla, se emplea el amplificador `AD594`, de Analog Devices, el cual amplifica la tensión aportada por la termocupla, realiza la compensación de punta fría, y posteriormente amplifica nuevamente este voltaje "*compensado*".

Según la hoja de datos del `AD594` [AD99], para el rango de temperaturas externas esperadas, que admitiendo un buen margen podría abarcar desde -100 ºC hasta 50 ºC, el amplificador tiene una salida comprendida entre $-893\,\text{mV}$ y $503\,\text{mV}$.

5.3.7. Consideraciones sobre la resolución en la medida de la temperatura externa.

Según las especificaciones del integrado `AD594`, éste presenta una sensibilidad de $10\,^{\text{mV}}/_{^{\text{o}}\text{C}}$. Por lo tanto si queremos discernir al menos $1\,^{\text{o}}\text{C}$ y la conversión se realiza utilizando un **canal diferencial** del ADC se debe cumplir la inecuación 5.1:

$$2\frac{V_{REF}/GAIN}{2^N} \leq 10\,\text{mV} \tag{5.1}$$

siendo N el numero de *bits* de la conversión y $GAIN$ la ganancia del canal.

La inecuación 5.1 implica que el valor en volts del LSB de la conversión debe ser menor al mínimo voltaje que se quiere distinguir, proporcional a la mínima resolución deseada en grados centígrados.

El mínimo valor en volts que puede tomar el LSB se calcula de la siguiente forma:

- El rango de voltajes para el canal diferencial es [Atmel]: $\left[\frac{V_{REF}}{GAIN}; -\frac{V_{REF}}{GAIN}\right]$, resultando entonces que el voltaje en valor absoluto puede variar entre $\left[0; 2\frac{V_{REF}}{GAIN}\right]$.
- Por lo tanto para saber el valor en volts del LSB se debe dividir esta cantidad entre 2^N, siendo N la cantidad de *bits* utilizada en la conversión y consecuentemente 2^N la cantidad de valores que el ADC puede dar a la salida.

- Para el posterior cálculo se debe tener en cuenta que si $GAIN = 1$ ó 10 entonces $N = 8$ *bits*, en cambio si $GAIN = 200$ entonces $N = 7$ *bits* [Atmel].

En forma similar se puede realizar un análisis para el caso en que se utiliza un canal del ADC en modo *single ended*. Para esta situación el rango de voltajes a la entrada será $[V_{REF}; \texttt{GND}]$, mientras que el valor de la ganancia es fijo e igual a la unidad y la cantidad N de *bits* utilizada para la conversión es 10. En conclusión, la inecuación equivalente a la 5.1, pero para un canal *single ended* es:

$$\frac{V_{REF} - \texttt{GND}}{2^{10}} \leq 10\,\text{mV} \tag{5.2}$$

El análisis realizado en esta sección y secciones posteriores fue tomado en cuenta a la hora de determinar el valor de los parámetros que se debían configurar y asignar para el correcto funcionamiento y el aprovechamiento óptimo de las características del ADC.

5.3.8. Primer Diseño del circuito para medición de temperatura externa.

En la medición de la temperatura externa, se presentaba una situación complicada, dado el rango de temperaturas que se desea medir y la resolución que se desea obtener. Recordemos que para obtener una resolución de 1 ºC, se debe poder detectar una tensión menor de 10 mV. Luego de analizar varias posibles soluciones, se concluyó que era muy dificultoso lograr la resolución pretendida y abarcar todo el rango de tensiones de salida del amplificador al mismo tiempo empleando un solo canal.

La solución adoptada consiste en separar las temperaturas correspondientes a salidas del `AD594` negativas de las positivas. La salida del `AD594` se introduce luego de ser ajustada por una cierta ganancia a un canal *single ended* y de este modo sirve para medir temperaturas que produzcan salidas positivas del `AD594`. A su vez, la salida del `AD594` se amplifica e invierte para luego ser introducida a otro canal *single ended* y permitir la medida de temperaturas que produzcan salidas negativas del `AD594`.

En la sección 5.5 se trata la implementación de este diseño así como los motivos que hacen que el mismo sea ***erróneo***.

5.3.9. Características del sensor de presión.

Las presiones absolutas que se deberán poder medir van desde la presión atmosférica en el momento del lanzamiento hasta presiones muy pequeñas en el momento de la explosión del globo.

Como se mencionó en la sección 3.2.3 el sensor finalmente elegido es el `ASCX15AN` de Honeywell. Este sensor se alimenta con 5 V y consume una corriente de reposo máxima de 4 mA, lo cual representa 20 mW de consumo. Este sensor tiene un rango de medida de presiones que va desde 0 a 15 PSI, es decir, de 0 a 1034,205 hPa. Dicho rango abarca de forma sensata todas las presiones de interés. La sensibilidad es de 0,3 V/psi, es decir 4,35 mV/hPa. El *full – scale span* típico es de 4,5 V.

5.3.10. Características del sensor de humedad.

El sensor elegido para la medición de la humedad es el HIH-4031 de HONEYWELL, el mismo es capaz de medir humedades en todo el rango que se deseaba medir. Este sensor es alimentado con 5 V y consume una corriente típica de 200 μA, representando un consumo de 1 mW. El rango de voltajes a la salida está comprendido entre 0,8 V y 4,0 V, siendo bastante lineal la relación entre la humedad relativa y el voltaje de salida.

5.3.11. Determinación del Vcc y la tensión de referencia para el ADC.

A partir de todas las características y consideraciones realizadas en las secciones anteriores fue realizado el proceso de selección de los voltajes VCC y AVCC, voltajes de referencia para los canales del ADC que serían utilizados. Los criterios de las determinaciones se exponen a continuación.

Teniendo en cuenta el voltaje de alimentación y el *full – scale span* tanto para el sensor de presión como para el sensor de humedad, queda descartada por razones de aprovechamiento del rango de entrada del ADC , una tensión de alimentación de 3,3 V para el ATmega2560. Por lo tanto la tensión a utilizar para alimentar el microcontrolador será:

$$\texttt{VCC} = 5\,\text{V} \tag{5.3}$$

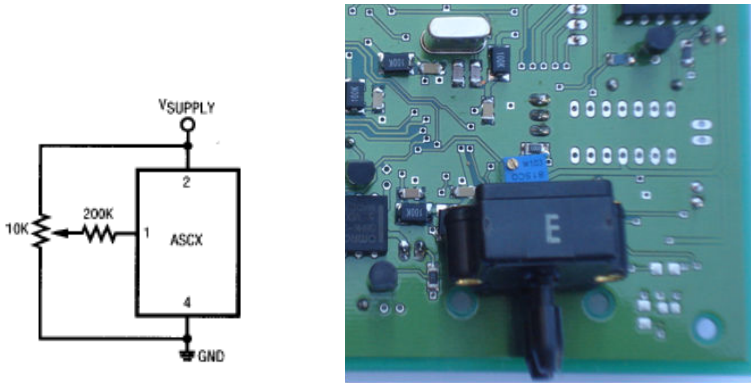
En principio la tensión de referencia para realizar la conversión analógico – digital no tiene que ser la misma para todos los sensores. Ésta se puede cambiar de una medida para otra. De este modo, se podría seleccionar una tensión de referencia V_{REF1} para realizar la medida de la magnitud 1, posteriormente seleccionar la tensión de referencia V_{REF2} y efectuar la medida de la magnitud 2, etc. Sin embargo, la tensión de referencia seleccionada para la medida de la temperatura externa y la presión será la tensión presente en el contacto AVCC, que por restricciones antes mencionadas será igual a VCC, es decir:

$$\texttt{VREF} = \texttt{AVCC} = \texttt{VCC} = 5{,}0\,\text{V} \tag{5.4}$$

5.3.12. Características de la medida de presión.

La salida del sensor de presión se conectará directamente a un canal *single ended*. Como ya se mencionó, la referencia estará situada en 5,0 V.

De este modo, el rango de voltajes de entrada para el conversor será de 0 V a 5,0 V. En este modo de operación, la cantidad de *bits* disponibles es de 10. Por lo tanto, un LSB correspondería a $\frac{5\,\text{V}}{2^{10}} = 4{,}88\,\text{mV}$. Esos 4.88 mV equivalen, de acuerdo a la sensibilidad del sensor, a 1,12 hPa.



(a) (b)

Figura 5.9.: Sistema de medida de presión de la Main Board. 5.9a - Circuito de regulación del *offset* implementado en la Main Board y 5.9b - Imagen del sensor de presión en la Main Board.

En la figura 5.9b se puede apreciar el sistema de medida de presión implementado en la placa Main, mientras que en la figura 5.9a se observa el esquemático del circuito de regulación de *offset*.

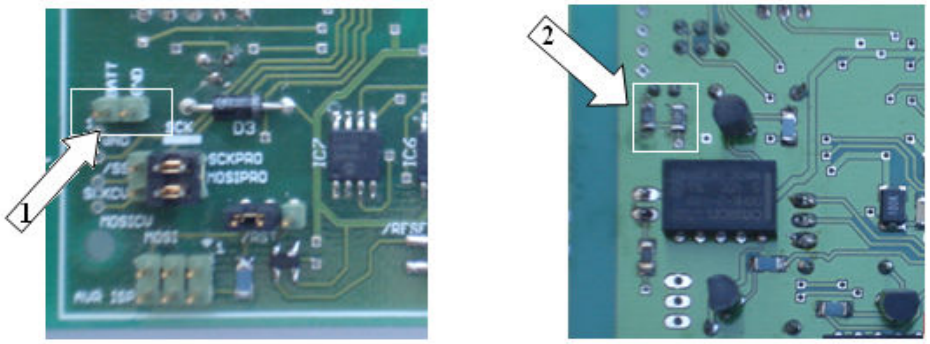
Por detalles sobre el conexionado referirse al anexo H y a la tabla B.1 del anexo B.

5.3.13. Monitor de batería.

Para monitorear el estado de la batería se utilizarán dos formas:

✍ **Medición del voltaje de la batería.** Consiste en un divisor de voltaje el que escala directamente el voltaje de la batería de forma que se pueda conocer una referencia directa al mismo. Este voltaje está conectado a uno de los canales del conversor analógico digital que posee el microcontrolador, a partir de este valor podrán tomarse decisiones sobre la conexión y desconexión de módulos del sistema, utilizando los relés, de forma de disminuir el consumo general.

✍ **Medición de la carga consumida por el sistema.** Como se mencionará en el capítulo 8, en la placa de *latchup* existe un voltaje proporcional a la corriente consumida por el circuito en cada momento. Este voltaje estará disponible en la placa y será muestreado utilizando el conversor A/D del micro. Las muestras serán tomadas con cierto período de muestreo a determinar y luego de integradas y reescaladas por *software* será posible tener una estimación del valor de la carga consumida a la batería, valor que también será útil para tomar decisiones sobre el consumo del sistema.



(a) Vista superior. Se etiquetan con «1» los pinos de conexión de la batería.

(b) Vista inferior. Se aprecian etiquetados con «2» las dos resistencias del divisor y la parte de abajo de los pinos de conexión de la batería.

Figura 5.10.: Monitor de batería de la placa Main.

En la figura 5.10 se puede observar el sistema de monitoreo de la batería implementado en la placa Main.

Por detalles sobre el conexionado referirse al anexo H y a la tabla B.1 del anexo B.

5.3.14. Filtros de voltaje.

Se implementaron filtros de voltaje en cada uno de los integrados de acuerdo a lo señalado en la hoja de datos de cada componente [Micr05, TI05, Hon, Hon08]. En algunos casos solo se colocaron capacitores de desacople para las fuentes de alimentación, mientras que en el caso del `ATmega2560` los filtros implementados consisten en un capacitor y una bobina para cada una de las cuatro entradas de `VCC` que presenta el micro [Atmel, AVR06]. Asimismo se implementó un filtro de la mismas características para los *pines* de alimentación del conversor analógico - digital presente en el integrado. Este tipo de filtros sirve para prevenir el rizado en la corriente de alimentación que circula por las pistas del PCB.

5.4. Quema tanza.

Este circuito finalmente se fabricó en el mismo PCB que la placa de telemetría a pesar de haber sido diseñado por el grupo HWGlobosats, por la esencial razón de que había mayor disponibilidad de espacios en la placa mencionada que en la placa Main que describimos en este capítulo.

Este diseño había sido implementado ya para la primera liberación con el objetivo de poder desvincular la carga útil del globo, cortando la tanza que los unía. La idea del mismo fue extraída de [Ur06]. Dentro de la documentación de este proyecto se describía en forma breve la implementación del mismo, y dada su sencillez pudo implementarse sin dificultades.

El funcionamiento del circuito puede resumirse como un transistor de potencia utilizado como llave, que al cerrarse impone una corriente muy alta a través de una resistencia muy baja, la cual debido a sus propiedades físicas, cable de NiCr, se vuelve incandescente y al estar en contacto con la tanza la corta.

La conexión de los componentes se realiza de la manera que se ilustra en la figura 5.11. Entre los bornes de una fuente se conectan en serie la resistencia y el transistor de potencia. O sea, el terminal positivo de la batería se conecta a un terminal de la resistencia; y el otro terminal de ésta va conectado al `drain` del transistor, y el `source` del último al terminal negativo de la batería. El `gate` del transistor se conecta a un *pin* del microcontrolador y según el voltaje impuesto sobre él, el transistor conduce o se encuentra cortado.

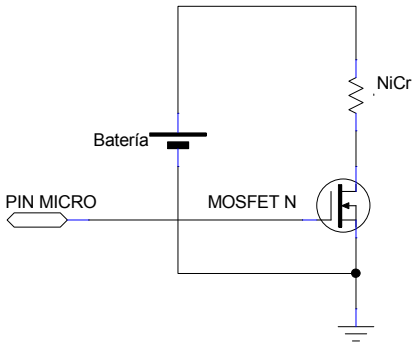


Figura 5.11.: Esquemático del circuito Quema Tanza.

Por un motivo de capacidad de corriente que podían entregar los *pines* del puerto del PIC presente en la primera placa de telemetría utilizada en la primera liberación, se agregó al circuito un *buffer* inversor entre el *pin* del *chip* y el `gate` del transistor. Este *buffer* inversor permaneció en el diseño que se realizó y fabricó posteriormente dentro del PCB de la placa de telemetría aunque no fuera necesario.

El nivel de voltaje que se debe imponer al `gate` del transistor para que este conduzca debe ser alto, 5 V, por lo tanto como el *buffer* es inversor a su entrada el voltaje debe ser de 0 V. Para evitar activaciones indeseadas cuando los *pines* del microcontrolador se encontraran en triestado, se agregó un *pull-up* de forma de asegurar un nivel alto a la entrada del *buffer* inversor.

5.5. Implementación del circuito para la medición de temperatura externa.

Como fue esbozada en la sección 5.3.6 la idea del diseño era realizar un tratamiento de la señal a través de dos circuitos separados. La razón de esto era que la salida proporcionada por el integrado `AD594` debería variar dentro de un rango que incluía voltajes

negativos, para el rango de temperaturas que se debía medir y que además el ADC del microcontrolador no podía realizar la conversión de voltajes negativos.

El primer circuito tomaría la salida del AD594 y luego la amplificaría, siendo esta última la señal de entrada a uno de los canales del ADC. Mientras tanto el segundo circuito también realizaría una amplificación de la señal del AD594, pero además realizaría la inversión de la señal y luego se conectaría la señal invertida y amplificada a otro de los canales del conversor del microcontrolador.

De este modo cuando la señal de salida del compensador de punta fría fuera positiva se tomaría como válida la medición realizada a partir de la señal del primer circuito mencionado, la cual también sería positiva. Una vez que la señal del compensador de punta fría pasara a valores por debajo de cero volts, se usaría para la estimación de la temperatura externa la señal proveniente del segundo circuito que estaría por encima de los cero volts.

Este fue el razonamiento básico aplicado en el diseño del circuito, al cuál luego se sumarían cálculos para la determinación de las constantes de los amplificadores aprovechando al máximo el rango de voltajes que podían ser convertidos por el ADC, obteniendo de esta forma la mejor resolución posible.

Lamentablemente dentro de las consideraciones que se exponen en los párrafos precedentes, se omite tal como ocurrió en la práctica la restricción de que no sólo el conversor era incapaz de realizar la conversión de voltajes negativos, sino que también los *pines* del microcontrolador no admiten este tipo de voltajes, ya que el rango admitido para cualquier *pin* es [Atmel]:

$$(-0{,}5\,\mathrm{V}; \mathtt{VCC} + 0{,}5\,\mathrm{V}) \tag{5.5}$$

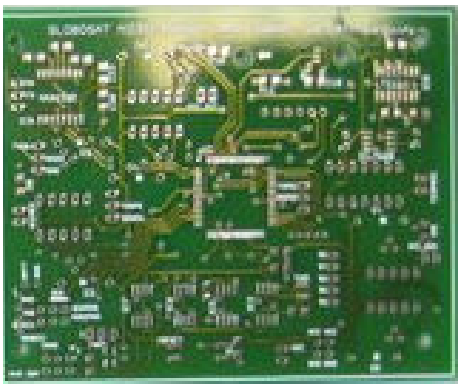
por lo tanto la implementación de este circuito provocaría seguramente daños irreversibles al microcontrolador.

Este inconveniente salió a luz por primera vez cuando ya se había realizado la fabricación de las placas y se estaban realizando las pruebas de los circuitos de los sensores por separado antes de soldar el microcontrolador. También se debe señalar que se percibió en ese momento otro inconveniente que era una equivocación en la realización del esquemático del circuito con el *software* de CAD Eagle. Como consecuencia, la parte del PCB que incluía este circuito quedó inutilizable y se debió diseñar un nuevo circuito para la medición de temperatura externa. Finalmente se realizaron dos nuevos diseños que serán tratados más adelante en el capítulo 6.

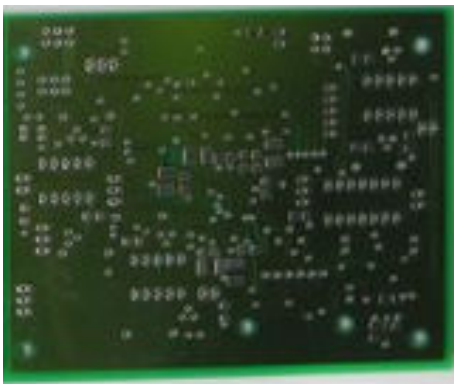
5.6. PCB de la placa Main primera versión.

En la figura 5.12 se puede observar el PCB fabricado para la Main Board a partir del *layout* generado con el *software* de CAD Eagle. Al centro de la misma se puede observar el *footprint* para la conexión del microcontrolador, mientras que el resto de los periféricos descritos en secciones anteriores se encuentran a su alrededor. En la parte inferior de la

placa (figura 5.12b) se destaca la presencia del plano de tierra que cubre la mayor parte de la superficie con el objetivo de atenuar los efectos de la RF y garantizar una buena referencia de potencial 0 V.



(a) Foto de la placa MAIN cara superior.



(b) Foto de la superficie inferior de la placa MAIN.

Figura 5.12.: Foto del PCB fabricado para la placa MAIN versión 1.

5.7. Cambios para la siguiente versión.

Como uno de los objetivos propuestos a realizar durante la prórroga que se nos fue otorgada, estaba la realización de una segunda versión de la Main Board con correcciones y modificaciones para mejorar el diseño. A continuación listaremos los cambios y explicaremos un poco a que se debe cada uno de ellos:

- El primer gran cambio para esta versión fue la eliminación del circuito que realizaba el acondicionamiento de la señal de la termocupla, como se explicó en la secciones anteriores, este diseño contenía errores y luego fue implementado otro diseño sustitutivo en una placa separada y que se conecta con uno de los conversores del microcontrolador a través de *headers*. En la eliminación de este circuito se incluye el generador de -5 V ya que éste era el único circuito que lo utilizaba.
- Otros cambios importantes que se realizaron son la colocación de un conector para la programación vía la interfaz JTAG ya que ésta brinda la ventaja de poder *debuguear on-chip* lo que facilita la depuración del *software*.
- Fueron colocados conectores para las señales de la UART1 la cual no se estaba aprovechando en el primer diseño y estas mismas señales también se pasaron a través del `MAX232` de forma de disponer de ellas en niveles TTL. La disponibilidad

de esta UART puede ser útil a la hora del testeo del *software* como fue comprobado a través del uso que se le dio a la UART0 en ese momento.

- Los demás cambios realizados se pueden considerar menores e incluyen:
  - Asignación de *pines* de forma más eficiente lo que permitió una mayor facilidad a la hora del ruteo de las pistas.
  - Pasaje de los relés y transistores a la capa superior del PCB junto a los otros componentes con *package throught hole*.
  - En el caso de los transistores, se les aplicó un cambio del *footprint*, adecuándose a los transistores `BC547` que habían sido adquiridos.
  - Se produjo el cambio de *package* de las resistencias uniformizándolas al tamaño `1206`.
  - Corrección del *footprint* del sensor de presión ya que para la primer versión se habían interpretado mal las figuras presentes en la hoja de datos, causando una mala asignación de sus *pines*.
  - Se incluyeron un par de *headers* para poder conectar otro eventual dispositivo externo que trabaje con el *bus* I^2C.

En la figura 5.13 podemos ver la segunda versión de la Placa Main con los cambios mencionados anteriormente. Por detalles sobre el esquemático referirse al apéndice H.

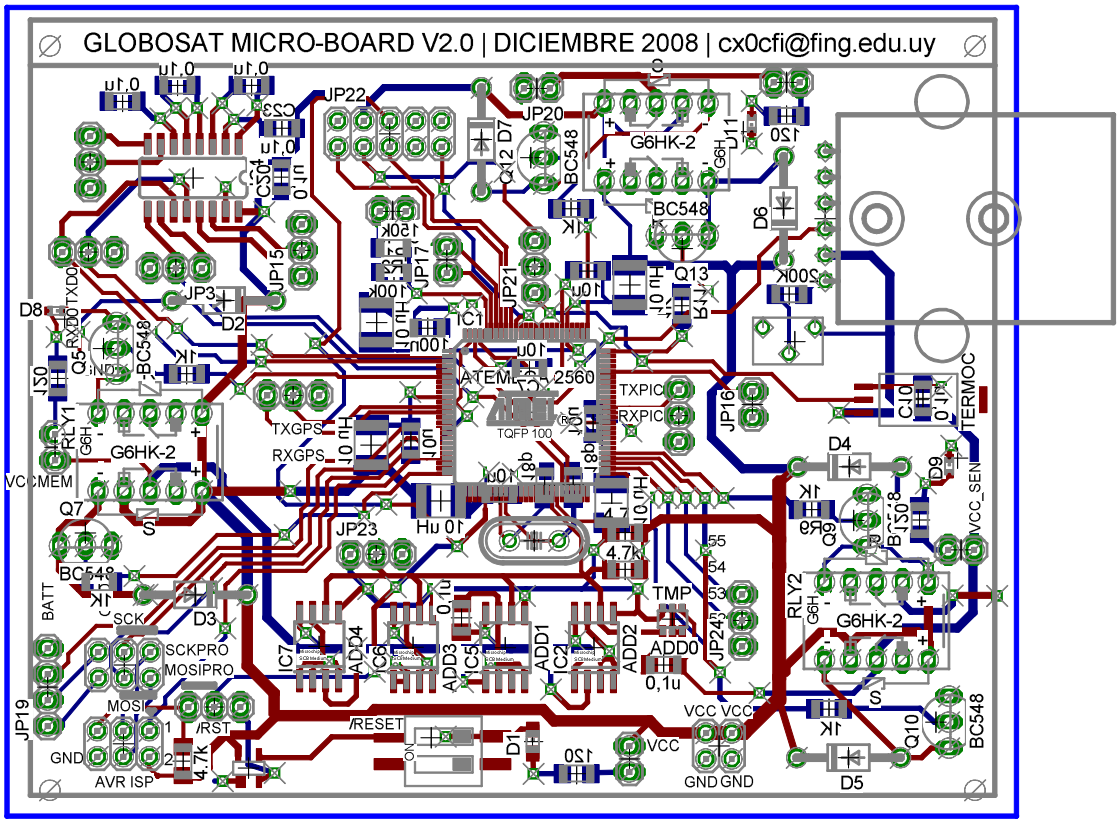


Figura 5.13.: *Layout* de la versión 2.0 de la Main Board.

6. Placas para medición de temperatura externa.

6.1. Diseños.

Se implementaron dos diseños, el primero fue realizado siguiendo las indicaciones dadas en una nota de aplicación para el integrado `AD594` [Mar98], en la cual dado el problema que teníamos que era esencialmente que el conversor AD del microcontrolador no podía recibir un voltaje menor que $-0{,}3\,\mathrm{V}$ en sus *pines*, se nos presentaba una solución con un circuito que agregaba un *offset* a la salida del `AD594`, con lo cual podríamos hacer variar la salida en un rango de voltajes positivos. También se expresaban los cálculos que debían realizarse en caso de querer cambiarle la ganancia al mismo y de esta forma poder medir todo el rango de temperaturas deseado.

Este primer diseño se utilizó en el segunda liberación, y para ese entonces no se había podido calibrar este circuito, por lo que durante el vuelo se transmitía el voltaje que el circuito diseñado estaba proporcionando. Mediante una gráfica realizada posteriormente por Juan Pechiar, de voltaje registrado en función de la altura[1], se pudo constatar que los datos recogidos eran coherentes con la información que se tenía [NASA], pero de todas formas el grupo HWGlobosats no quedó conforme con los resultados.

Fue entonces cuando el grupo se puso en contacto con la empresa Analog Devices [2], a quienes enviamos una consulta a través de la secciónd e soporte en su sitio en *internet* describiendo brevemente los hechos. De forma casi inmediata fue contestada la consulta a través de un *e-mail* comentando que se iba a estudiar el problema y que cuando tuvieran una respuesta se avisaría al grupo por vía electrónica.

Transcurridos unos días recibimos la contestación a nuestro problema, la división de soporte de Analog Devices señaló que el circuito dado en la *application note* era un circuito un tanto «*tricky*»[3]. Una vez que se hacía funcionar, no era seguro que se comportara de la misma manera si se llegara a cambiar el `AD594` por otro. También se comentó que esta hoja de aplicación, de la cual se copió el circuito implementado, tenía ya varios años y que debía ser actualizada. Por último se nos proporcionó un circuito

[1] Ver figura 10.3a. Tener en cuenta la inversión de voltaje.
[2] Diseñadora del integrado `AD594`.
[3] **tricky** /'trɪki/ adjetivo **trickier, trickiest**
1. (*difficult*) ‹task/problem› difícil, peliagudo, que tiene sus bemoles
2. (*sensitive*) ‹matter/problem› delicado [Ox05].

que nos proporcionaba una robustez mayor y el cual incluía otro *chip* que se encargaba de agregar el *offset* y modificar la ganancia en caso de que fuera necesario.

6.1.1. 1º Diseño.

Como fue explicado, el diseño del circuito fue extraído directamente de la nota de aplicación [Mar98]. En ésta se da un esquemático del circuito a implementar con todos sus componentes y un algoritmo para el cálculo de la correspondiente resistencia para lograr la ganancia deseada. A partir del algoritmo, el rango de temperaturas que se deseaba medir y de datos extraídos de la hoja de datos del *chip*, se realizaron los siguientes cálculos.

El rango de temperaturas establecido para la aplicación era $[40\,^{o}\mathrm{C}, -100\,^{o}\mathrm{C}]$, dejando un amplio margen de seguridad debido a la incertidumbre que había respecto a las temperaturas a grandes alturas. Mientras que la salida del `AD594` debía presentar una excursión entre $[(V_S - 2)\,, 0]$ V para dicho rango de temperaturas, siendo $V_S = 5\,\mathrm{V}$. Por lo tanto la sensibilidad deseada para el diseño es:

$$\frac{[(V_S - 2) - 0]\ \mathrm{V}}{[40 - (-100)]\ ^{o}\mathrm{C}} = 21,43\,^{\mathrm{mV}}/_{^{o}\mathrm{C}} \tag{6.1}$$

La sensibilidad promedio de la termocupla tipo J que sería empleada, se presenta en la hoja de datos del integrado como $51{,}7\,^{\mu\mathrm{V}}/_{^{o}\mathrm{C}}$, o se puede calcular más específicamente para el rango de temperaturas elegido mediante los datos presentados en la tabla 6.1,

Temperatura de la termocupla (ºC)	Voltaje de termocupla tipo J (mV)	Voltaje de salida del `AD594` (mV)
−100	−4,632	−893
40	2,058	401

Cuadro 6.1.: Voltajes de salida del `AD594` y termocupla J vs Temperatura de la termocupla.

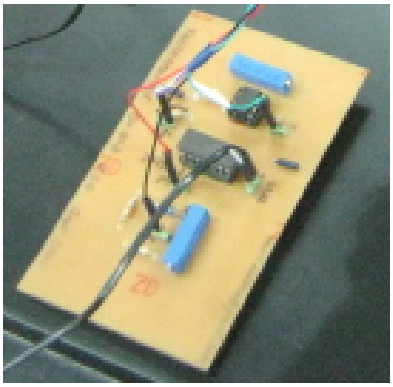
de las cuales se puede calcular sensibilidad resultante $47{,}8\,^{\mu\mathrm{V}}/_{^{o}\mathrm{C}}$.

Consecuentemente, a partir de la sensibilidad que presenta la termocupla y la sensibilidad deseada calculada anteriormente se puede calcular la ganancia que debe imponer el circuito a la señal.

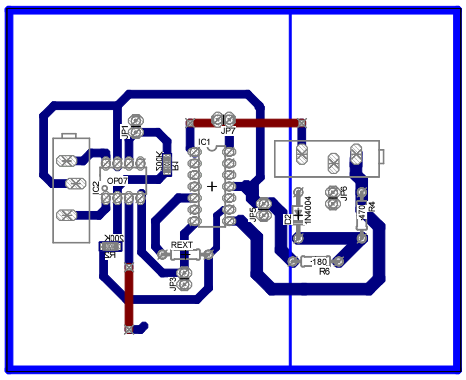
El cálculo para la ganancia es el dado por las ecuaciones 6.2[4] y 6.3[5].

$$G = \frac{21{,}43\,^{\mu\mathrm{V}}/_{^{o}\mathrm{C}}}{51{,}7\,^{\mu\mathrm{V}}/_{^{o}\mathrm{C}}} = 414,51 \tag{6.2}$$

[4]Sensibilidad de la hoja de datos.
[5]Sensibilidad media de acuerdo a los datos de la tabla 6.1.



(a) Placa con el primer diseño de la placa de acondicionamiento de señal de la termocupla, el día de la calibración en los laboratorios del LATU.



(b) *Layout* de la primera versión de la placa de acondicionamiento de señal de la termocupla.

Figura 6.1.: Primer diseño de la placa de acondicionamiento de la señal de la termocupla. 6.1a Foto. 6.1b *Layout*.

$$G = \frac{21{,}43\,\mu\text{V/}^{\text{o}}\text{C}}{47{,}8\,\mu\text{V/}^{\text{o}}\text{C}} = 448{,}33 \tag{6.3}$$

Siguiendo los pasos 5, 6 y 7 del algoritmo de la hoja de aplicación, primero se mide el valor de la resistencia de *feedback* R_{FB}, interna al *chip*, después se determina el valor de la resistencia de entrada R_{IN} y con los valores determinados para esta última y la ganancia, se halla la resistencia externa R_{ext} que se debe agregar.

Con esto ya tenemos todos los componentes y sus respectivos valores para la implementación del circuito, cuyo esquemático y PCB realizaron utilizando la herramienta de CAD EAGLE, sin olvidarse de que el circuito debía ser fabricado en forma casera lo cual influía en la distribución de componentes y pistas en el PCB.

El valor del voltaje de *offset* sería determinado en forma empírica posteriormente a la fabricación de la placa. Para esto se colocaría la punta en un ambiente cercano a los 40 °C y se regularía el *preset* presente en el circuito hasta que la salida sea próxima a los 0 V.

Una vez fabricado el circuito descripto se inició una etapa de pruebas en la que se observó que el voltaje a la salida del mismo en lugar de ser positiva como se quería, era negativa, y se hacía cada vez menor a medida que la termocupla se exponía a temperaturas menores. Por lo tanto se tomó la decisión de fabricar una nueva placa agregándole un inversor que tendría conectado a su entrada la salida del circuito anterior, logrando que la señal final excursionara dentro del rango de voltajes positivos $[0, V_S]$. Se probó entonces el nuevo *hardware* concluyendo que el mismo se comportaba correctamente.

En la figura 6.1 se puede ver el primer diseño de la placa de acondicionamiento de la señal de la termocupla.

6.1.2. 2º Diseño.

El segundo diseño se implementó a partir de la sugerencia enviada por el sector de soporte de la empresa Analog Devices. La frase exacta que se recibió en el *e-mail* de respuesta a nuestra situación fue:

> « *What we recommend today for this situation is use an instrumentation amplifier like the* `AD623` *after the* `AD594` *to apply a gain and offset shift*»

respuesta la cual, a pesar de su brevedad, dejaba clara la idea del circuito que se debía implementar.

La termocupla sería conectada a la entrada del `AD594` al cual no se realizaría ninguna corrección de ganancia ni de *offset*. Luego la señal de salida del mencionado *chip* se conectaría a una de las entradas de un amplificador de instrumentación, mientras que a la otra entrada se conectaría el *offset* necesario y la ganancia del amplificador se cambiaría a través de una resistencia.

Luego de saber como debíamos conectar todos los componentes, quedaba hallar los valores para el *offset* y ganancia de forma tal que se aprovechara al máximo la excursión a la salida del amplificador de instrumentación que era de $[V_S; -V_S]$ con $V_S = 5\,\mathrm{V}$, pero estaba limitada a $[V_S; 0]$ V como ya fue explicado debido a los voltajes admitidos por los *pines* del micro. A partir de los valores de la tabla 6.1 se puede determinar la ganancia y *offset* estableciendo las relaciones 6.4:

$$\begin{cases} -893\,\mathrm{mV} \times G + \mathit{Offset} \geq & 0\,\mathrm{V} \\ 401\,\mathrm{mV} \times G + \mathit{Offset} \ \leq & V_S \end{cases} \tag{6.4}$$

Por lo tanto:

$$(401\,\mathrm{mV} + 891\,\mathrm{mV}) \times G \leq (V_S - 0\,\mathrm{V}) \tag{6.5}$$

y de este modo se llega a la ecuación 6.6:

$$G \leq 3{,}87 \tag{6.6}$$

Para dejar un margen de resguardo se decidió que

$$G \sim 3 \tag{6.7}$$

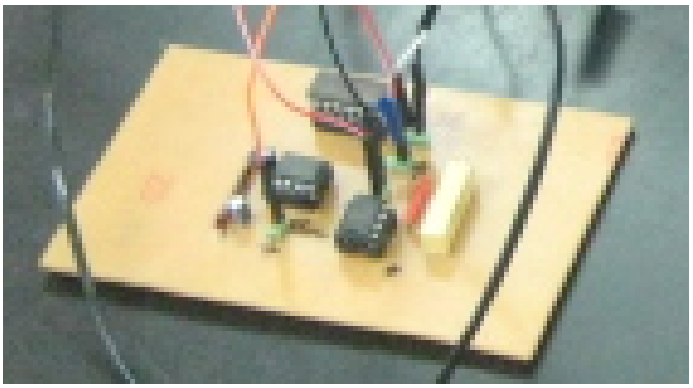
Vinculando las relaciones 6.4 y 6.7, se obtiene la condición 6.8 para el *offset*:

$$2{,}7\,\mathrm{V} \leq \mathit{Offset} \leq 3,8\,\mathrm{V} \tag{6.8}$$

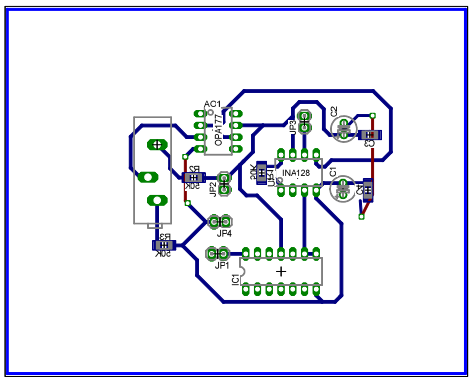
Como no se contaba con los componentes para este circuito se debió realizar una búsqueda en el distribuidor FARNELL. De la misma se desprendieron dos opciones de amplificadores instrumentales a usar, el `AD623` de ANALOG DEVICES o el `INA128` de TEXAS INSTRUMENTS. Las características de estos dos integrados eran muy similares y de sus respectivas hojas de datos [AD623, BB95] se tomó el diseño para el circuito del *offset*, ya que como se señalaba en ambos casos el mismo debía presentar una impedancia de salida baja. Dicho circuito era un seguidor implementado con un operacional que tenía conectado a su entrada un divisor resistivo entre V_S y 0 V implementado con un *trimmer*.

Una vez completada la etapa de diseño se definió la lista de componentes A.2 y se envió el pedido al distribuidor FARNELL a través de un intermediario en nuestro país.

Nuevamente el circuito, esquemático y *layout*, se produjeron con el *software* EAGLE, teniendo en cuenta siempre que el mismo debía ser fabricado de forma casera.



(a) Foto de la segunda versión de la placa de acondicionamiento de señal de la termocupla, el día de la calibración en los laboratorios de Metrología del LATU.



(b) Layout de la segunda versión de la placa de acondicionamiento de señal de la termocupla.

Figura 6.2.: Segundo diseño de la placa de acondicionamiento de la señal de la termocupla. 6.2a Foto. 6.2b *Layout*.

En la figura 6.2 se puede ver el segundo diseño de la placa de acondicionamiento de la señal de la termocupla.

6.2. Consideraciones de uso.

♠ **Observaciones:**

- Al pasar a estar el circuito de compensación de punta fría de la termocupla a un placa aparte de la Main Board se produce el problema de interconexión de las mismas. Desde la Main Board se provee al circuito los voltajes de alimentación V_S, 0 V y $-Vs$, y desde la placa que realiza la compensación se provee la señal de salida correspondiente a la medición de la temperatura externa. Por lo tanto se debe tener sumo cuidado al momento de interconectar ambas placas, verificando que las señales sean las correctas porque de otra forma se podría dañar de forma permanente el circuito.
- Otro aspecto importante es que al ser fabricadas de forma manual y al contar con un plano de tierra de superficie importante, que no tiene ninguna protección aislante, se debe tener cuidado con el contacto con conductores a otros potenciales para evitar cortocircuitos.
- Una vez que fueron calibradas las placas como se expondrá en el capítulo 7, no se deben cambiar componentes o modificar la configuración del *offset* o el proceso descripto en dicho capítulo perderá su validez.
- *La posición de los terminales de la termocupla no es invertible*, siendo que el cable negro (metal hierro, Fe) debe ir conectado a tierra, potencial cero, mientras el terminal blanco (metal constantan, Cu55Ni45) irá conectado al terminal positivo de la entrada del `AD594`.

6.3. Cambios para siguientes versiones.

- Un cambio importante a efectuar es el pasaje del generador de $-V_S$ a la placa de compensación de punta fría ya que es el único circuito que utiliza este voltaje, eliminando este *chip* y sus componentes auxiliares de la Main Board. Este cambio implica además que la cantidad de señales a conectar entre ambas placas se reduce a tres.
- Como se destacará en el capítulo 7 finalmente el 1º diseño 6.1.1 presentó un mejor comportamiento que el 2º diseño 6.1.2, siendo el primero utilizado entonces en la 3º liberación. No queda claro el porque el 2º circuito 6.1.2 mostraba oscilaciones en su voltaje de salida y queda como pendiente el estudio de este problema, que de ser corregido puede posibilitar la utilización de este circuito que en teoría presenta mejores prestaciones que el 1º diseño 6.1.1.
- Si se decide fabricar las placas con un fabricante de PCBs se aconseja modificar el *layout*, mejorando la disposición de componentes y pistas, pudiendo reducir el tamaño de la placa.

7. Calibración y pruebas realizadas.

En los siguientes párrafos se describe el proceso de calibración de las placas documentadas en el capítulo 6 y de los sistemas de medida de presión.

Antes de proseguir es necesario realizar algunas aclaraciones:

1. Desde semanas antes de la segunda liberación hasta el momento se dispone de dos placas MAIN funcionales, numeradas como 1 y 2. La placa 1 es la que se utilizó en la segunda y tercera liberaciones, mientras que la número 2 no se ha utilizado en ninguna liberación aún.
2. La calibración de los sensores se llevó a cabo en los laboratorios del área de METROLOGÍA CIENTÍFICA del LABORATORIO TECNOLÓGICO DEL URUGUAY (LATU). La misma no fue realizada en una sola concurrencia a dichos laboratorios, sino que en primera instancia, unas semanas antes de la segunda liberación, se efectuó la calibración del sensor de presión de la placa 2, y en una segunda oportunidad se realizó la calibración del sensor de presión de la placa 1. Finalmente, en la tercera concurrencia al LATU se pudo concretar la calibración de los sistemas de medida de temperatura externa.

Lo señalado en el punto 2 tuvo como consecuencia que para la primera liberación no se contara con un sistema de medida de temperatura calibrado, así como directamente tampoco se contaba con sensor de presión. Para la segunda liberación sí se habían calibrado los sensores de presión de las placas MAIN 1 y 2, no obstante lo cual el código de SW que tuviera en cuenta los detalles de la calibración no fue incluido dentro de la versión de código que se programó en el microcontrolador antes de la segunda liberación. Para la tercera liberación se contaba con la información de la calibración de todos los sistemas de medida.

7.1. Software empleado en las calibraciones.

7.1.1. Software cargado en el microcontrolador.

Con el objetivo de poder visualizar en tiempo real las medidas de presión y temperatura tomadas por la placa MAIN, se elaboraron rutinas de SW sencillas que realizaran las conversiones de los voltajes del sensor de presión y de la placa de acondicionamiento de señal para la temperatura externa.

Una vez culminadas las conversiones analógico - digitales y realizadas las operaciones matemáticas pertinentes en cada caso[1] las magnitudes medidas se envían por una de las UARTs a una velocidad configurable, por ejemplo de 4800 ó 9600 bps. Se debe realizar la puntualización de que los valores de las magnitudes medidas se envían en formato ASCII. El parseo desde *double* a ASCII se realiza dentro de la rutina cargada en el microcontrolador, razón por la que la visualización de los valores puede ser efectuada directamente con el SW HYPERTERMINAL por ejemplo[2].

♠ Para realizar el diálogo PC - placa MAIN se sugiere utilizar la UART0, ya que la misma está conectada a un `MAX232`, lo que nos brinda tranquilidad de que no habrá problemas con los niveles de voltaje entre a placa MAIN y la PC que se conecte para leer los datos.

La UART0 se podría cambiar por ejemplo por la UART2 o la UART3, que están previstas para dialogar con el GPS o el PIC de la placa TELEMET respectivamente, y que por lo tanto no tienen uso al momento de realizar la calibración de los sensores; pero en caso de optar por esta opción debe tomarse la precaución de no enviar datos desde la PC hacia esas UARTs, ya que no está previsto su funcionamiento para niveles TTL[a], y de este modo se pueden interpretar de manera incorrecta los niveles lógicos o peor aún, dañar la respectiva UART del microcontrolador.

[a] Para la siguiente versión de la placa MAIN, como se indica en la sección 5.7, se podrá acceder a la UART1 (la cual no estaba en uso en la primera versión), de propósito general, a través de un `MAX232`.

7.1.2. Software ejecutado en la PC: RealTerm.

El SW empleado para leer los datos que envíe el microcontrolador hacia un puerto serie de la PC y desplegarlos en pantalla se denomina REALTERM[3]. El mismo es un programa terminal diseñado para capturar, controlar y depurar flujos de datos en los puertos seriales de las PCs. De entre todas las características que presenta este SW, quizás la más útil de todas sea su versatilidad en la presentación de datos en pantalla. Las opciones de presentación de datos que pueden resultar particularmente útiles son:

✍ **ASCII (1).** Opción ASCII «literal». Por ejemplo si llega un hexadecimal «`00`», es decir el caracter ASCII `NULL`, no imprime nada en pantalla ni mueve el cursor.

✍ **ASCII (2).** A diferencia de la anterior, y con el mismo caracter de ejemplo (`NULL`), imprime en pantalla las letras «`NUL`». De este modo se verifica que aunque no se reciben caracteres, la interfaz está activa recibiendo ceros[4].

[1] Por detalles de dichas operaciones referirse al anexo 9. Las subsecciones 9.2.9 en la página 95 y 9.2.27 en la página 110 versan sobre la obtención de la medida de presión y temperatura externa respectivamente.

[2] Que se encuentra disponible en WINDOWS XP, por ejemplo. En la sección 7.1.2 se describe el uso de otro *software* con algunas características más útiles que las del HYPERTERMINAL.

[3] `http://realterm.sourceforge.net/`.

[4] Esto también se puede verificar en el cuadro «`status`», cuando se observa que la señal `RXD(2)` se torna de color amarillo.

✍ **ANSI.**

✍ **Hexadecimal.**

✍ **Hexadecimal seguido de su respectiva representación ASCII,** opción que elimina la necesidad de contar con una tabla ASCII para realizar la comprobación de los caracteres recibidos. Adicionalmente, los caracteres non - ASCII también son representados mediante dos o tres letras de modo de poder identificarlos rápidamente[5].

✍ **Binario.**

✍ **Nibbles.**

✍ **Float4.** Interpreta los datos que llegan al puerto y los despliega como *floats* de cuatro bytes según la norma IEEE 754.

7.2. Preparación de la calibración.

Al momento de comenzar la calibración se deberá tener cargada en el microcontrolador de la placa MAIN el proyecto «`calibración`» respectivo.

- Se deberá ***corroborar en el código que el canal del ADC que se esté leyendo sea el de la magnitud deseada, de acuerdo a la tabla B.1.***
- Asimismo, es conveniente ***verificar*** en el código que la UART por la que se envíen los datos a la PC está ***correctamente configurada*** en la función de inicialización de las UARTs. Esto implica:
  - Que esté **habilitada la transmisión** por esa UART:

    ```
    UCSR0B |= (1 << TXEN0);
    ```

  - Que el **bit de reducción de consumo** para esa UART esté **deshabilitado**:

    ```
    PRR0 &= ~(1 << PRUSART0);
    ```

  - Que el ***baudrate*** que se le pase como parámetro a la función **`UART_Init`** y el que esté configurado en el **SW** con el que se esté recibiendo las tramas en la PC **coincidan**.

Luego de haber verificado los puntos anteriores, se debe realizar el conexionado indicado en la figura 7.1.

[5] Por ejemplo el hexadecimal `NULL`, «00», se representa en el terminal como «`NUL`»; el hexadecimal `Start Of Header`, «`01`», se representa como «`SOH`», etc.

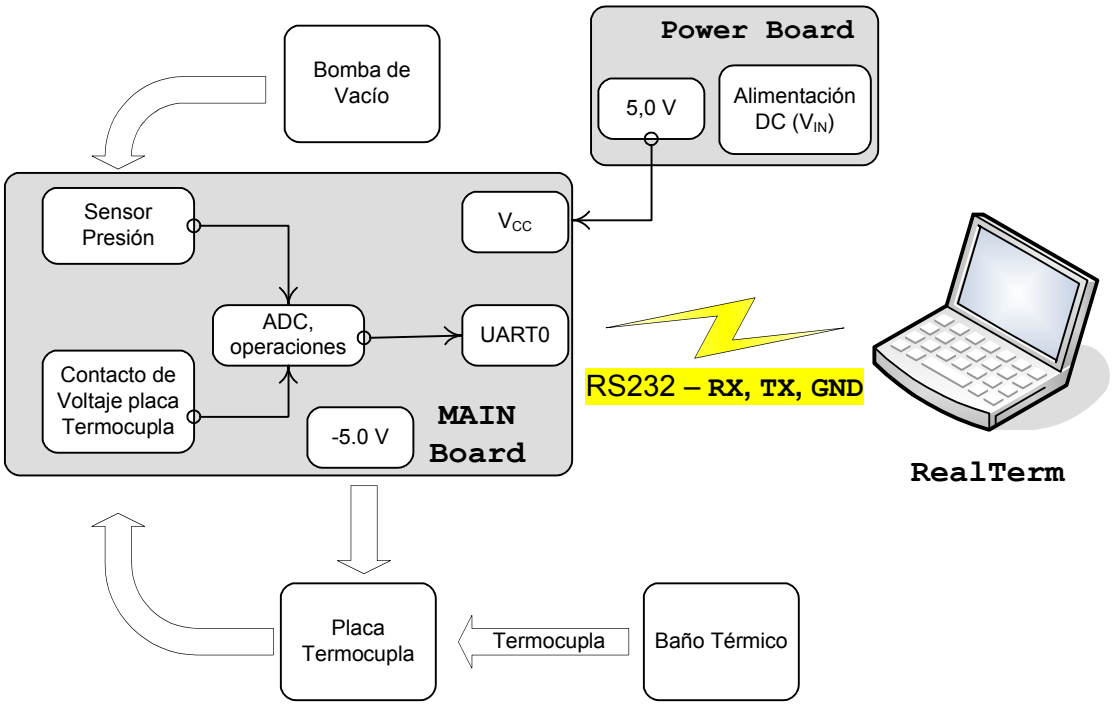


Figura 7.1.: Esquema del conexionado necesario para realizar las calibraciones. Por razones de claridad se omitieron las señales de GND y 5.0 V para la placa de la termocupla, así como la señal GND para la Main Board.

Como se puede observar en dicha figura, se deberá contar obviamente con la placa MAIN y con la placa de ALIMENTACIÓN. A partir de la placa de ALIMENTACIÓN se proporcionarán 5.0 V de alimentación para la placa MAIN. En la figura 7.1 se incluyen la bomba de vacío, la placa de la termocupla y el baño térmico, pero esto es sólo a efectos ilustrativos, ya que como se mencionó en el comienzo de este capítulo las calibraciones de la parte de presión y temperatura se realizaron en momentos distintos. Si se está calibrando temperatura, la placa de la termocupla recibe alimentación de +5,0 V desde la POWER BOARD y −5,0 V desde la MAIN BOARD.

7.3. Calibración del sistema de medida de presión.

Las calibraciones de los sistemas de medida de presión para las placas 1 y 2, como ya se mencionó, fueron realizadas en días distintos. Los sistemas de medida fueron calibrados contra un patrón del LATU: un calibrador de presión marca DH - BUDENBERG de la línea *24610*, trazable a patrones primarios. Dicho calibrador es del tipo de presión diferencial, por lo que para calcular la presión absoluta se debió estrangular una de las dos mangas, conservando la presión atmosférica. La otra manga se introdujo en una bomba de vacío junto a otra manga conectada al sensor de presión de nuestro sistema de medida.

De este modo, el sistema de medida de presión montado en la placa MAIN mide directamente la presión absoluta en la bomba de vacío, y el calibrador mide la diferencia entre la presión atmosférica y la presión en la bomba de vacío. Conociendo la presión atmosférica se puede hallar la presión absoluta en la bomba de vacío según el patrón.

La tabla 7.1 muestra los datos relevados para cada una de las placas. En los encabezados de dichas tablas se listan las presiones atmosféricas de los días en que fueron realizadas las respectivas calibraciones. Las terceras columnas de cada una de las tablas fueron construidas, como se explica en el párrafo anterior, según:

$$LATU_{Absoluta\,1} = LATU_{Diferencial\,1} - Presión\,Atmosférica \tag{7.1}$$

En la figura 7.2 se muestran los gráficos para los pares ($Presión_{Placas\,1,2}$, $Presión_{Absoluta\,LATU}$). Como también se ilustra en la figura 7.2, las curvas de ajuste de primer orden para dichos pares son:

$$Presión\,Absoluta_{LATU}\,(kPa) = 1{,}089 \times Presión_{Placa\,1}\,(kPa) - 9{,}801\,kPa \tag{7.2}$$

Presión Atmosférica = 102.200 kPa		
Placa 1 (kPa)	LATU diferencial 1 (kPa)	LATU absoluta 1 (kPa)
8.1516	102.200	0.000
29.4172	80.180	22.020
48.5505	60.400	41.800
66.5056	39.729	62.471
84.4607	19.929	82.271
102.3035	0.000	102.200

(a) Relevamiento de datos para la placa 1.

Presión Atmosférica = 102.005 kPa		
Placa 2 (kPa)	LATU diferencial 2 (kPa)	LATU absoluta 2 (kPa)
104.965	0.000	102.005
83.419	22.800	79.205
65.913	42.200	59.805
48.294	62.200	39.805
28.656	82.600	19.405
10.589	100.400	1.605
9.244	101.977	0.028

(b) Relevamiento de datos para la placa 2.

Cuadro 7.1.: Resultados de la calibración de los sensores de presión para las placas 1 y 2.

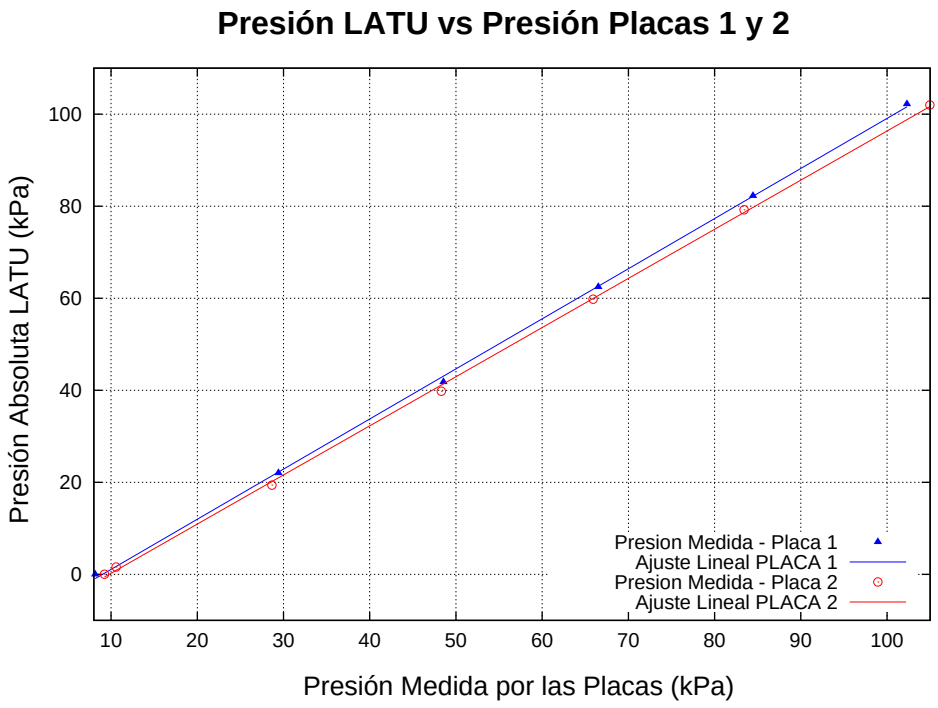


Figura 7.2.: Gráfico de los datos de la tabla 7.1, junto a las funciones de primer orden que mejor ajustan las curvas de presión para cada placa.

$$Presión\,Absoluta_{LATU}\,(kPa) = 1{,}068 \times Presión_{Placa\,2}\,(kPa) - 10{,}443\,kPa \qquad (7.3)$$

Se puede apreciar también que los ajustes de primer orden son suficientemente buenos para la exactitud que se pretende lograr.

Una vez obtenidas las curvas de corrección de la presión a partir de la calibración para ambas placas (ecuaciones 7.2 y 7.3), se realizaron las correcciones pertinentes en el código a cargar en el microcontrolador[6].

7.4. Calibración del sistema de medida de temperatura externa.

El equipo empleado para la calibración del sistema de medida de temperatura consistió en:

- Termómetro de resistencia de platino, resistencia de valor nominal 100 Ω `PT100` modelo *9351416*.
- Puente de Wheatstone `ASLF700`.
- *Software* desarrollado por el Departamento de Metrología del Laboratorio Tecnológico del Uruguay.

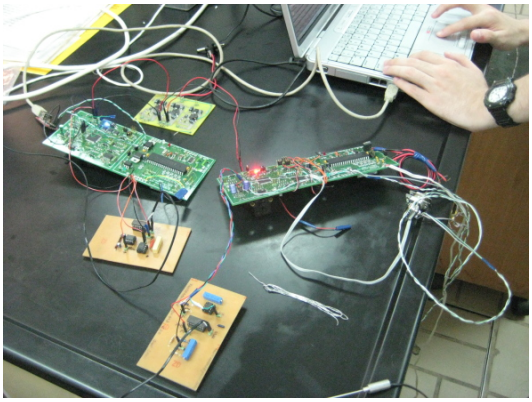
Se contó en todo momento con la ayuda y supervisión de Ofelia Robatto y Andrea Sica.

Como se analizó en la sección 3.2.1, el rango de temperaturas en que se pretendía realizar la calibración del sistema de medida de temperatura externa abarcaba desde $35\,^{o}C$ a $-70\,^{o}C$. Para lograr estas temperaturas se empleó un baño de alcohol[7]. El mismo se puede observar en la figura 7.3b, al comienzo de la calibración a una temperatura de $0\,^{o}C$. Dentro del mismo se introducirían la sonda del patrón del LATU y dos termocuplas:

- Una de ellas iría conectada a la primera versión de la placa de la termocupla[8], y la salida de esta placa a su vez conectada a la Main Board 1.
- La otra termocupla se conectaría a la segunda versión ensayada de la placa de la termocupla[9], y la salida de esta placa conectada a la Main Board 2.

El conexionado de las placas Main se puede ver en la figura 7.3a. Se puede ver también la Power Board alimentada por un transformador conectado a la red.

[6] En ocasión de la tercera liberación. Para la segunda liberación se relevaron en vuelo los datos sin calibrar, y su reconstrucción se realizó posteriormente, cuando se recuperó la carga útil.
[7] www.isotech.co.uk.
[8] La cual se incluyó en las liberaciones del Globosat02 y el Globosat03.
[9] Que hasta la fecha no se ha liberado.



(a) Conexionado pronto para el comienzo de la calibración.

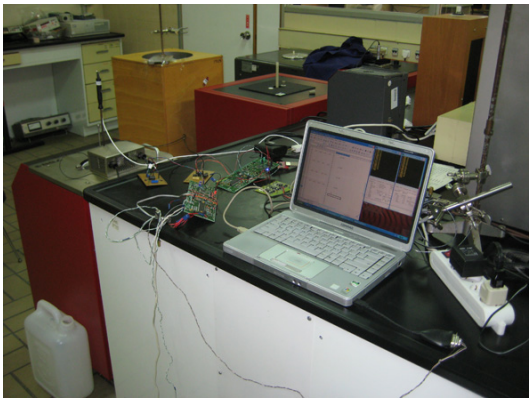
(b) Baño de alcohol momentos antes del comienzo de la calibración. Se puede observar abajo a la derecha la temperatura de *0 ºC* y la sonda del patrón del LATU introducida en el baño. El alcohol es de color translúcido y fluye a través de una rejilla para mantener una temperatura uniforme.

Figura 7.3.: Imágenes de los preparativos para las calibraciones de temperatura.

Con las termocuplas sumergidas en el baño de alcohol, se procedió a variar la temperatura del baño. En principio se pretendían tomar muestras con variaciones de $5\,^{o}C$. Sin embargo, una vez en el laboratorio se observó que la estabilización de la temperatura del baño demoraba aproximadamente entre veinte minutos y media hora[10]. Adicionalmente, los voltajes que se observaban en pantalla oscilaban entre varios valores[11], por lo que se debió observar cuidadosamente las series de valores a la espera de repeticiones y detectar mínimos y máximos de voltaje para cada temperatura que se quisiera medir. Con el correr de las sucesivas tomas de muestras, se esperaría cada vez menos tiempo para lograr las estabilizaciones, pero siempre el suficiente para lograr que los voltajes impresos en pantalla tuvieran valores mínimos y máximos repetidos en suficientemente cantidad. Posteriormente al relevo de estos voltajes mínimos y máximos, y a la determinación de las rectas de ajuste para los mismos, se promediarían dichas rectas para determinar la función $voltaje = \mathcal{F}(\mathcal{T})$.

[10] En realidad en este tiempo tampoco se llegaba a estabilizar, pero las cifras significativas que pretendíamos determinar ya estaban asentadas, y las restantes cifras significativas no ameritaban la espera de un mayor tiempo y como consecuencia llevar a la necesidad de la coordinación de una nueva visita al LATU.

[11] Aún habiendo tomado la precaución en el código programado en el microcontrolador de promediar cinco lecturas de voltaje antes de imprimir el resultado en pantalla.



(a) Sistema pronto para comenzar la calibración. Se pueden ver las dos termocuplas ya introducidas en el baño de alcohol, las dos placas MAIN conectadas a los respectivos puertos USB de la computadora y las dos instancias de REALTERM para recibir las muestras de voltaje obtenidas.

(b) Última medida de temperatura tomada, a $-70\ ^{o}C$. Se puede observar, contrastando con la figura 7.3b, la condensación en las termocuplas y lo turbio y espeso que se torna el alcohol a esas temperaturas.

(c) Abajo a la izquierda el baño de alcohol. En el centro de la foto: las placas MAIN, y las placas de las termocuplas (versiones 1 y 2) y la computadora ejecutando el *software* de terminal. La computadora que se aprecia al fondo es la que indica la temperatura patrón, monitoreando varios baños (además del de alcohol utilizado por nosotros) mediante puentes de Wheatstone.

Figura 7.4.: Imágenes durante la calibración de los sistemas de medida de temperatura.

También se pudo comprobar que la resolución de ambos sistemas de medida no es la suficiente para detectar variaciones de $1\,^{o}C$. Esto se puede observar en la tabla 7.2, que contiene los datos relevados, y en negrita se muestra que para una variación entre $-5{,}0\,^{o}C$ y $-6{,}0\,^{o}C$ la placa 1 indica los mismos voltajes y la placa 2 indica el mismo voltaje mínimo y una pequeña variación para el voltaje máximo.

Placa 1			**Placa 2**		
Temperatura Patrón (ºC)	**V_{max}(V)**	**V_{min}(V)**	**V_{max}(V)**	**V_{min}(V)**	**Temperatura Patrón (ºC)**
0.109	1.211	1.177	3.120	3.047	0.109
-5.005	**1.323**	**1.245**	**2.969**	**2.881**	**-5.005**
-5.9730	**1.323**	**1.245**	**2.969**	**2.896**	**-5.9730**
-11.9550	1.484	1.440	2.808	2.734	-11.9550
-17.9870	1.597	1.558	2.651	2.573	-17.9870
-23.9740	1.733	1.680	2.515	2.480	-23.9740
-29.7660	1.875	1.797	2.422	2.358	-29.7660
-36.0462	1.992	1.948	2.261	2.188	-36.0462
-41.1644	2.109	2.065	2.148	2.065	-41.1644
-47.6806	2.188	2.222	2.012	1.880	-47.6806
-54.1844	2.358	2.344	1.880	1.753	-54.1844
-59.8621	2.480	2.422	1.636	1.558	-59.8621
-64.6893	2.534	2.500	1.558	1.484	-64.6893
-69.5761	2.617	2.573	1.440	1.323	-69.5761

Cuadro 7.2.: Resultados de las calibraciones de los conjuntos *Placa Main 1 + Placa de Termocupla 1* y *Placa Main 2 + Placa de Termocupla 2*.

En la figura 7.4 se pueden ver imágenes del transcurso de la calibración y, particularmente de la toma de las últimas medidas. Al momento de la toma de la última medida el baño de alcohol se encontraba a $-70\,^{o}C$ y dada la densidad observada para el mismo se puede afirmar que no hubiera sido posible la toma de medidas a temperaturas más bajas sin llegar al punto de congelación.

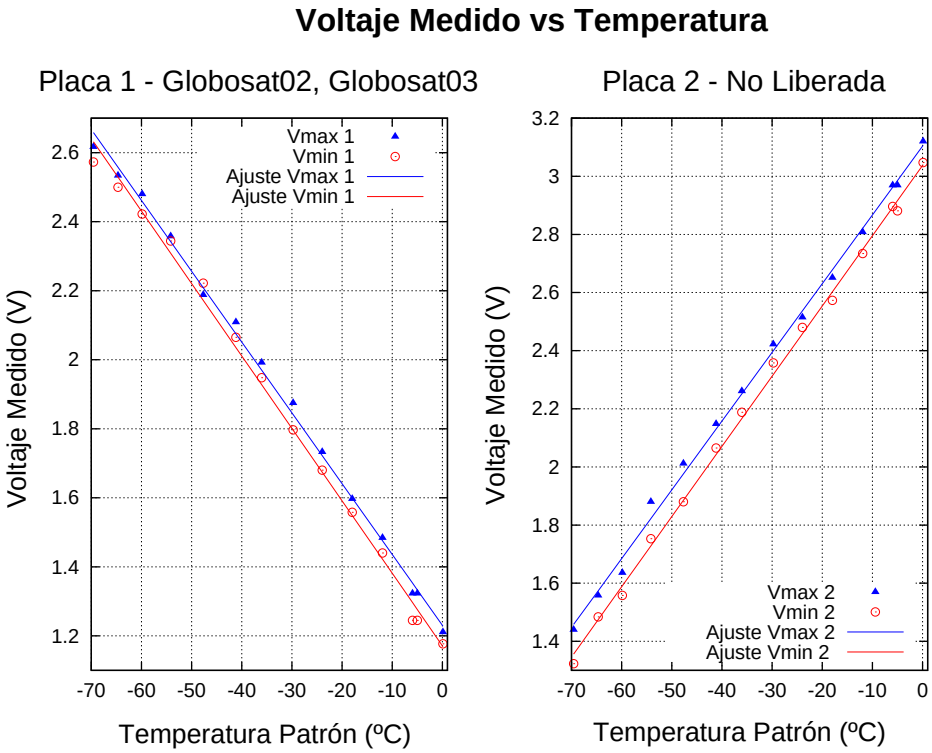


Figura 7.5.: Gráficos de los datos de la tabla 7.2, junto a las funciones de primer orden que mejor ajustan las curvas de voltajes mínimos y máximos para los conjuntos *Placa Main 1 + Placa de Termocupla 1* y *Placa Main 2 + Placa de Termocupla 2*.

7.4.1. Fórmulas resultado de la calibración de temperatura externa.

7.4.1.1. Placa 1 + Placa de termocupla 1.

Recordemos que esta placa es la liberada en el GLOBOSAT02 y en el GLOBOSAT03.

Los resultados de la calibración arrojaron dos curvas: voltaje mínimo en función de la temperatura y voltaje máximo en función de temperatura. Dichas relaciones se expresan en las ecuaciones 7.4 y 7.5 para voltajes mínimo y máximo respectivamente.

$$\mathrm{V}^{(1)}_{\mathrm{mín}} = (-0{,}0205\,\mathrm{V/^oC}) \times T^{(1)} + (1{,}2304\,\mathrm{V}) \tag{7.4}$$

$$\mathrm{V}^{(1)}_{\mathrm{máx}} = (-0{,}0210\,\mathrm{V/^oC}) \times T^{(1)} + (1{,}1713\,\mathrm{V}) \tag{7.5}$$

El promedio de ambas se traduce en la ecuación 7.6.

$$\mathrm{V}^{Promedio}_{Termocupla\,1} = (-0{,}02075\,\mathrm{V/^oC}) \times T^{(1)} + (1{,}20085\,\mathrm{V}) \tag{7.6}$$

La ecuación que se programó en el *software* del microcontrolador consiste en despejar la temperatura T de la ecuación 7.6. Finalmente, la relación temperatura - voltaje para el conjunto *Placa 1 + Placa de Termocupla 1* es la de la ecuación 7.7:

$$T^{(1)} = (-48{,}193\,^{\circ}\mathrm{C}/\mathrm{V})\,\mathrm{V}^{Promedio}_{Termocupla\,1} + (57{,}872\,^{\circ}\mathrm{C}) \tag{7.7}$$

7.4.1.2. Placa 2 + Placa de termocupla 2.

Análogamente a la descripción anterior, se hallaron curvas para la *Placa 2 + Placa de la Termocupla 2*. Las curvas para los voltajes mínimos y máximos son las determinadas por las ecuaciones 7.8 y 7.9 respectivamente:

$$\mathrm{V}^{(2)}_{\mathrm{mín}} = (0{,}0242\,\mathrm{V}/^{\circ}\mathrm{C}) \times T^{(2)} + (3{,}0373\,\mathrm{V}) \tag{7.8}$$

$$\mathrm{V}^{(2)}_{\mathrm{máx}} = (0{,}0237\,\mathrm{V}/^{\circ}\mathrm{C}) \times T^{(2)} + (3{,}1038\,\mathrm{V}) \tag{7.9}$$

El promedio de las ecuaciones arroja la ecuación 7.10:

$$\mathrm{V}^{Promedio}_{Termocupla\,2} = (0{,}02395\,\mathrm{V}/^{\circ}\mathrm{C}) \times T^{(2)} + (3{,}07055\,\mathrm{V}) \tag{7.10}$$

Si bien no se programó nunca en el microcontrolador, la corrección para hallar la temperatura correcta para el conjunto *Placa 2 + Placa de Termocupla 2* sería la dada por la ecuación 7.11:

$$T^{(2)} = (41{,}754\,^{\circ}\mathrm{C}/\mathrm{V})\,\mathrm{V}^{Promedio}_{Termocupla\,2} + (-128{,}207\,^{\circ}\mathrm{C}) \tag{7.11}$$

8. Placa anti *Latchup*.

8.1. Objetivos.

Como se ha mencionado en la sección 1.3.1 las fallas de tipo SEL (*Single Event Latchup*) son las mas dañinas, pudiendo afectar los integrados de forma irreversible. Con esta placa lo que se pretende es mitigar las consecuencias de este tipo de fallas ya que no se puede actuar de forma preventiva.

Aunque la probabilidad de ocurrencia de este tipo de falla en la liberación de globos sonda es muy pequeña, deberá ser tenida en cuenta para el futuro diseño del satélite. Por lo tanto consideramos ésta placa como un primer paso para la solución de este tipo de problema.

8.2. Diseño.

Para la realización de este circuito se tomó como base un circuito anti *latchup* brindado por Paul Peronnard, estudiante de posgrado del instituto TIMA de Grenoble. El funcionamiento del mismo es bastante sencillo y se basa en la medición de la corriente consumida por el circuito que se desea controlar.

La medición de la corriente se realiza debido a que justamente lo que termina provocando los daños ante una falla del tipo *latchup* -desencadenada por una partícula radiactiva-, es la conformación de un camino de baja impedancia entre fuente y tierra, o sea un corto-circuito, incrementando drásticamente la corriente consumida por el integrado afectado. Si este efecto se prolonga por suficiente tiempo puede provocar daños irreversibles al *chip*.

Por lo tanto en el circuito de *latchup* implementado se hace circular toda la corriente provista por la batería por un resistor muy bajo del tipo *shunt*. La caída de voltaje en este resistor es amplificado y comparado frente a un voltaje fijo, provisto por un DAC (*Digital to Analog Converter*). El voltaje fijo es determinado de forma que sea igual a la máxima caída deseada en la resistencia *shunt*, proporcional a su vez a la máxima corriente que sería permitida como consumo normal del circuito monitoreado.

La comparación entre los voltajes en el *shunt* y el voltaje de salida del DAC comandará entonces un transistor MOSFET de potencia, el que funcionará como llave, cortando la corriente suministrada por la batería en el caso en que la caída de voltaje en el *shunt* sea mayor a la deseada.

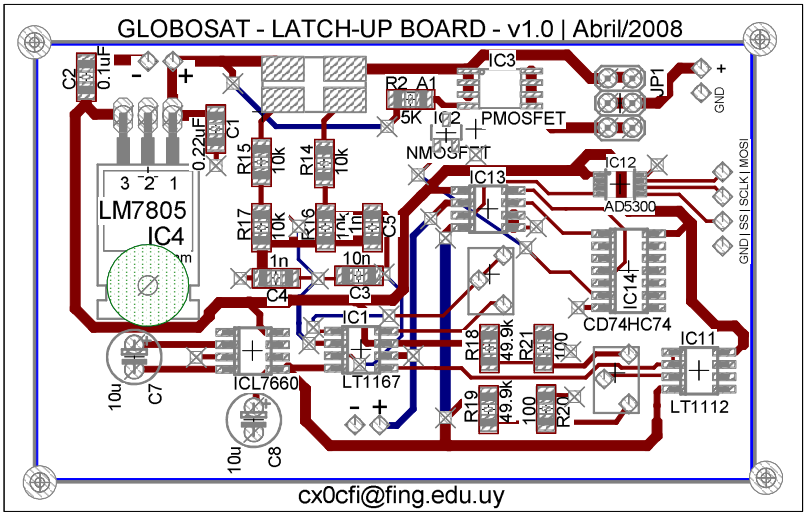


Figura 8.1.: *Layout* de la placa ANTI LATCHUP.

Este circuito contará con su propia fuente de voltaje regulado, que en este caso será lineal ya que el consumo del circuito y la complejidad de una fuente *switcheada* no ameritan la implementación de una fuente de este tipo. El circuito amplificador de la señal de voltaje del *shunt*, el comparador, el DAC y el MOSFET son idénticos al circuito que se nos brindó. Se hicieron pequeñas modificaciones en cuanto a la utilización del *flip - flop* y el circuito de comando del MOSFET.

El voltaje fijo con el cuál se comparará el voltaje proporcional a la corriente consumida de la batería será comunicado al DAC a través de la interfaz SPI que posee el mismo. El valor que se fije será determinado luego de las pruebas que se realizarán de la medición de consumo de los circuitos que integrarán toda la carga útil del globo.

Se prevé la posibilidad de anular la actuación del circuito de *latchup* sobre el transistor que funciona como llave, de forma que no se pueda cortar la corriente a los circuitos alimentados desde la batería a través de la misma, pero permitiendo la utilización de la caída de voltaje en el *shunt* para realizar una estimación, utilizando el conversor A / D del microcontrolador e implementando un integrador, de la cantidad de carga consumida de la batería.

En la figura 8.1 se observa el *layout* del circuito de *latchup*. Por detalles sobre el conexionado de los componentes, consultar el esquemático de la placa ANTI LATCHUP, en la figura **??** del anexo H.

8.3. Primera versión.

Esta placa fue realizada, al igual que las demás, con la herramienta de CAD Eagle y su fabricación se realizó en conjunto con la placa Main y la placa de Telemetría. Debido a la omisión de ciertos componentes cuando se realizó la lista general que incluía los componentes necesarios para la implementación de todos los circuitos, no se pudo completar el circuito anti latchup, quedando pendiente la finalización del circuito y posteriores pruebas.

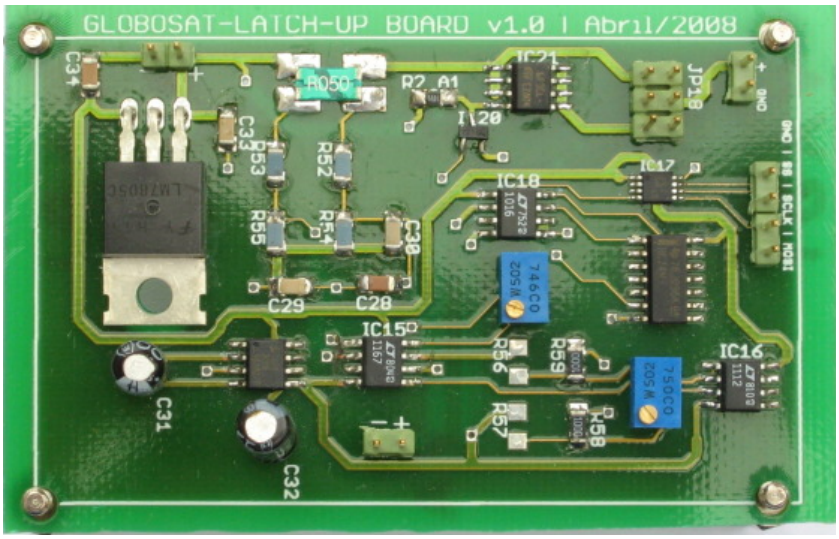


Figura 8.2.: Placa anti Latchup.

En la figura 8.2 se muestra una foto de la placa anti Latchup con los componentes soldados.

9. Software.

El propósito de este capítulo es el de enumerar algunos aspectos a tener en cuenta previo al comienzo del desarrollo de *software* propiamente dicho y también, sin entrar en una descripción de código línea por línea, dejar una clara idea de las secuencias de acciones que se ejecutan en cada uno de los archivos de *software* que se desarrollaron, así como, de resultar necesario, explicar la necesidad de dichas acciones.

Si bien se pueden utilizar diversas herramientas para realizar la programación y el desarrollo del *software* para el microcontrolador, se optó por el Entorno de Desarrollo Integrado[1] AVR Studio® 4, sugerido en el sitio *web* del fabricante Atmel[2]. Previa a la instalación de este IDE, de estar trabajando en el sistema operativo Windows, se sugiere realizar la instalación del conjunto de herramientas WinAVR™[3]. El mismo contiene el compilador de C y C++ GCC de GNU. Habiendo instalado el WinAVR™, la posterior instalación del AVR Studio® 4 se encarga de detectar dicho compilador y configurar todos los *paths* necesarios, lo que facilita el trabajo posterior.

Las siguientes secciones (9.4 y 9.5) listan parte del contenido que se puede encontrar en [GSMB], desarrollado por Sebastián Fernández entre Junio y Julio de 2008.

9.1. Generalidades del Software.

El *software* involucrado en el proyecto se puede dividir en tres grandes grupos, uno encargado de armar la trama a transmitir y realizar la modulación en audio alojado en el PIC de la placa de Telemetría, la rutina principal que corre en el `ATmega2560` encargada de ejecutar el plan de vuelo y los paquetes de datos enviados a la placa de Telemetría y el resto de las funciones con distintos objetivos particulares, pero con el propósito de hacer transparente el manejo del *hardware* a la rutina principal del `ATmega2560`.

El *software* que corre en el PIC fue implementado por el grupo Teleglobosat, así como la mayor parte de la rutina principal del micro de la placa *Main*. Con este grupo se debió acordar la interfaz de las diferentes funciones que serían desarrolladas por el grupo HWGlobosats a través de una API.

Antes de analizar la implementación y el flujo de las funciones desarrolladas, se debe señalar que el propósito de las mismas era realizar el manejo de todos los periféricos al

[1] IDE - *Integrated Development Environment*.
[2] http://www.atmel.com/dyn/products/tools_card.asp?tool_id=2725.
[3] http://winavr.sourceforge.net/.

micro, actuando como *drivers*, entre ellos, los sensores, el DUT, la placa de TELEMETRÍA y el GPS y también algunas de las herramientas del micro tales como contadores, el conversor analógico-digital, interfaces serie, etc.

Cabe destacar que para cada una de las funciones o grupos de funciones relacionadas que se detallan a continuación se desarrollaron proyectos dentro de los cuales las mismas eran testeadas, así como el *hardware* que las involucraba. Parte de estos proyectos se detallan en el apéndice D.

9.2. Funciones.

A continuación se explican los contenidos de cada una de las funciones desarrolladas, o de resultar pertinente, se listan los contenidos de los archivos. También se explican los contenidos de los proyectos creados para realizar la prueba de algunas de las funciones, y algunas observaciones relacionadas a las funciones o sus respectivos proyectos de test.

Se pretende que cada sección sea autocontenida. En caso de requerir mayores detalles, consultar el código que se anexa en formato digital.

9.2.1. `adc_init2.c`.

Esta función se encarga de realizar la inicialización del ADC para realizar la medida de sensores de salida analógica y la medición de voltaje de la batería. Recibe como parámetro el número de canal en el que se desee realizar la medida.

```
void adc_init2(int ADC_CH)
```

La secuencia de acciones que se llevan a cabo es la siguiente:

- Se configura el puerto F como entrada (todos los bits). En el puerto F están conectadas todas las señales que se desean convertir.
- Se deshabilitan los resistores de *pull - up* para leer el voltaje deseado correctamente.
- Se deshabilita el bit de reducción de consumo para el ADC.
- Se deshabilita el conversor para descartar cualquier conversión en progreso y poder configurarlo correctamente.
- Se selecciona `AVCC` como voltaje de referencia. En nuestro caso esto equivale a 5,0 V.
- Se elige que los datos en los registros de 8 *bits* del ADC - `ADCH` y `ADCL` - queden ajustados a la derecha[4].
- Se selecciona el canal que se desee convertir, según el parámetro `ADC_CH`. En la tabla B.1 presente en el anexo B se listan las señales conectadas en cada canal.

[4]Referirse por más detalles a las secciones *26.8.4.1* y *26.8.4.2* de [Atmel].

- Terminada la configuración, se habilita nuevamente el conversor[5].

- Se debe incluir la librería `avr/io.h`.

9.2.2. `apagar_DUT.c`.

El funcionamiento de esta función es sencillo. Se trata de levantar la salida en el *bit* 2 del puerto A durante 10 milisegundos y luego volverla a bajar. El *bit* 2 del puerto A está conectado a la bobina de *reset* del relé que provee de alimentación al DUT.

```
void apagar_DUT(void) {

     PORTA   |=   (1 << PA2);   //Apagar relé DUT.
     _delay_ms(10);             //Delay de 10 ms; el relé precisa 5 ms.
     PORTA   &=   ~(1 << PA2);  //Bajo a cero la salida del puerto.

}
```

Se da por descontado que el *bit* 2 del puerto A es inicializado como salida.

- La función `_delay_ms()`; pertenece a la librería `util/delay.h`, la cual se incluye en el preámbulo del archivo.
- Según especificaciones técnicas de los relés utilizados, un pulso de ancho menor a 5 milisegundos no será suficiente para hacerlo conmutar.

9.2.3. `apagar_memorias.c`.

Análogamente a la función 9.2.2, se trata de levantar la salida en el *bit* 6 del puerto A durante 10 milisegundos y luego volverla a bajar. El *bit* 6 del puerto A está conectado a la bobina de *reset* del relé que provee de alimentación a las memorias EEPROM.

```
void apagar_memorias(void) {

     PORTA   |=   (1 << PA6);   //Apagar relé memorias.
     _delay_ms(10);             //Delay de 10 ms; el relé precisa 5 ms.
     PORTA   &=   ~(1 << PA6);  //Bajo a cero la salida del puerto.

}
```

Se da por descontado que el *bit* 6 del puerto A es inicializado como salida.

[5] Esto no significa que el conversor comience a realizar la conversión en ese instante, sino que el comienzo de la conversión se realiza en las funciones de obtención de los datos de los sensores, por ejemplo.

- La función `_delay_ms()`; pertenece a la librería `util/delay.h`, la cual se incluye en el preámbulo del archivo.
- Según especificaciones técnicas de los relés utilizados, un pulso de ancho menor a 5 milisegundos no será suficiente para hacerlo conmutar.

9.2.4. `apagar_sensores.c`.

También en este caso, en esta función se trata de levantar la salida en el *bit* 4 del puerto A durante 10 milisegundos y luego volverla a bajar. El *bit* 4 del puerto A está conectado a la bobina de *reset* del relé que provee de alimentación a los sensores.

```
void apagar_sensores(void) {

     PORTA   |=   (1 << PA4);   //Apagar relé sensores.
     _delay_ms(10);             //Delay de 10 ms; el relé precisa 5 ms.
     PORTA   &=   ~(1 << PA4);  //Bajo a cero la salida del puerto.

}
```

Se da por descontado que el *bit* 4 del puerto A es inicializado como salida.

- La función `_delay_ms()`; pertenece a la librería `util/delay.h`, la cual se incluye en el preámbulo del archivo.
- Según especificaciones técnicas de los relés utilizados, un pulso de ancho menor a 5 milisegundos no será suficiente para hacerlo conmutar.

9.2.5. `EE_PTR_INIT.c`.

El objetivo de esta función es inicializar los punteros de las memorias externas y el número de esclavo del bus TWI correspondiente a la última memoria escrita. Los punteros pueden ser cargados desde la memoria EEPROM interna del `ATmega2560` o ser establecidos en cero.

La decisión es tomada según la causa que provocó el inicio del sistema, si el reinicio del sistema fue comandado por el *Watchdog* los punteros y el número de esclavo se inicializan desde los primeros nueve *bytes* de la memoria interna del micro, en cualquier otro caso es realizada la segunda opción.

♠ La detección del origen del reinicio del sistema se hace a través de un registro en el que se codifican las diferentes causas, tales como *Power-up*, *Watchdog*, programador, etc. La verificación de los *bits* del registro debe realizarse inmediatamente después del arranque del sistema pues la información almacenada podría ser no confiable en otro caso.

9.2.6. `get_DUT_status.c`.

Se encarga de escribir en la UART conectada a la placa DUT un caracter que desencadena el inicio del *test* del DUT. Posteriormente permanece a la espera de la finalización de dicho *test*. De no encontrarse errores en el DUT simplemente se recibirá desde la placa del DUT un *byte* denotando la finalización del *test*. De encontrarse algún error, la placa DUT transmite la ubicación en memoria de dicho error y la de todos los demás encontrados hasta ese instante, finalizando con el caracter de fin de test.

El diagrama de flujo para esta función puede apreciarse en la figura 9.1. Como se señala en el epígrafe de la misma, la acción

está implementada mediante una instrucción `while`, cuya condición de salida es la llegada de un *byte* que denota el fin del *test*. De no presentarse tal situación se permanecerá en dicho bucle hasta que se produzca un *reset* debido al `watchdog timer`.

Los enteros retornados en caso de éxito o error son los siguientes:

✗ `-3` Se produjo un error de timeout debido a la falta de respuesta desde el DUT.

✗ `-2` La placa DUT reportó más errores que el máximo acordado.

✓ `pos_buffer` La placa DUT detectó errores, el flujo de la función se recorrió con éxito, y se retorna el tamaño del *buffer* con todos los *bytes* de reporte.

✓ `0` La placa DUT no detectó errores y el flujo de la función se recorrió con éxito.

✗ `-1` Valor de retorno por *default*. Corresponde a un caso que no se debería presentar, en el que el tamaño del *buffer* que contiene los datos de los reportes de la placa DUT fuera negativo.

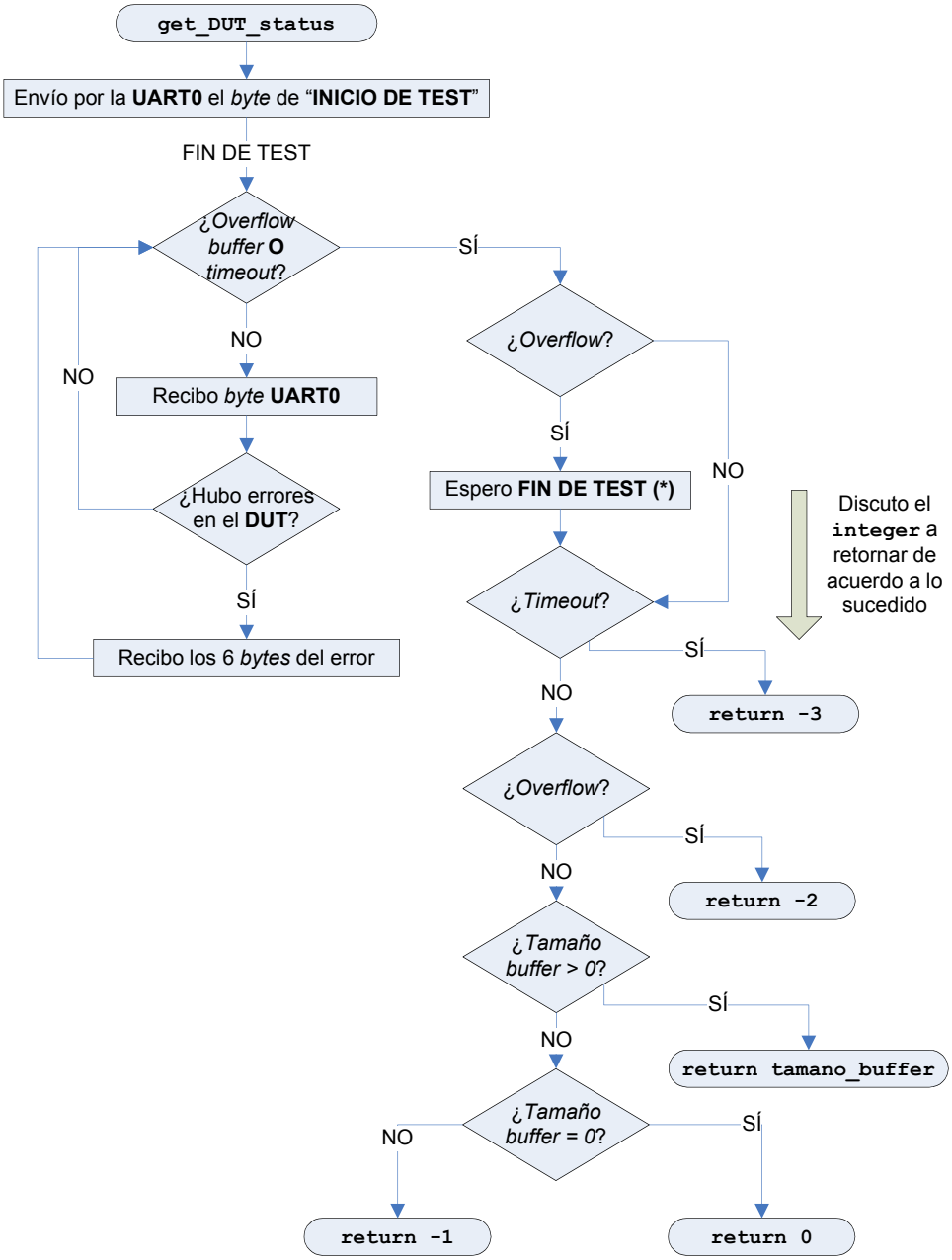


Figura 9.1.: Diagrama de flujo para la función `get_DUT_status`.
(*) La espera del **FIN DE TEST** está implementada mediante un `while`, el cual requiere de una condición la cual, de no presentarse, puede ocasionar que se la función permanezca en un bucle del cual sólo se salga mediante un *reset* provocado por el `watchdog timer`.

- La función `get_DUT_status` hace uso de la función `UART_Recieve`. Consultar la sección 9.2.30.

9.2.7. `get_gps_frame.c`.

Se encarga de seleccionar, de entre todos los mensajes que entrega el GPS, únicamente las tramas GPGGA. Las mismas comienzan con la secuencia ASCII «$GPGGA» y culminan con un caracter de fin de línea y otro de retorno de carro[6].

El diagrama de flujo para esta función se ilustra en la figura 9.2.

Esta función recibe como parámetros un puntero al *buffer* en el que se guardarán los datos, un tamaño máximo permitido para las tramas y punteros a variables que indican si hay un *timeout* para el DUT, el GPS o el PIC:

```
int get_gps_frame(char *buffer , int max_size, unsigned int *DUT_UART_timeoutPtr,

    unsigned int *GPS_UART_timeoutPtr, unsigned int *PIC_UART_timeoutPtr)
```

En caso de ejecutarse satisfactoriamente, se retorna el largo del *buffer* con el mensaje GPGGA. Los códigos de error que se retornan en caso contrario son:

✗ `-1` Llegó un retorno de carro en medio de la trama que se estaba recibiendo.

✗ `-2` La trama se recibió en su totalidad, aunque el tamaño de la misma excede el tamaño máximo acordado (*Buffer Overflow*).

✗ `-3` Ocurrió un *timeout* en la recepción de los *bytes* provenientes del GPS.

[6] `[CR] + [LF]`, *Carriage Return* más *Line Feed*.

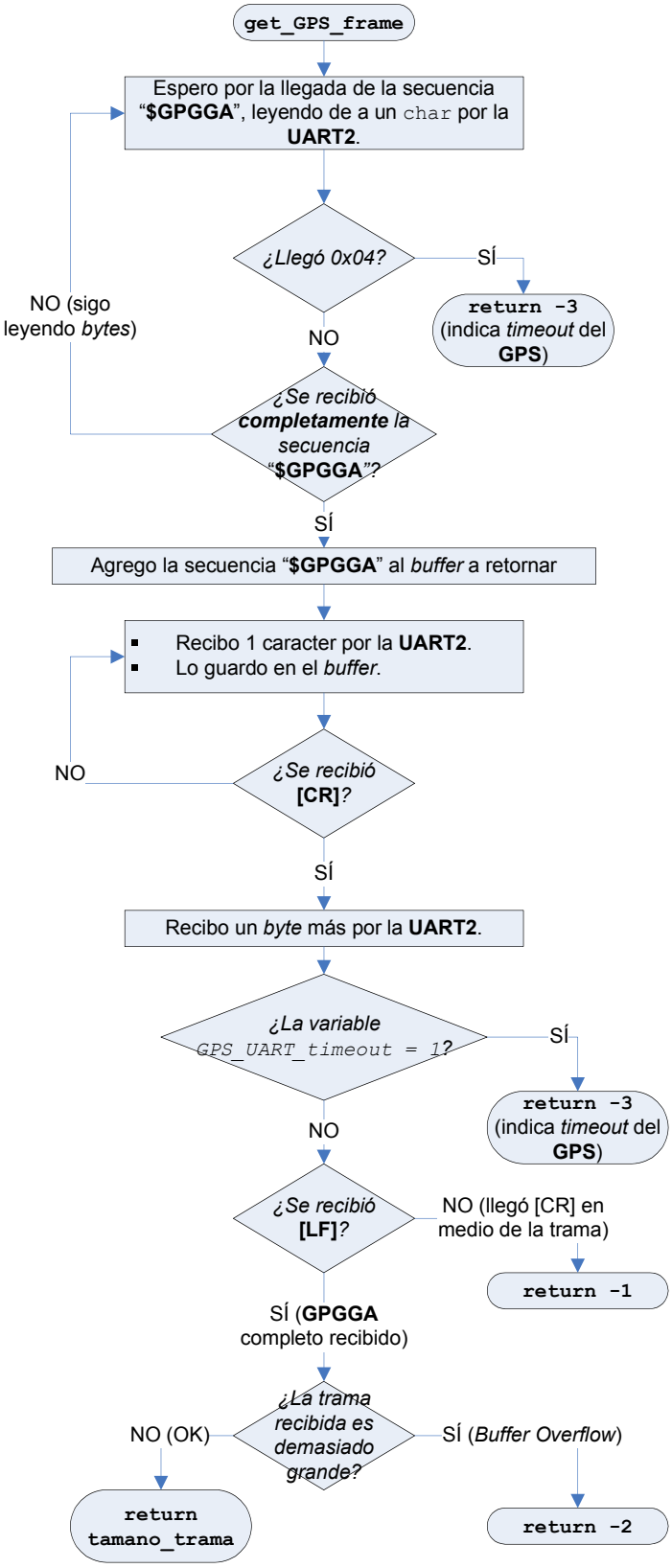


Figura 9.2.: Diagrama de flujo para la función `get_GPS_frame`.

9.2.8. `get_humedad.c`.

Esta función no recibe parámetros y devuelve un *float* con el porcentaje de humedad relativa medido:

```
float get_humedad(void)
```

Como primera acción se inicializa el ADC para que lea el voltaje en el canal 6 - sensor de humedad, y devuelva el resultado en formato *right - adjusted*:

```
adc_init2(6); // Canal 6: humedad.
```

Por detalles de la función de inicialización consultar la sección 9.2.1.

A continuación:

- Se ordena el comienzo de la conversión y se espera la finalización de la misma.
- Se lee el resultado de la conversión (los 2 *bytes*, primero el *byte* bajo y luego el alto, en ese orden):

```
resultado_ADC = ADCL | (ADCH << 8);
//Se lee primero el ADCL porque el bitwise or
 tiene asociatividad de izquierda a derecha.
```

- Calculo el voltaje analógico de entrada del ADC de modo que

$$\mathrm{V}_{analógico} = \text{Resultado } ADC \times \frac{\mathrm{V}_{CC}}{1024}, \text{ donde } \frac{\mathrm{V}_{CC}}{1024} = 1\,\mathrm{LSB} \tag{9.1}$$

- Se calcula y retorna el porcentaje de RH según la ecuación de la hoja de datos del sensor:

$$\%\mathrm{RH} = \frac{\left(\frac{\mathrm{V}_{analógico}}{5{,}0\,\mathrm{V}} - 0{,}16\right)}{0{,}0062} \tag{9.2}$$

- Se debe incluir la librería `avr/interrupt.h`.

9.2.9. `get_presion.c`.

Esta función no recibe parámetros y devuelve un *float* con la presión exterior en hPa:

```
float get_presion(void)
```

Como primera acción se inicializa el ADC para que lea el voltaje en el canal 0 - sensor de presión, y devuelva el resultado en formato *right - adjusted*:

```
adc_init2(0); // Canal 0: presión, PF0.
```

Por detalles de la función de inicialización consultar la sección 9.2.1.

A continuación:

- Se ordena el comienzo de la conversión y se espera la finalización de la misma.
- Se lee el resultado de la conversión (los 2 *bytes*, primero el *byte* bajo y luego el alto, en ese orden):

```
resultado_ADC = ADCL | (ADCH << 8);
//Se lee primero el ADCL porque el bitwise or
 tiene asociatividad de izquierda a derecha.
```

- Calculo el voltaje analógico de entrada del ADC del modo que indica la ecuación 9.1.
- Se calcula y retorna la presión absoluta según la ecuación de la hoja de datos del sensor y se convierte a kPa:

$$\text{Presión} = \frac{\text{V}_{analógico}}{0{,}3\,{}^{\text{V}}/_{\text{psi}}} \times 68{,}9475\,{}^{\text{hPa}}/_{\text{psi}} \tag{9.3}$$

- Se corrige el valor hallado mediante las ecuaciones obtenidas en la calibración (ecuaciones 7.2 y 7.3).
- Se retorna el valor corregido.

- Se deben incluir las librerías `avr/interrupt.h` y `math.h`.

9.2.10. `get_temperatura.c`.

Esta función recibe como parámetro un enumerado con el nombre del sensor de temperatura que se desea leer, y devuelve un `float` con la temperatura indicada:

```
float get_temperatura(enum sensor nombre_sensor)
```

El nombre del sensor puede ser:

✍ **`sensor_temp_int`** Se refiere al sensor de temperatura interior a la cápsula, medida a través del sensor `TMP 100`. En este caso se llama a la función `TMP100_read()`. Referirse a la sección 9.2.25.

✍ `sensor_temp_ext` Se está preguntando por la temperatura externa a la cápsula. En este otro caso se llama la función `tmp_termocupla()`. Referirse a la sección 9.2.27.

En caso de agregarse sensores de temperatura, se debe agregar el nombre del nuevo sensor a la lista de nombres de sensores, especificada en el archivo `api.h`:

```
/*Lista de los sensores de temperatura y humedad.*/
enum sensor {sensor_temp_int,sensor_temp_ext};
```

9.2.11. `get_Vss.c`.

Esta función no recibe parámetros y devuelve un *float* con el voltaje de la batería:

```
float get_Vss(void)
```

Como primera acción se inicializa el ADC para que lea el voltaje en el canal 1 - batería escalada, y devuelva el resultado en formato *right - adjusted*:

```
adc_init2(1); // Batería escalada: channel PF1.
```

Por detalles de la función de inicialización consultar la sección 9.2.1.

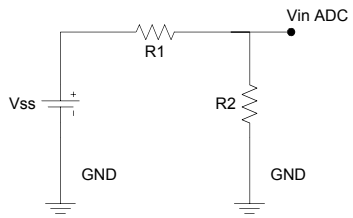


Figura 9.3.: Divisor resistivo para el escalado de la batería.

A continuación:

- Se ordena el comienzo de la conversión y se espera la finalización de la misma.
- Se lee el resultado de la conversión (los 2 bytes, primero el *byte* bajo y luego el alto, en ese orden):

```
resultado_ADC = ADCL | (ADCH << 8);
//Se lee primero el ADCL porque el
bitwise or tiene asociatividad de
izquierda a derecha.
```

- Calculo el voltaje analógico de entrada del ADC del modo que indica la ecuación 9.1.

- Por razones de rangos de voltaje de entrada a los canales del ADC, la medición directa del voltaje de la batería se torna imposible[7]. Es por esto que el mismo se escala mediante un divisor resistivo. De acuerdo a la relación del divisor de la figura 9.3:

$$\mathrm{V}_{IN\,ADC} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}\mathrm{V}_{SS} \tag{9.4}$$

- El factor $\frac{R_2}{R_1+R_2}$ se denomina **`scale`** dentro de la función, y se especifica en la línea «**`#define scale`**» al comienzo de ésta.
- Para finalizar, se despeja y retorna V_{SS} según la ecuación 9.4.

- Se debe incluir la librería `avr/interrupt.h`.
- Se deben medir los valores de las resistencias del divisor e ingresar el valor de `scale`.

9.2.12. `HW_Init.c`.

Se encarga de inicializar dispositivos de *hardware*, a saber:

- Puerto A configurado como salida, puerto F configurado como entrada:
  - El puerto A controla el encendido y apagado de los relés para sensores, DUT y memorias. Además de configurarse como salida, el *bit* cero del puerto A (PA0) se pone en nivel alto inicialmente para que el puerto de salida que controla el quema tanza sea uno, y cuando pase por el inversor quede en cero y el quema tanza no actúe al comienzo. Cuando se llama a la función quema_tanza este *bit* del puerto A se en pone en cero y se corta la tanza.
  - El puerto F se usa como entrada de las señales analógicas hacia el ADC. Además se deshabilitan los resistores de *pull - up* para todos los *bits* de este puerto.
- Se deshabilita la reducción del consumo para el ADC.
- Se inicializan las UARTs:
  - DUT: 9600 BPS, transmisión y recepción habilitadas.
  - GPS: 4800 BPS, transmisión y recepción habilitadas.
  - PIC: 4800 BPS, transmisión y recepción habilitadas.
- Se inicializa la Two Wire Interface:

[7] El rango de entrada para canales configurados en modo *single - ended* es [`GND`, `VREF`], y como se analiza en la sección 5.3.11 la tensión de referencia seleccionada para el ADC es `VCC` = 5,0 V.

  - Se desactiva la reducción de consumo para la TWI.
  - Se fija el reloj a utilizar por la TWI.
  - Se llama a la funciones `TMP100_config()` y `TMP100_temp_reg()`. Referirse a las secciones 9.2.24 y 9.2.26 respectivamente por más detalles.

- Se prenden las memorias. Referirse a la sección 9.2.16.
- Se prenden los sensores. Referirse a la sección 9.2.17.
- Se prenden el DUT. Referirse a la sección 9.2.15.
- Se declaran los *bits* 0 y 1 del puerto G (PG0 y PG1). La salida PG0 controla la grabación o la pausa de la grabación de la cámara a bordo de la carga útil, conmutando entre estos dos estados por cada pulso en este contacto. La misma se fija en nivel alto al comienzo.
- Se inicializa el **`Timer 4`** y se declaran variables necesarias por la rutina de atención a la interrupción del **`Timer 4`**. La rutina de atención a la interrupción del **`Timer 4`** está vinculada a la grabadora. Referirse a las secciones 9.2.22 y 9.2.23 por más detalles.

9.2.13. `memory_write.c`.

Esta función escribe datos a las memorias EEPROM externas al micro que habían sido integradas al sistema como cajas negras. La función es capaz de transferir un *buffer* de hasta 128 *bytes*. Los parámetros que se deben pasarle son: un puntero a la primera posición del *array* en el cual se almacenan los punteros de cada memoria externa y el número de memoria (1 a 4) que se está utilizando, el puntero al primer *byte* del *buffer* de los datos que se desean escribir, y el largo del *buffer*.

En la figura 9.4 se puede observar el diagrama de flujo de la rutina en una primera parte se seleccionan los punteros a utilizar según la memoria que será escrita, luego se pasa a la comunicación a través del bus TWI.

La comunicación se inicia enviando un comando de **`START`**, luego se transmite el *address* del *slave* más el *bit* de **`write`**, posteriormente los dos *bytes* del puntero de memoria, en el orden *high-low*. Finalmente se entra a un bucle en el que se transmiten los datos, una vez terminados estos, se envía un **`STOP`**. Esta secuencia de comandos se puede observar en el diagrama de la figura 9.5. La rutina entonces actualiza el valor del puntero de memoria correspondiente a aquella que fuere escrita y se retorna el control a la rutina principal.

En caso de que la escritura se haya realizado con éxito la función retorna un «`0`», si en cambio hubo errores el valor devuelto es un «`-1`».

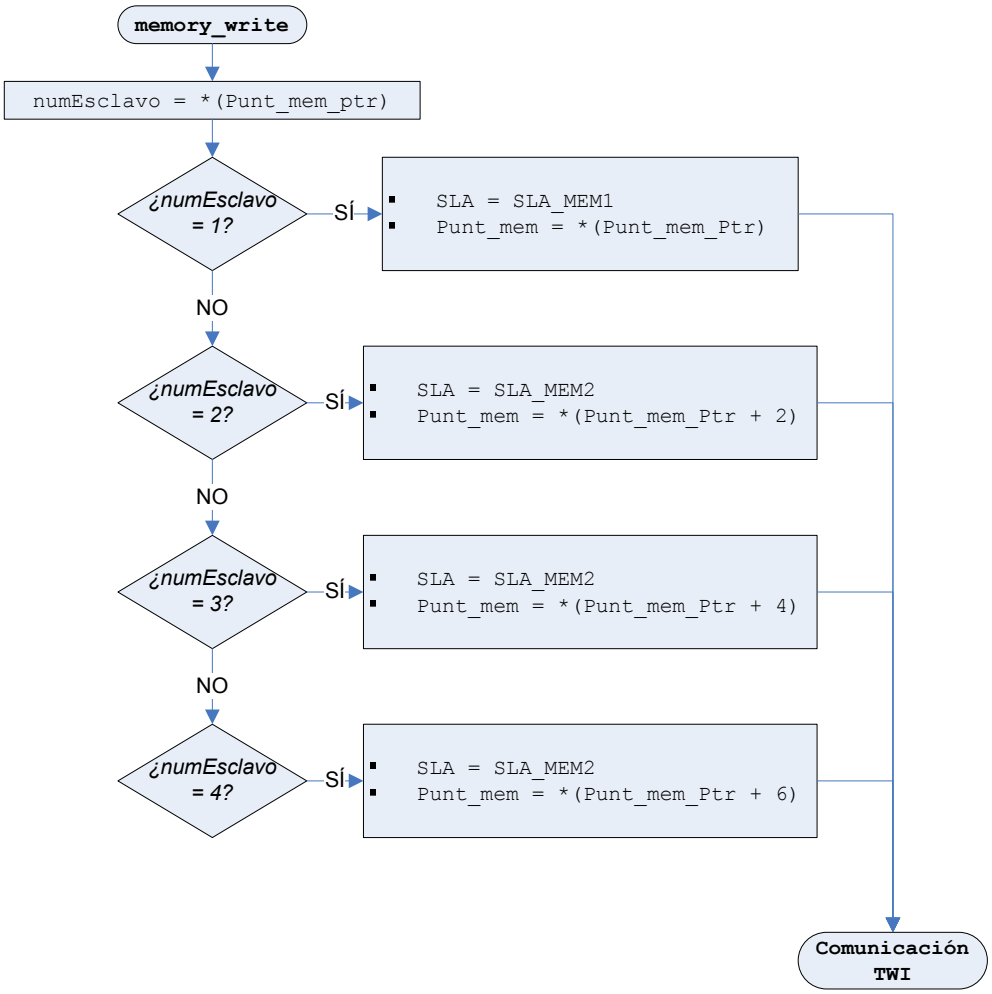


Figura 9.4.: Diagrama de flujo para la primera parte de la función `memory_write`.

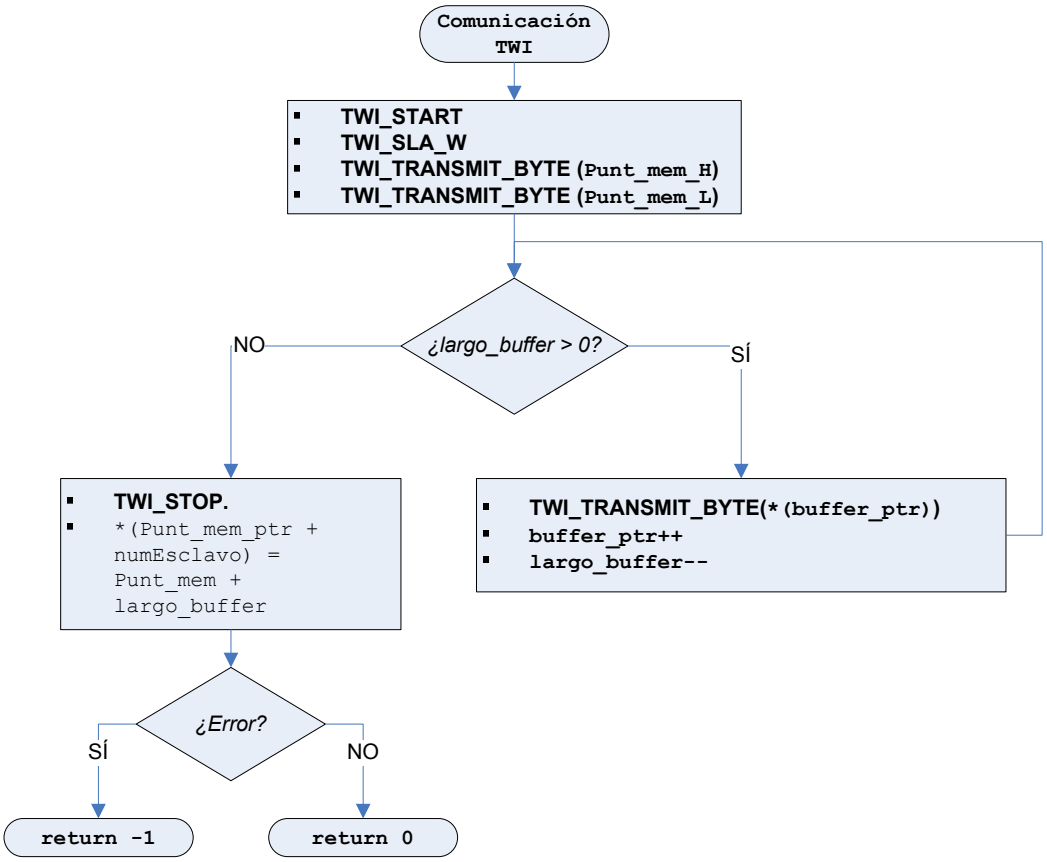


Figura 9.5.: Diagrama de flujo para la segunda parte de la función `memory_write`.

La rutina se había implementado en una primera instancia utilizando variables externas para el almacenamiento de los punteros a memoria, esto trajo algunos problemas, que finalmente fueron solucionados mediante la utilización de punteros a las posiciones de memoria en las que se almacenan los punteros de las memorias externas. A través de los cambios realizados se pueden escribir las memorias externas en cualquier posición de memoria y una cantidad de *bytes* desde 1 a 128.

9.2.14. `OCRnA_16BITWrite.c`.

Se encarga de escribir los **`Output Compare Registers A`**[8] con valores de 16 *bits* pasados como parámetros.

```
void OCRnA_16Bit_WR(unsigned int OCR_Num, unsigned int comparacion)
```

Dado que las escrituras de registros de 16 *bits* son atómicas, se debe deshabilitar toda interrupción durante la escritura de estos registros. Esto se realiza mediante la instrucción

```
cli();
```

La misma borra la **`Interrupt Flag`** del registro de estatus de la CPU. Por lo tanto, para conservar el **`Status Register`** incambiado respecto a su contenido previa ejecución de esta función, se debe guardar su contenido en una variable para volver a cargarlo antes de retornar de la misma.

9.2.15. `prender_DUT.c`.

Se trata de levantar la salida en el *bit* 3 del puerto A durante 10 milisegundos y luego se vuelve a bajar. El *bit* 3 del puerto A está conectado a la bobina de *set* del relé que provee de alimentación al DUT.

```
void prender_DUT(void){

    PORTA   |=   (1 << PA3);   //Prender relé DUT.
    _delay_ms(10);             //Delay de 10 ms; el relé precisa 5 ms.
    PORTA   &=   ~(1 << PA3);  //Bajo a cero la salida del puerto.

}
```

- Se da por descontado que el *bit* 3 del puerto A es inicializado como salida.
- La función `_delay_ms()`; pertenece a la librería `util/delay.h`, la cual se incluye en el preámbulo del archivo.
- Según especificaciones técnicas de los relés utilizados, un pulso de ancho menor a 5 milisegundos no será suficiente para hacerlo conmutar.

[8] Del 1 al 4.

9.2.16. `prender_memorias.c`.

Nuevamente, se trata de levantar la salida en el *bit* 7 del puerto A durante 10 milisegundos y luego volverla abajar. El *bit* 7 del puerto A está conectado a la bobina de *set* del relé que provee de alimentación a las memorias EEPROM.

```
void prender_memorias(void){

     PORTA   |=   (1 << PA7);   //Prender relé memorias.
     _delay_ms(10);             //Delay de 10 ms; el relé precisa 5 ms.
     PORTA   &=   ~(1 << PA7);  //Bajo a cero la salida del puerto.

}
```

- Se da por descontado que el *bit* 7 del puerto A es inicializado como salida.
- La función `_delay_ms()`; pertenece a la librería `util/delay.h`, la cual se incluye en el preámbulo del archivo.
- Según especificaciones técnicas de los relés utilizados, un pulso de ancho menor a 5 milisegundos no será suficiente para hacerlo conmutar.

9.2.17. `prender_sensores.c`.

Otra vez, se trata de levantar la salida en el *bit* 5 del puerto A durante 10 milisegundos y luego volverla abajar. El *bit* 5 del puerto A está conectado a la bobina de *set* del relé que provee de alimentación a los sensores.

```
void prender_sensores(void){

     PORTA   |=   (1 << PA5);   //Prender relé sensores.
     _delay_ms(10);             //Delay de 10 ms; el relé precisa 5 ms.
     PORTA   &=   ~(1 << PA5);  //Bajo a cero la salida del puerto.

}
```

- Se da por descontado que el *bit* 5 del puerto A es inicializado como salida.
- La función `_delay_ms()`; pertenece a la librería `util/delay.h`, la cual se incluye en el preámbulo del archivo.
- Según especificaciones técnicas de los relés utilizados, un pulso de ancho menor a 5 milisegundos no será suficiente para hacerlo conmutar.

9.2.18. `quemar_tanza.c`.

Esta función es tan simple que su contenido se podría haber incluído dentro del código de la rutina principal, pero se decidió encapsular su única instrucción dentro de una función de nombre autoexplicativo con el fin de hacer el manejo de *hardware* transparente al grupo TELEGLOBOSATS.

```
void quemar_tanza(void){
     PORTA &= ~(1 << PA0);
}
```

Lo que se lleva a cabo en el código consiste en darle un valor de nivel bajo a la salida PA0. De este modo, al pasar por un inversor se tendrá un nivel alto que lleva un MOSFET a conducción. La corriente que pasa por el MOSFET calienta el hilo que culmina cortando la tanza.

9.2.19. `send_paq.c`.

Esta función estaba encargada de transmitir los datos a la placa de TELEMETRÍA y a su vez almacenarlos en las EEPROM externas que cumplen la función de caja negra.

El registro de los datos se realizó de manera que fuera transparente a la rutina principal, siendo que el manejo de los punteros y el orden en que se escribían los mismos fuera manejados por esta rutina. La escritura era realizada de forma que las tramas a transmitir se almacenaban una a continuación de la otra, y una vez que se completaba una memoria se pasaba a la siguiente según el número de esclavo de *bus* TWI de las mismas.

A la función se le debían pasar como parámetros un puntero al primer dato del *buffer* que se desea transmitir y almacenar y otro puntero a la primera posición del *array* donde se guardan los valores de los punteros de las memorias externas y el número de memoria que se escribió por última vez.

El primer paso es determinar el puntero de memoria a utilizar según el número de esclavo actual. Luego se calcula el valor máximo que puede tomar el puntero de memoria en la próxima escritura sumándole al puntero actual 128, que es el número máximo de *bytes* que se pueden almacenar en una escritura. Si esta suma provoca *overflow* se incrementa el número de memoria a escribir para la próxima vez que se convoque la función.

Luego de esto se ingresa en un *loop* del cual se sale cuando se encuentra el primer dato nulo en el *buffer* (`0x00`). Dentro del *loop* se transmiten los *bytes* uno a uno por la UART3, y se escriben a memoria a menos que todas se encuentren completas. Cuando se sale del *loop* se retorna a la rutina principal devolviendo un «`-1`» en caso de que las memorias estén llenas y un «`0`» en caso contrario.

El diagrama de flujo para esta función se ilustra en la figura 9.6.

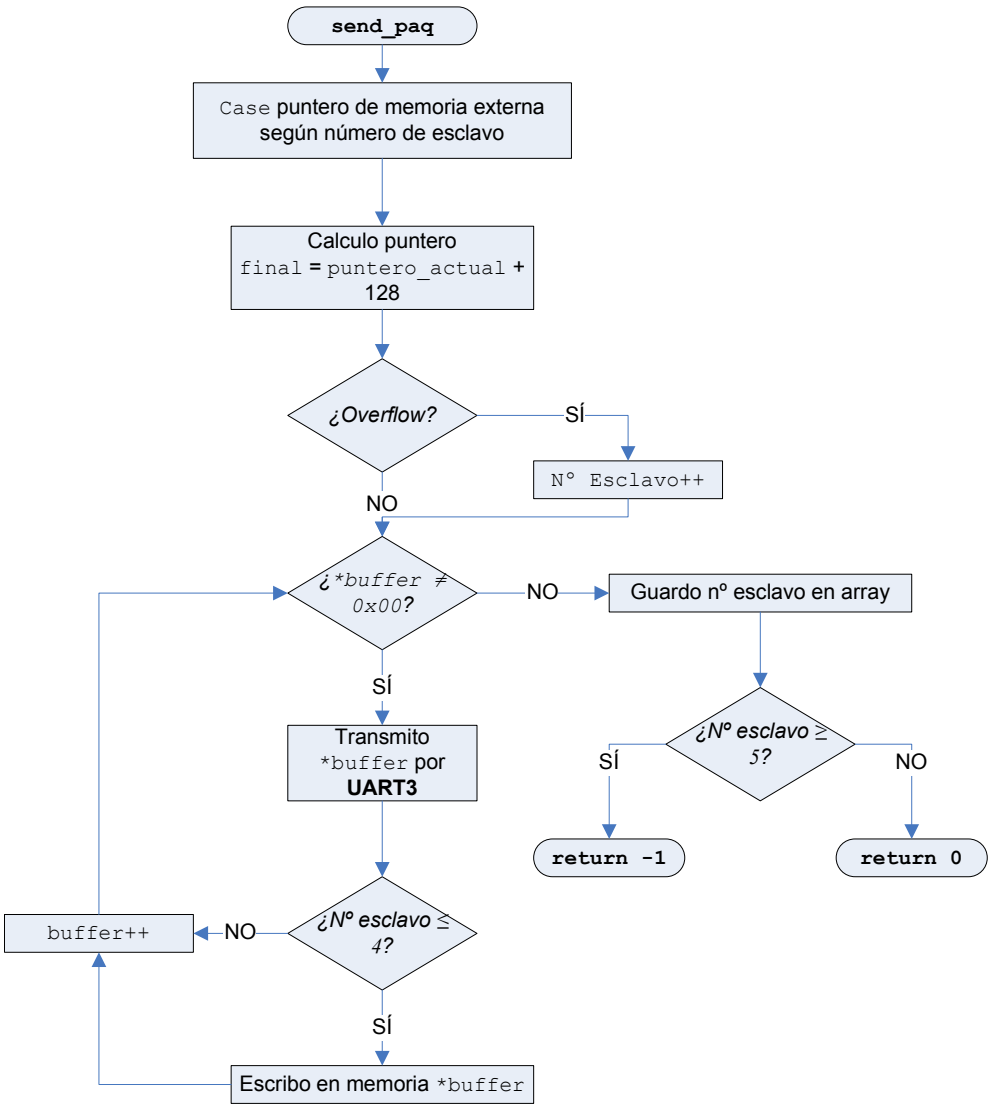


Figura 9.6.: Diagrama de flujo de la función `send_paq`.

9.2.20. `TIM_16BitReset.c`.

Esta función escribe el valor «`0x00`» en el *timer* que se le indique mediante los enteros `1`, `3`, `4` ó `5`[9].

```
void TIM_16BitReset(unsigned int TIM_Num)
```

Al ser una escritura de un registro de 16 *bits*, vale la misma observación que para la función de la sección 9.2.14.

9.2.21. `timer1_init.c`.

Se encarga de inicializar el **`Timer 1`** para que cuente una cantidad de segundos `tiempo_segundos`:

```
void TIMER1_Init(unsigned int tiempo_segundos)
```

La secuencia de acciones en esta función es la siguiente:

- Se desactiva la reducción de consumo para el **`Timer 1`**.
- Se fija el modo de operación para el **`Timer 1`**:
  - Modo `Clear Timer on Compare` (CTC).
  - **`TOP`** = **`OCR1A`**.
  - Actualización de **`OCR1x`**: Inmediata.
  - **`TOV1 Flag`** seteada en **`MAX`**.
- Frecuencia del *timer/counter*: $f_{CLK}/1024$.
- Se resetea el valor del **`Timer 1`**. Se realiza mediante la sentencia «`TIM_16BitReset(1);`» . Consultar la sección 9.2.20.
- Calculo el número a cargar en el **`Output Compare Register`**: $tiempo \times \frac{f_{CLK}}{1024}$. Observación: "*tiempo*" no puede ser cualquier valor, $tiempo_{\text{máx}} = 8$ segundos aproximadamente.

9.2.22. `timer4_init.c`.

Es casi idéntica a la función de la sección 9.2.21, con la excepción de la sentencia

```
/* Habilito que interrumpa cuando el valor del timer iguale el OCR1A */
TIMSK4 |= (1 << OCIE4A);
```

[9] Estos valores coinciden con la numeración que se les da a los *timers* de 16 *bits* en la hoja de datos del ATmega2560 [Atmel].

la cual se incluye con el fin de que el `Timer 4` pueda interrumpir.

- Observación:
  - Para que el `Timer 4` efectivamente interrumpa, deben estar globalmente habilitadas las interrupciones, por ejemplo mediante la ejecución de la instrucción «`sei()`» en la función `main`.

9.2.23. `Timer4_Interrupt.c`.

El objetivo de esta función es conmutar el estado de la cámara filmadora entre **`grabando`** y en **`pausa`**. Esta conmutación debe darse cada 5 minutos, para lo cual se decidió utilizar uno de los contadores disponibles del microcontrolador. El tiempo equivalente a la cuenta regresiva establecida para el contador es de 6 segundos por lo que serán contadas 50 interrupciones del contador para forzar a cero durante 100 ms el *pin* que comanda el cambio de estado de la cámara.

Como se puede apreciar en diagrama de flujo de la figura 9.7 cada vez que se atiende la interrupción se reinicia la cuenta e incrementa el contador. Cuando el contador alcanza el valor establecido que es 50, según el estado **`ON`** u **`OFF`** de la cámara se fuerza a cero el *pin* del micro, se reinicia el contador y se conmuta el valor de la variable de estado **`ON/OFF`**.

La rutina fue pensada de forma que cuando se contara con la información del estado real de la cámara se pudiera modificar los valores de tiempo de forma asimétrica controlando el tiempo en que la cámara está **`filmando`** o en **`pausa`**.

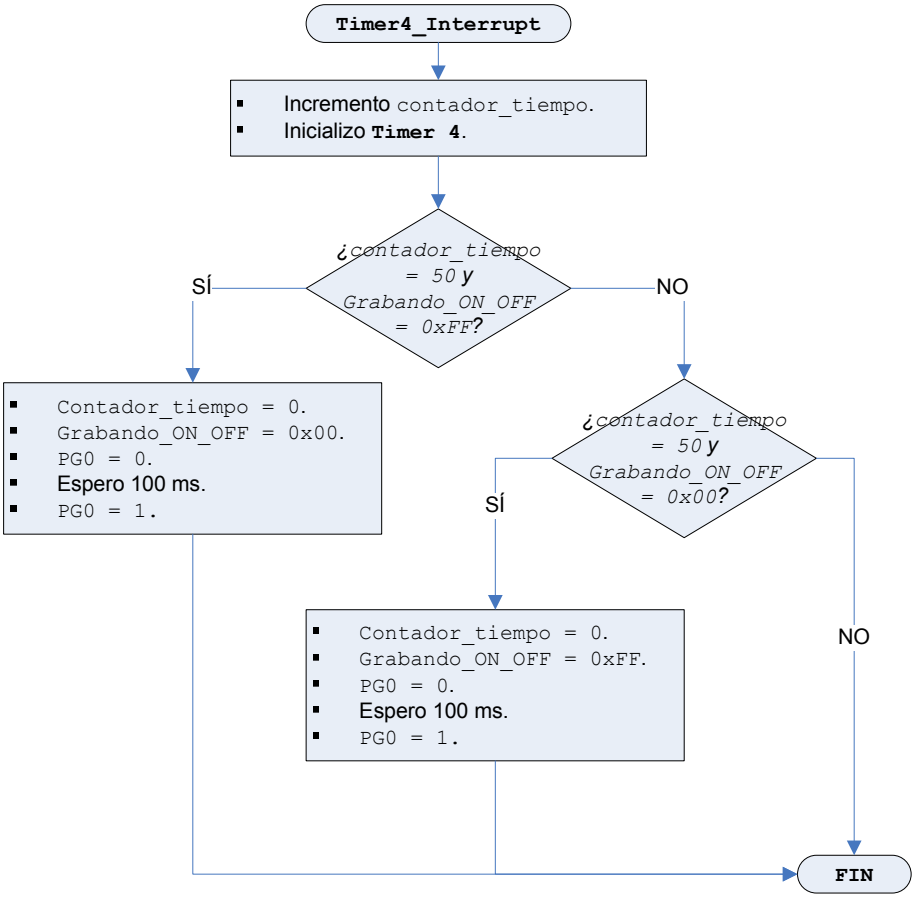


Figura 9.7.: Diagrama de flujo para la función `Timer4_Interrupt`.

9.2.24. `TMP100_config.c`.

Dentro de este archivo hay dos funciones:

✍ **`TMP100_config`** Configura los parámetros para la medición de la temperatura desde el `TMP 100`. La secuencia de acciones dentro de esta función se ilustra en la figura 9.9a.

✍ **`TMP100_temp_reg`** Configura el `TMP 100` para que cuando se realiza una lectura, ésta sea del registro de temperatura. Consultar la sección 9.2.26.

9.2.25. `TMP100_read.c`.

El objetivo de esta función es leer la temperatura almacenada en el registro correspondiente del sensor de temperatura interna. Para ello previamente se debe haber invocado la función `TMP100_temp_reg` con el fin de configurar el registro de control de forma que cuando se inicie el proceso de lectura por el microcontrolador el `TMP 100` devuelva el valor de la temperatura.

La rutina inicia la comunicación enviando un **`START`** desde el maestro del bus TWI y a continuación la dirección del esclavo y la operación que se desea realizar, en este caso una lectura. Entonces se procede a esperar el envío por parte del esclavo de los dos *bytes* correspondientes a la lectura de la temperatura interna y finalmente se termina la secuencia de comunicación a través de un comando de **`STOP`**. Por último se calcula el valor de la temperatura a partir de los datos recibidos desde el sensor.

La secuencia de acciones que se llevan a cabo dentro de esta función se ilustra en la figura 9.8.

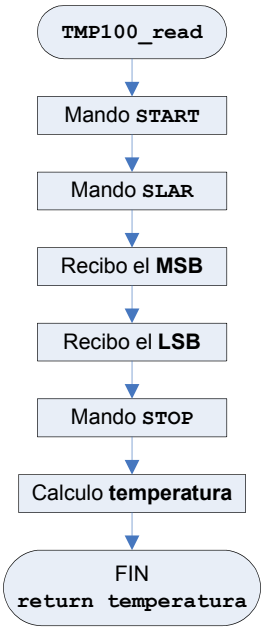
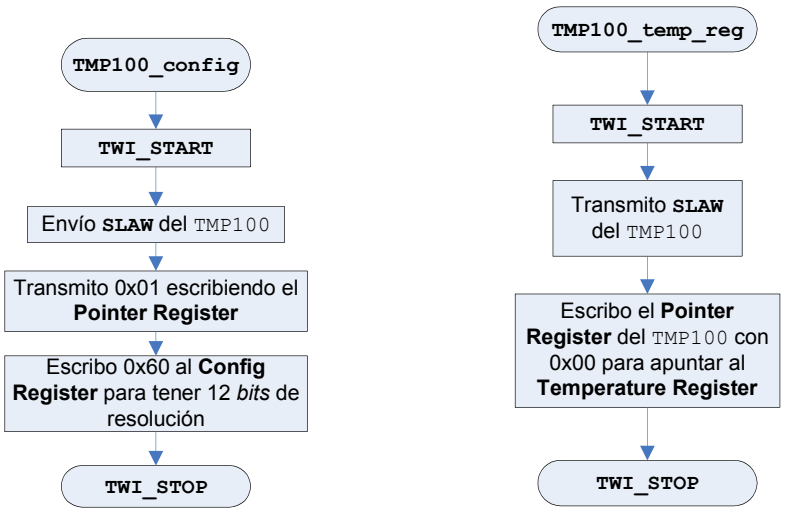


Figura 9.8.: Diagrama de flujo para la función `TMP100_read`.



(a) Diagrama de flujo de la función `TMP100_config`.

(b) Diagrama de flujo de la función `TMP100_temp_reg`.

Figura 9.9.: Diagramas de flujo para las funciones del archivo `TMP100_config.c`.

9.2.26. `TMP100_temp_reg`.

La secuencia de acciones dentro de esta función se muestra en la figura 9.9b.

9.2.27. `tmp_termocupla.c`.

Esta función no recibe parámetros y devuelve un `float` con la temperatura exterior en ^{o}C:

```
float tmp_termocupla(void)
```

Como primera acción se inicializa el ADC para que lea el voltaje en el canal 5: voltaje procedente de la placa de *amplificación - compensación* de la termocupla, y devuelva el resultado en formato *right - adjusted*:

```
adc_init2(0); // Canal 0: presión, PF0.
```

Por detalles de la función de inicialización consultar la sección 9.2.1.

A continuación:

- Se ordena el comienzo de la conversión y se espera la finalización de la misma.
- Se lee el resultado de la conversión (los 2 *bytes*, primero el *byte* bajo y luego el alto, en ese orden):

```
resultado_ADC = ADCL | (ADCH << 8);
//Se lee primero el ADCL porque el bitwise or
 tiene asociatividad de izquierda a derecha.
```

- Calculo el voltaje analógico de entrada del ADC del modo que indica la ecuación 9.1.
- Se corrige el valor hallado mediante las ecuaciones obtenidas en la calibración (ecuaciones 7.7 y 7.11).
- Se retorna el valor corregido.

- Se debe incluir la librería `avr/interrupt.h`.

9.2.28. `TWI_COMM.c`.

En este archivo están las principales funciones para enviar comandos por el *bus* TWI. Para tener una mejor comprensión de la mecánica de los comandos que se explican en esta sección se sugiere consultar [Micr05, TI05].

Los comandos implementados son:

✍ **`START`.** Similar a **`REP_START`** y **`STOP`**. No se le pasan parámetros. Se comprueba el código del `status register` para comprobar el comando.

✍ **`REP_START`.** Similar a **`START`** y **`STOP`**. No se le pasan parámetros. Se comprueba el código del `status register` para comprobar el comando.

✍ **`STOP`.** Similar a **`START`** y **`REP_START`**. No se le pasan parámetros. Sólo se envía el comando.

✍ **`SLA+R`.** Se le pasa un *byte* conteniendo una dirección más un *bit* que indica que se quiere leer en esa dirección.

✍ **`SLA+W`.** Se le pasa un *byte* conteniendo una dirección más un *bit* que indica que se quiere escribir en esa dirección.

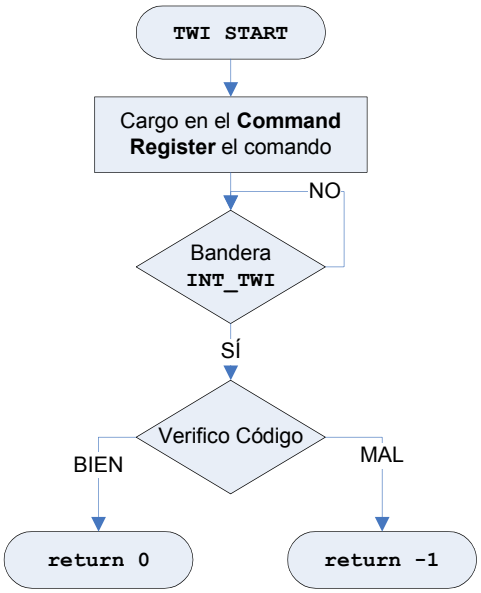


Figura 9.10.: Diagrama de flujo para el comando `START`.

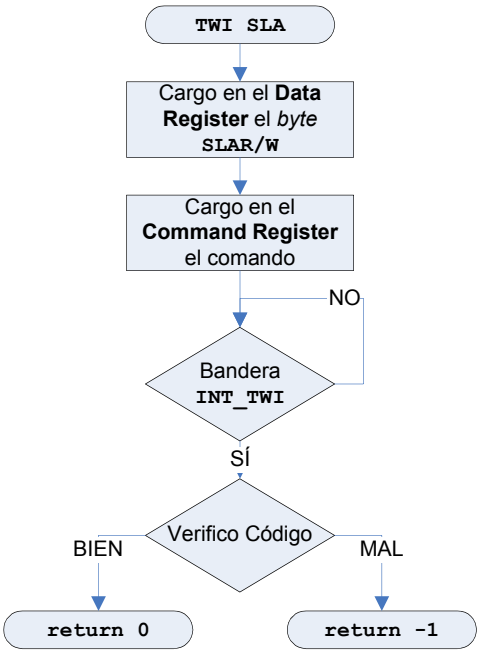


Figura 9.11.: Diagrama de flujo para los comandos `SLA+R` y `SLA+W`.

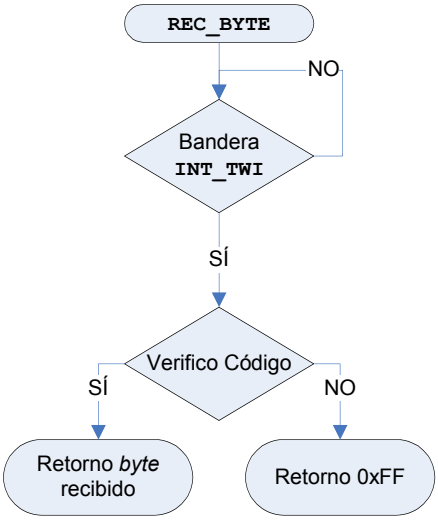


Figura 9.12.: Diagrama de flujo de los comandos `REC_BYTE_ACK` y `REC_BYTE_NACK`.

✍ **`TRANS_BYTE`.** Es similar a las anteriores, pero en lugar de recibir como parámetro un *byte* con `Address` + `bit de R/W`, se le envía un *byte* a transmitir. El diagrama de flujo es el mismo que para **`SLA+R`** y **`SLA+W`**.

✍ **`REC_BYTE_ACK`.** No se le pasan parámetros. Devuelve el *byte* recibido. Se le indica al esclavo mediante *acknowledge* que se recibió correctamente un *byte* y se pueden seguir recibiendo más. El diagrama de flujo para este comando se ilustra en la figura 9.12.

✍ **`REC_BYTE_NACK`.** No se le pasan parámetros. Devuelve el *byte* recibido. Es sólo necesario para el último *byte* recibido, ya que después de esta instrucción el *master* enviará una condición de **`STOP`**. El diagrama de flujo para este comando se ilustra en la figura 9.12.

En la figura 9.10 se aprecia el diagrama de flujo del comando **`START`**, mientras que el diagrama de flujo para los comandos **`SLA+R`** y **`SLA+W`** se observa en la figura 9.11.

9.2.29. `UART_Init.c`.

Esta función se encarga de inicializar una UART específica, fijando su *baudrate* y habilitando / deshabilitando transmisión y recepción para esa UART:

```
void UART_Init(int UART_num, int BPS, int ena_TX, int ena_RX)
```

Observaciones:

- Al comienzo de la función se divide el parámetro BPS entre 100, ya que de lo contrario, los tamaños de los tipos de datos involucrados en las operaciones hacen que

se obtengan resultados incorrectos en la configuración de la UART. Posteriormente se cargan los registros de configuración del *baudrate* de la respectiva UART (UART número `n`):

```
UBRRnH   =   (unsigned char)(ubrr >> 8);   /* High byte */
UBRRnL   =   (unsigned char)(ubrr);        /* Low byte */
```

Donde

```
ubrr = (f_cpu/(16*BPS))-1;
```

con BPS ya dividido entre 100, como ya se indicó.

- Se de debe realizar la deshabilitación de la reducción de consumo para esa UART.

9.2.30. `UART_Recieve.c`.

Esta función devuelve un `unsigned char` que va a buscar a la UART que se le indique. A su vez, recibe como parámetros punteros a variables que indican si ocurrió un *timeout* del DUT, del GPS o del PIC:

```
unsigned char UART_Recieve(int uart_num, unsigned int *DUT_UART_timeoutPtr,
      unsigned int *GPS_UART_timeoutPtr, unsigned int *PIC_UART_timeoutPtr)
```

La secuencia de acciones que se llevan a cabo en esta función para el caso de la UART0[10] se puede apreciar en el diagrama de flujo de la figura 9.13. En el caso de las UARTs restantes, no se requería esperar tanto tiempo como en el caso del DUT[11], por lo que no se hizo necesaria la inclusión de un «*contador de seis segundos*» y la implementación se tornó más sencilla. Es posible cargar el valor del *timeout* directamente en el registro de comparación de 16 *bits* (`OCR1A`).

El valor de *timeout* para las UARTs restantes se indica en las sentencias:

✍ **UART1.** No está en uso. Dos segundos de *timeout*.

```
TIMER1_Init(2);
```

✍ **UART2.** UART del GPS. Cuatro segundos de *timeout*.

```
TIMER1_Init(4);
```

✍ **UART3.** UART de telemetría. Dos segundos de *timeout*.

```
TIMER1_Init(2);
```

[10] UART del DUT.
[11] 12 segundos.

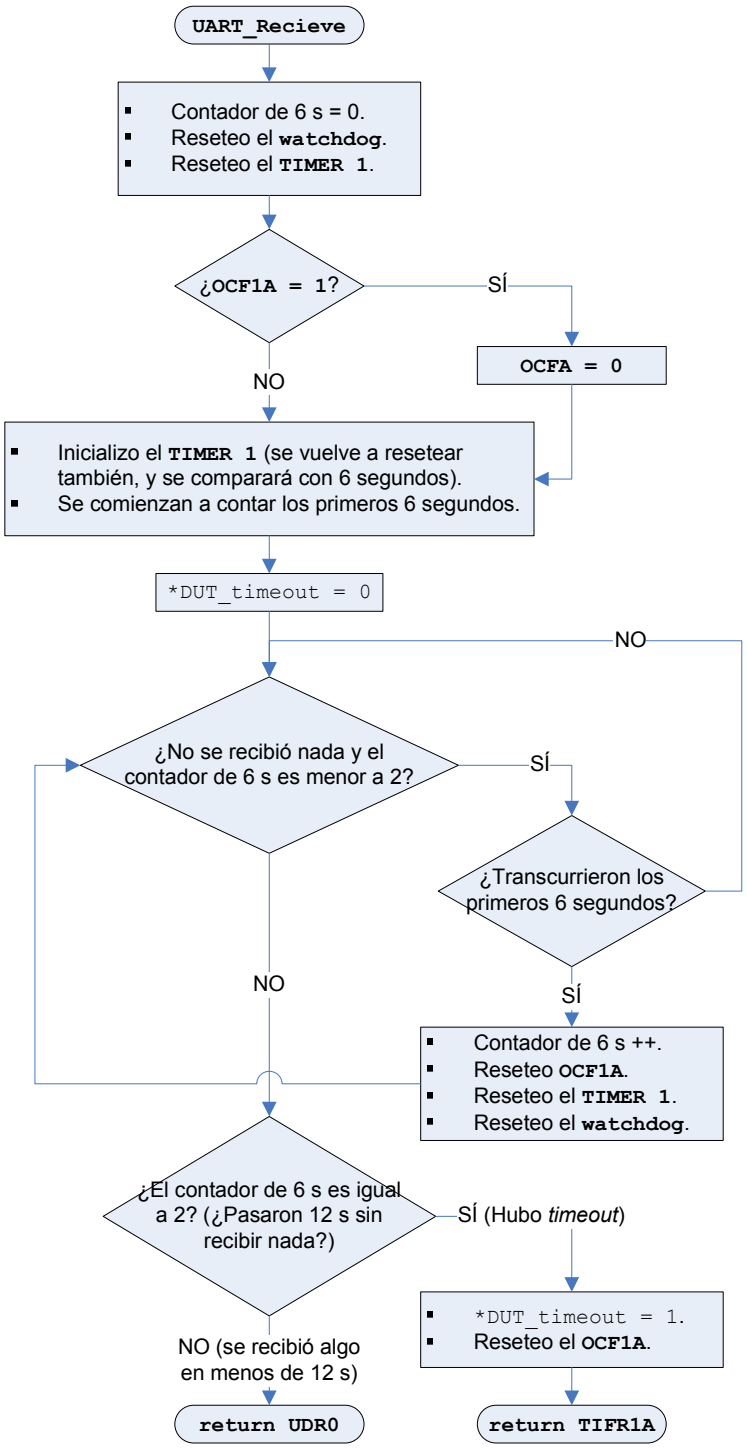


Figura 9.13.: Diagrama de flujo de la función `UART_Recieve`.

- Esta función hace uso de las siguientes funciones:
  - `TIMER1_Init`. Consultar la sección 9.2.21.
  - `TIM_16BitReset`. Consultar la sección 9.2.20.
  - `wdt_reset`. Función implementada en la librería AVR Libc.
- El **`OCF1A`** (**`Output Compare Flag 1 A`**) es un *bit* del registro **`TIFR1A`**, que cuando es igual a 1 indica que el **`TIMER 1`** ha igualado al valor cargado en el registro **`OCR1A`** (**`Output Compare Register 1 A`**). Para resetear este *bit se debe escribirlo con un 1.*

9.2.31. `Uart_transmit.c`.

Esta función transmite un `char` que se le pasa como argumento por la UART que también se le especifique mediante un entero del 0 al 3[12][13]:

```
void UART_Transmit(unsigned char data, int UART_num)
```

La función se encarga de esperar que la UART indicada esté habilitada para la transmisión e introduce el `char` en el *data register* de la UART en cuestión.

9.2.32. `WD_Int.c`.

Esta función atiende la interrupción provocada por el *WatchDog*, este último es un sistema *hardware* que tiene como objeto evitar la paralización del sistema, provocando su reinicio en caso de que lo anterior suceda. Antes de provocar el *restart* es posible ejecutar algunas instrucciones para respaldar el estado de las variables que se crean necesarias.

En nuestro caso lo imprescindible es guardar los valores de los punteros de las memorias externas para que cuando se reinicie el sistema no se sobreescriban los datos recabados antes de la falla que provocó la actuación del *watchdog*. Para esto la rutina de atención de la interrupción del *WatchDog* ejecuta nueve sentencias prácticamente idénticas en las que se almacenan en la EEPROM interna del microcontrolador los cuatro punteros de las memorias externas más el número correspondiente a la memoria que en ese momento se estaban cargando datos.

Se escriben entonces nueve *bytes* en las primeras nueve direcciones de la EEPROM del micro, mediante una función que se encontraba implementada en la librería del AVR Studio. El formato de la sentencia es el que sigue, variando `i` de 1 a 9:

```
_EEPUT(0x00 + i, Punteros_memorias[i]);
```

[12] La numeración de las UARTs es coherente con la numeración que se puede ver en la hoja de datos del `ATmega2560`.

[13] Actualmente la UART1 no está en uso, pero para el último diseño de la placa Main se podrá realizar la transmisión de datos por esta UART.

9.3. Consideraciones adicionales.

En la rutina principal se debieron incluir la declaración de algunas variables y algunas sentencias de forma de lograr el correcto funcionamiento del *software*. Entre las variables que se declararon está el *array* en el que se almacenan los punteros de las memorias externas y el número de memoria actual. Además eran necesarias algunas variables para el funcionamiento de la rutina de atención a la interrupción del *timer4* y las rutinas de recepción de datos por las UARTs.

Las cinco primeras sentencias de la rutina principal, que se ejecutan antes de ingresar al *loop* infinito de la misma, son las siguientes:

```
Punt_Mem_Ptr = &Punteros_memorias[0];
EE_PTR_Init(Punt_Mem_Ptr);
sei();
(WDTO_8S);
WDTCSR |= (1 << WDIE);
```

En la primera se inicializa el puntero a la dirección de memoria del primer elemento del *array* en el que como se dijo, se almacenan los punteros de las memorias externas. Luego se ejecuta la rutina 9.2.5 que verifica la causa por la cual se inició o reinició el sistema e inicializa los punteros de las memorias externas. En el caso en que se reiniciara como consecuencia de la actuación del *WatchDog*, los punteros de las memorias externas son cargados al *array* desde la memoria EEPROM del micro, mientras que en cualquier otro caso son inicializados en cero.

En los tres restantes comandos se habilitan las interrupciones globales, se escribe el valor del *timer* del *WatchDog* en ocho segundos y finalmente se setea la bandera de interrupciones del último.

9.4. Programación y Reset.

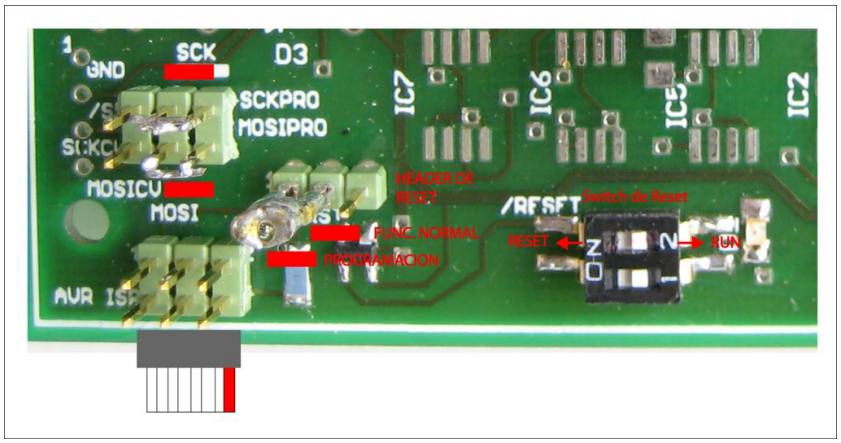


Figura 9.14.: Indicación de la posición de los *headers* y el *switch* según la función que se desee.

5	*3*	*1*
/RESET_ISP	SCKPROG	MISO
GND	MOSIPROG	5.0V
6	*4*	*2*

Cuadro 9.1.: Pinout de conector ISP en placa. Referirse al conector para programación en la figura 9.14.

- El programador AVRISP MKII se conecta al conector de 6 pinos etiquetado como AVR ISP. El lado rojo del cable debe estar del lado del *pin* 1 del conector.
- En el conector de 3 pinos etiquetado como `/RST`, el jumper debe estar entre los pinos 1 y 2.
- En el conector de 6 pinos etiquetado como `SCK`, 2 *jumpers* deben colocarse, uno desde el del medio de fila 1 y el *pin* etiquetado como `SCKPRO` y el otro desde el del medio de fila 2 y el *pin* etiquetado como `MOSIPRO`.
- Cuando no se esta programando el micro, el *jumper* del conector `/RST` debe estar entre los pinos 2 y 3.
- En esta posición el `reset` del micro se controla con el *switch* 2 de la llave `/RESET`.

Posición Switch 2	Estado del micro
ON	Reseteado
OFF	Corriendo

9.5. Primera programación del microcontrolador.

Dado que en la placa MAIN se utiliza un oscilador externo de 8,0 MHz, se deberán programar durante la primera programación del microcontrolador algunos *fuse bits*. Para ello, una vez iniciado el programa AVR STUDIO®, deberemos dirigirnos al menú

Tools → Program AVR → Auto Connect

y seleccionar:

- `SUT_CKSEL = Ext. Crystal Osc. 8.0 - MHz; Start-up time: 258 CK + 65 ms.`
- `CKDIV8:` activarlo si se desea usar el preescaler para tener una frecuencia interna de 1 MHz.
- `CKOUT:` activarlo si se desea tener el reloj interno en el bit 7 del puerto E (*pin* 9, cuidado si se manipula una punta de osciloscopio, el *pin* 10 es `VCC`). Por ejemplo para verificar si esta funcionando el reloj interno.

10. Liberaciones.

En este capítulo trataremos, en una primera sección 10.1, de explicar todos los aspectos que están relacionados con la realización de liberaciones de globos sonda de forma general, describiendo los métodos y procedimientos utilizados, dando pautas sobre la organización, planificación y ejecución; lo que se da a conocer generalmente por el nombre de ***Logística***. Se debe señalar que estos conocimientos fueron adquiridos a través del estudio de experimentos similares realizados por grupos de estudio y aficionados de todo el mundo, y a través de la propia experiencia adquirida con la realización de las liberaciones. También en este capítulo serán detallados los objetivos, motivaciones, problemas, resultados y conclusiones de éstas.

La descripción una a una de las liberaciones, desde su preparación hasta su finalización tratando de seguir el natural desarrollo cronológico de los acontecimientos, puede ser consultada en las secciones E.1, E.2 y E.3 del anexo E. El objetivo del relato no es la descripción fidedigna y contundente de un experimento científico, sino la transmisión de lo vivenciado por los que participaron en los acontecimientos.

10.1. Logística.

10.1.1. Introducción.

A la hora de la realización de una liberación, la logística juega un rol muy importante. Se entiende por logística como el conjunto de medios y métodos necesarios para llevar a cabo la organización de una empresa, o de un servicio, especialmente de distribución [Ra01]. En el caso del presente proyecto podríamos sustituir uno de los conceptos como empresa, servicio o distribución, por experimento científico.

En esta sección se describirán los medios y métodos necesarios, como se extrae de la definición, para la poder llevar a cabo la liberación de un globo estratosférico. Lo que se pretende es que sirva de guía para otros grupos en futuras liberaciones, de forma de conservar el *know-how* adquirido.

10.1.2. Métodos, Tareas y Medios para la liberación de un globo estratosférico.

El primer y fundamental paso es la fijación de una fecha estimada para la liberación, ya que todo lo demás se hará en función de esa fecha. Es conveniente que esta decisión sea

tomada en conjunto entre todos los que participarán, de manera que se tengan en cuenta las necesidades y condiciones de todos. Es necesario que este paso se de con la suficiente antelación o de forma equivalente que la fecha escogida otorgue un período de tiempo de preparación lo suficientemente prolongado para la correcta ejecución del experimento.

Simultáneamente a la decisión anterior, deben dejarse claros los objetivos vinculados con el experimento a grandes alturas que se desea llevar a cabo, marcando principalmente aquellos que son prioritarios, lo cuál resaltará de forma concisa las tareas que deben cumplirse indefectiblemente, sin las cuales no será posible la realización de la liberación ya que no podría cumplirse con los objetivos marcados.

En principio estos objetivos serán específicos de cada experimento en particular, pero salvo casos muy especiales existen dos sistemas fundamentales para la realización de los mismos y debe ser asegurado su correcto funcionamiento para el desarrollo exitoso de la experiencia. Estos sistemas son:

- ✍ **Sistema de posicionamiento global.** Se utiliza para conocer la posición, y de esta manera poder rllevar a cabo el seguimiento y posterior búsqueda de la cápsula.
- ✍ **Sistema de transmisión de datos.** A través de este sistema se reciben en tierra los datos del GPS, temperatura, presión atmosférica y otros.

En la misma reunión en que se trazan los objetivos y se marca la fecha para la liberación o en una reunión siguiente se deben establecer las tareas, confeccionando una *tasklist*, en la cual se enumeran las tareas y además se asignan los responsables de cada una. Esta lista servirá para chequear a medida que transcurre el tiempo aquellas tareas que se cumplieron y cuales aún se encuentran pendientes.

En la misma lista u otra (*checklist*) se deben incluir los recursos necesarios conjuntamente con la fuente que brindará dicho recurso. En el caso de que aquellos provengan de una fuente externa al proyecto tales como una empresa o una fundación debe quedar claro quien será el encargado de la tramitación ante las mismas.

A continuación se listarán todas aquellas tareas y recursos que se creen necesarios para poder llevar adelante un experimento como el que estamos describiendo.

- ✍ **Supervisión.** Como en todo proyecto que es llevado adelante debe haber una o varias personas encargadas de supervisar el cumplimiento de lo planificado. Estas personas estarán encargadas de verificar que los responsables de cada tarea están cumpliendo con las mismas en tiempo y forma como fuera asignado a través de la *tasklist* o *cheklist* en el caso de asignación de recursos que debían conseguirse.
- ✍ **Implementación del funcionamiento del sistema.** En este caso los encargados serán los grupos de estudiantes, que deberán asegurar el correcto funcionamiento del sistema de forma que se pueda cumplir con los objetivos experimentales planteados.
- ✍ **Tareas de tramitación.** Se deben llevar a cabo varios trámites ante diferentes entidades. Entre los principales se encuentran: tramitación del permiso para la liberación ante autoridades de la Fuerza Aérea, tramitación de permisos en facultad para el ingreso a la misma durante fines de semana, negociaciones para la obtención de

recursos financieros con autoridades del Instituto de Ingeniería Eléctrica o fundaciones, pedidos de recursos materiales a empresas privadas tales como AGA y Bromyros, quienes suministraron el gas y el poliestireno expandido respectivamente.

✍ **Tarea de suministro de recursos.** De acuerdo a las posibilidades de cada persona les será asignado el suministro de algunos recursos que se deben estar disponibles para la liberación. El espectro de cosas que se necesitan o pueden ser útiles es muy amplio, abarcando desde los vehículos hasta agua o linternas por ejemplo, como se puede observar en los siguientes puntos del listado.

✍ **Recursos Humanos.** Serán necesarias al menos tres personas para la realización de la liberación, considerando que luego de la misma, una quedará encargada de la base de recepción de datos y otras dos partirán en búsqueda de la cápsula. Se considera que cuanto mayor participación humana mejor, ya que esto permite efectuar actividades en paralelo, agilizando los procesos, y también permite la realización de otros, como la instalación de una base de recepción en otro sitio o la toma de imágenes.

✍ **Vehículos.** Tiene que contarse con al menos un vehículo de carga para el transporte de los equipos hasta el lugar de la liberación, y uno o más vehículos para el traslado de las personas que irán al lugar mencionado. Se debe tomar en cuenta que al menos uno de ellos se utilizará para el *fox hunting*, siendo que sería bueno contar con alguno con prestaciones de *Off Road*. Del mismo modo que se considera que son necesarias al menos tres personas para la liberación, también puede considerarse la utilización de un único vehículo, tal como una camioneta doble cabina con caja, la cual brindaría capacidad de carga y de transporte de los pasajeros y puede presentar características *Off Road*.

✍ **Recursos Financieros.** Estos varían en gran forma según la utilización de recursos humanos y por ende de transporte utilizados. También puede influir la prolongación del experimento en el tiempo, en razón de que la búsqueda y recuperación de la cápsula que es prácticamente impredecible. Los insumos que generan los mayores gastos son el combustible de los vehículos y los alimentos consumidos por las personas. Posteriormente se hará un análisis de costos en esta misma sección.

✍ **Recursos Experimentales.** El *hardware* y *software* que conformará la carga útil de la cápsula debe estar pronto y funcionando correctamente. Estos son específicos para cada experimento.

✍ **Materiales para el inflado del globo.** El inflado del globo incluye además del propio globo de látex varios otros materiales tales como:

- Pares de guantes de algodón para todos aquellos que manipularán el globo (mínimo 2).
- Cuerda para el atado de la boca del globo (algunos metros, preferiblemente de algodón).

- Balanza y pesas en el caso en que se desee medir el empuje del globo.
- Tanque de $6\,m^3$ de gas Helio.
- Manta de amplia superficie (mín $3\,\text{m} \times 3\,\text{m}$) sobre la cual se desarrolla el proceso de inflado, con el fin de evitar pinchazos y el roce del globo.
- Línea de conexión del tanque con el globo.Este artefacto incluye:
  - Adaptador de la rosca de salida del tanque.
  - Manguera.
  - Adaptador manguera - boca del globo.
- Precintos.
- A esta lista se agregan además herramientas como llave inglesa, llaves de boca varias y destornilladores grandes de paleta. Se puede prever algún amarre para el globo en caso de mucho viento, por ejemplo, pesas o estacas.

✍ **Cuidados con el globo.** El manejo precavido del globo es de vital importancia para el éxito de la liberación. El material del cual está fabricado el globo es látex y debido a que el mismo será expuesto a temperaturas del orden de $-70\,^{\text{o}}\text{C}$ es muy delicado al contacto directo de la piel, ya que si quedan residuos de grasa cutánea sobre la superficie, la misma puede congelarse y provocar una rotura. Está claro que también se debe evitar el contacto con elementos punzantes tratando de evitar pinchazos. Todas las personas que estén involucradas deben estar muy conscientes de estas situaciones, siendo todos responsables del cuidado del globo. El Helio es de los materiales comparativamente más caros de todos los necesarios, por lo que es difícil contar con «*Helio de más*» para el llenado de más de un globo, y de contar con una cantidad justa del gas, está claro que ***la rotura de un globo en el proceso de inflado conlleva la suspensión de la liberación.***
Si se cuenta con la posibilidad es conveniente llevar más de un globo al lugar de la liberación por si acaso el que se iba a utilizar sufriera algún daño.

✍ **Cápsula.** Se debe haber realizado el calado de la cápsula utilizando un bloque de poliestireno expandido de forma que entre toda la carga útil necesaria. La misma debe contar con los correspondientes identificadores[1]. Los elementos a contar son los que irán en la cápsula, esencialmente *hardware*, y en caso de ser posible es bueno tener sustitutos para los componentes más sensibles. En el caso particular de las liberaciones llevadas a cabo el *hardware* utilizado era el siguiente:

- Telemet Board.
- Main Board.
- Memorias SRAM (DUT).

[1] Nombre del globo, Facultad de Ingeniería, Uruguay y algún teléfono para contacto en caso de ser hallada por personas ajenas al proyecto.

- Power Board.
- GPS.
- Quema Tanza.
- Placa de medición de temperatura externa.
- Batería.
- Pilas para el circuito Quema Tanza.
- Termocupla.
- Cámara de video.
- Antena GPS.
- Transmisor y antena del transmisor.

No todo el HW mencionado se utilizó en cada una de las liberaciones. Para referirse a la carga útil de cada experimento consultar las secciones 10.2, 10.3 y 10.4.

♠ A la hora de los preparativos de la liberación se aconseja contar con repuestos de:

- Componentes de la Main Board.
- Placa de modulación.
- Placa de fuentes.
- GPS, especialmente conectores blindados para conectar antenas, así como repuestos de las propias antenas.
- Cable incandescente (del quema tanza).
- Termocupla.
- Batería de Li-Po de *backup*. Como se menciona en la sección 3.8, las baterías de Li-Po son muy delicadas y un manejo descuidado puede llevar a la pérdida de las mismas dada la inutilización de una o más de sus celdas.

✍ **Materiales para el armado de la cápsula y su amarre al paracaídas y al globo inflado.**
Son esenciales para esto:

- Tanza de diámetro 0,8 mm o superior.
- Cinta pato.
- Tijera o trincheta.
- Destorcedores.
- Paracaídas.
- Cápsula con carga útil y globo.

✍ **Elementos necesarios la estación base de recepción de telemetría.**

- Dos antenas YAGI, en nuestro caso de 5 elementos.
- Arnés de interconexión de ambas antenas.
- Caños de aluminio para soporte de ambas antenas, mediante sus respectivas platinas, una al lado de la otra, a una longitud de onda entre sí y polarizadas horizontalmente.
- Caño de aluminio que oficiara de mástil para soportar las antenas y orientarlas.
- Cuerdas u otro medio para la sustentación del mástil en su correcta posición.
- Llaves de boca para las roscas y tornillos que deben ser ajustados en el armado de las antenas.
- Conectores y cable coaxil para la interconexión de la antena y el receptor VHF, receptor VHF, cable para la señal de salida del receptor que debe ser conectada a un PC. Se debe verificar los conectores de ambos extremos del cable tal que concuerden con la salida y la entrada del receptor y la PC respectivamente.
- En lo posible es deseable contar con una PC portátil (*laptop*). La misma debe incluir el *software* de decodificación de paquetes, por ejemplo MULTIPSK.

✍ **Grupo de Rescate (*fox hunting*).** Se necesita:

- Vehículo.
- Estación de recepción portatil conformada por:
  - Antena YAGI de 3 elementos.
  - Receptor de VHF (*handy*).
  - *Laptop* con cargador de batería a partir de una fuente de 12 V[2].
  - *Software* de decodificación.
  - Cable coaxil para conexión del equipo receptor, llave de cambio de antenas, antenas vertical y direccional y conexión de audio entre el receptor y la *laptop*.
  - GPS, brújula y mapas de la zona, de preferencia a diferentes escalas.
  - Teléfonos celulares con sus respectivos cargadores a 12 V y/o adaptador para vehículo.
  - Equipos de radio HF para comunicación con la base montada en MONTEVIDEO y otros integrantes del proyecto.
  - Conexión móvil a internet.

[2]Igual al voltaje de batería de automóvil, por razones de autonomía.

- Papel y lápiz para anotaciones y dibujos, prismáticos, cámara, linternas, víveres, ropa y calzados adecuados al terreno y temperatura de la época, etc.

✍ **Estación receptora de telemetría.** Para el montaje de una estación de recepción lejana al sitio de la liberación se necesitan:

- Antenas YAGI de alta ganancia (13 elementos o más) y polarización vertical.
- Soporte para las antenas, mástil o torre, rotor azimut / elevación de ser posible..
- Cable coaxil para la conexión de la antena y el receptor.
- Equipo receptor de VHF.
- Cable de conexión de audio entre receptor y *notebook* con *software* para la decodificación de los paquetes.
- Equipos transceptor HF para enlace con el equipo de rescate y radioaficionados.
- Antenas dipolo de HF para las bandas en que operará el enlace.
- Teléfonos móviles y conectividad a internet.
- Alimentación de equipos, 220 V AC, o baterías de 12 V. Generadores de 220 V ó 12 V según sean las condiciones de trabajo o de disponibilidad de energía.

✍ **Herramientas y materiales varios.** Aunque no son utilizadas con un fin específico, son de gran utilidad y en muchos casos imprescindibles:

- Cables de distintas secciones.
- Cinta aisladora.
- Componentes electrónicos.
- Soldador, estaño, *flux*, desoldador y cinta desoldadora.
- Pinzas de corte y planas, destornilladores, trincheta.
- Multímetros.
- Calculadora, papel y lápiz, marcadores endelebles, mapas.
- Celulares, *notebooks* con cargadores, inversores AC/DC, fuentes de continua, alargues, lámparas con alargues.
- Conectores y adaptadores de RF de diferentes tipos, poe ejemplo BNC / PL, de audio mono y estéreo.
- Víveres, agua y comida, ropa adecuada para protección contra el sol o el frío según la estación.
- Sombrilla o toldos contra el Sol y/o viento dependiendo del lugar de instalación de la estación.
- Cámaras de video o fotográficas, etc.

10.1.3. Procedimientos.

En esta sección describiremos los principales procedimientos que se siguen durante el transcurso de la preparación y ejecución de la liberación del globo. Se trata de resaltar las técnicas y formas de proceder adquiridas a través de la experiencia.

Calado de la cápsula. Para hacer el calado se parte de un bloque sólido en forma de prisma rectangular de poliestireno expandido del cual se corta una tapa de un espesor aproximado de 10 cm. Para hacer el corte se debe contar con una caladora, que es básicamente una fuente de bajo voltaje a la cual se conecta un conductor de baja impedancia que se torna incandescente. Utilizando este alambre de una longitud de aproximadamente un metro se pasa el bloque por el mismo cuando el conductor se encuentra caliente, siguiendo una línea previamente marcada en el bloque. Una vez obtenido un bloque de le poliestireno de las medidas deseadas se estudiará la forma en que será distribuida la carga útil dentro de esta capsula así construida, definiendo los lugares que ocupará cada elemento. *Se tendrá en cuenta el peso y forma de cada uno de éstos, tratando de lograr un centro de masa bajo, de forma que en la caída no se produzcan rotaciones y los elementos más pesados no golpeen las partes frágiles.*

Una vez determinada la distribución, utilizando un marcador se señalan sobre el poliestireno los contornos de cada componente y se procede al calado del espacio que ocuparán. En este caso se usará un soldador tipo lápiz, el cual utilizado como bisturí derretirá el material, dejando un espacio vacío en el que se colocarán los diversos artefactos. A medida que se va calando se debe ir verificando que los últimos quepan en sus correspondientes lugares.

Manipulación de los globos. Como fue observado en la sección 10.1.2, el material de los globos es muy sensible a agentes externos, por lo que hay que tener extremo cuidado durante su manipulación, desde la carga, pasando por el transporte hasta su llenado. Durante la primera etapa se debe conservar dentro de su embalaje original, transportándolos dentro de un recipiente que los proteja de objetos punzantes, como una caja de cartón grueso o similar. Luego, para el llenado en primera instancia se disponen todos los materiales y recursos necesarios en el lugar que será realizada. Se buscará que éste sea plano y se desplegará sobre el mismo la manta, lona o tela resistente, que cumplirá con el objetivo de proteger al globo de las rugosidades y suciedad de la superficie. Sobre la manta se extiende cuidadosamente el globo, luego de retirado de su envoltorio original, siendo que la persona debe estar descalza y con medias, y guantes en sus manos.

También se llevará el tanque que contiene al Helio hasta el lugar y se conectará la línea de llenado del globo. Para esto se conectará mediante la rosca correspondiente el adaptador de la manguera a la salida del tanque. La manguera a su vez está asegurada al adaptador de la rosca a través de una abrazadera. En el otro extremo de la manguera, también asegurado por una abrazadera, se encuentra un caño con una válvula de paso y conectada a ésta otro caño de mayor diámetro que finalmente recibirá el cuello del globo asegurando éste con un precinto plástico.

Antes de conectar el globo al caño de llenado, es aconsejable purgar la línea de carga abriendo la válvula del tanque y la valvula de paso de la línea de carga, hasta que el He salga por el extremo libre de ésta, barriendo el aire atmosferico de su interior. En ese momento se introducirá en el cuello del globo y, al ajustarse éste al caño de diámetro ligeramente menor, ya podrá cerrrarse la válvula de paso, para proceder a colocar el precinto que ajustará el cuello al caño de carga.
Es importante tener precaución en estos pasos ya que cuando el globo este en su fase final de llenado, ejercerá una presión de varios kilos que si no está firmemente asegurado a la línea de carga puede desvincularse de ésta, dando por resultado la pérdida del gas expandido en su interior y /o la liberación del globo en forma prematura, perdiéndose éste y la oportunidad del experimento.
Una vez que se encuentre todo listo y asegurado, se iniciará el proceso de llenado abriendo lentamente la válvula del tanque, a la vez que se hace lo propio con la válvula de paso de la línea de carga conectada con el globo.
Un sonido silbante indicará que la carga se ha iniciado. El tono del silbido indicará la tasa de tansferencia del gas, la cual conviene que se realice sin apuro para mantener el control de la misma. El proceso de llenado transcurre lentamente y tarda alrededor de 20 minutos. Durante el inicio del mismo el globo permanece sobre la superficie y cuando la sustentación producida por la cantidad de gas suministrada comienza a vencer el peso del globo, el mismo comenzará a elevarse. En ese momento se debe redoblar la atención debido a que el viento puede provocar movimientos bruscos del globo que pueden golpearlo contra el suelo o las propias personas, pudiendo dañarlo.
Para determinar la cantidad de Helio que debe suministrarse hay que hacer un pequeño cálculo de las fuerzas involucradas en el sistema. Al empuje otorgado por el gas debe restarse el peso total, que incluye el peso del globo, la cápsula y el paracaídas. El resultado de esta resta da lo que se conoce como *free lift* que debe tener el globo para lograr una velocidad de ascenso aceptable, el cual debe de ser de al menos 1280 g. El método para medir el empuje que fue utilizado en la primer y segunda liberación consta de un par de pesas que son utilizadas para hacer contrapeso colocándolas sobre una balanza y que a su vez son amarradas a través de un hilo a la base de la línea de carga del globo. El peso que debe medir la balanza para tener el empuje que calculamos anteriormente va a estar dado, luego de despejes y poniéndolo en función de variables mejor conocidas, por la ecuación 10.1:

$$M_{balanza} = M_{pesas} + M_{caño\ \ artefacto} - (M_{cápsula} + M_{paracaídas}) \tag{10.1}$$

Una forma más fácil de realizar esta medida es utilizando un dinamómetro como por ejemplo el empleado para pesar peces, ya que en este método no se requiere de pesas y además es más robusto ya que en el método empleado en nuestro caso, el viento hace que la medida no sea tan precisa.
Una vez culminado el llenado del globo, se cierra el cuello del mismo con una cuerda y se retira la línea de carga. Luego plegamos hacia arriba el cuello del globo y lo volvemos a amarrar. Esto se realiza de esta forma para que cuando se ate el

globo a la cápsula quede en la base del globo algo muy parecido a un anillo. A este anillo se ata una cuerda de algodón a la cual se amarrará la tanza que vincula al conjunto cápsula - paracaídas - globo.

Preparación de la carga útil y cerrado de la cápsula. La preparación de la carga útil es la primera de las actividades, que es iniciada inmediatamente al arribo al sitio de la liberación. Se comienza entonces conectando todos los componentes y comprobando el correcto funcionamiento de éstos, verificando los aspectos principales, como la transmisión y la recepción de datos del GPS. En caso de que no se produzcan inconvenientes, se mantendrá el sistema en funcionamiento y continuo monitoreo. Si los hubiera, se procederá a la búsqueda de sus causas y su resolución. Una vez que se ha culminado el inflado del globo y está todo listo para la liberación se sellará la cápsula de poliestireno para su posterior amarre al globo y paracaídas, lo que se realiza con todo el sistema en funcionamiento, colocándose la tapa sobre los componentes, asegurándola con cinta pato alrededor de toda la cápsula en forma transversal y luego cubriendo todo el perímetro de la separación entre la tapa de la cápsula y el resto de la misma.

Amarre de cápsula, paracaídas y globo inflado. La ligadura de estos tres elementos debe hacerse de forma que no se produzcan enredos que puedan perjudicar el funcionamiento del paracaídas. Para atarlos se emplea una tanza de 0,8 mm de diámetro y se procede de la siguiente manera:

1. Se ata a la cápsula en forma de paquete con varias vueltas a su alrededor.

2. Se amarra a través de otro trozo de tanza la base del paracaídas a la cápsula dejando una distancia cercana a los cinco metros entre ambos.

3. Con un nuevo trozo de tanza se debe atar la cápsula al extremo superior del paracaídas, pasando por el aro de la cuerda de algodón amarrada al cuello del globo. Se deben dejar varios metros entre el globo y el paracaídas como una medida para evitar la interacción entre los tres elementos.

4. El último detalle que se ajusta es el alambre del Quema Tanza que se arrolla alrededor de la tanza de sujeción del paracaídas al gobo, tratando de que no se ejerza tensión sobre él.

A través del método descrito logramos que el paracaídas durante la subida se mantenga tenso. Si el globo con su carga se sale del perímetro establecido, el Quema Tanza se activará cortando la tanza, el globo se verá liberado y la cápsula iniciará su descenso amortiguada por el paracaídas. *Todavía no se encontró una forma de colocar un destorcedor para evitar que la rotación del sistema retuerza la tanza.* Para aminorar un poco este efecto se debe asegurar en por lo menos cuatro puntos distintos de la cápsula la base del paracaídas.

Rubro	Costo Unitario ($)	Cantidad	Subtotal ($)
Viáticos	400 / (*persona* × *día*)	6	*2400*
Combustible (Gasoil)	24.00 / lt	70	*1680*
Globo	1600 / unidad	1	*1600*
Paracaídas	350 / unidad	1	*350*
Gas He	$300/m^3$	6 m^3	*1800*
Poliestireno expandido	$200/m^3$	0.5 m^3	*100*
Otros	-	-	*1500*
		TOTAL:	***9430***

Cuadro 10.1.: Estimación de costos mínimos.

10.1.4. Estimación de costos.

El estimado de los costos se hará sobre los recursos consumibles y viáticos que se requieren para la liberación, dejando de lado las herramientas y equipos que son utilizados en la misma como apoyo a la tarea. Lo que queremos significar con esto es que los equipos como *laptops*, vehículos, antenas, equipos de radio, etc. son indispensables, pero no se puede adicionar su costo de adquisición al de la liberación.

Se tomarán como base para el cálculo dos situaciones, la primera será considerando una cantidad mínima de recursos implicando entonces un costo mínimo, mientras que la segunda se basará en la 3º liberación.

10.1.4.1. Estimación de costos mínimos.

Tomando en cuenta la experiencia adquirida y como se señaló con anterioridad 10.1.2 la cantidad mínima de personas necesarias para llevar adelante un experimento como el tratado sería de 3, las que requerirían de un vehículo y viáticos de $ 400 por día para rubros comestibles y de alojamiento. Se considera que todo el desarrollo implica una duración en el tiempo de dos días y que se recorrerán 700 km, 360 ida y vuelta hasta Durazno a los que se agregan 340 km para la recuperación de la cápsula.

Otros gastos que se suman a los que implicarán los determinados por los rubros mencionados en el párrafo anterior son, el globo, el paracaídas, la cápsula y el gas. Cada globo cuesta $ 1600, el paracaídas $ 350, medio metro cúbico de poliestireno expandido $ 100, mientras que el metro cúbico de gas cuesta $ 300.

La estimación de costos mínimos se lista en la tabla 10.1.

10.1.4.2. Estimación de costos de la 3º liberación.

En esta liberación participaron 12 personas, 10 de ellas concurrieron a la Base Aérea Nº 2 Santa Bernardina en el departamento de Durazno. Se dará por nulo el gasto de las dos personas que se encontraban en la base montada en la Facultad en Montevideo. En tanto para las personas que fueron a Durazno el cálculo será basado en la cifra mencionada anteriormente para los viáticos. En este caso se dispuso de 3 vehículos, un Land Rover diesel, un auto a nafta y un camioncito a nafta para el transporte de los materiales. Este último fue contratado, incluyendo los servicios de un chofer. La duración del experimento fue de aproximadamente 25 hs, desde las 16 p.m. del viernes 19 de diciembre hasta las 17 hs del sábado 20 del mismo mes. A pesar de esto se considerará que los viáticos deben ser otorgados a cada persona por dos días, viernes y sábado.

El recorrido final de los transportes fue de 360 km ida y vuelta a Durazno más 100 km para ir y volver al lugar en donde se recuperó la cápsula. Los gastos del globo, paracaídas y gas He son los mismos.

Rubro	Costo Unitario ($)	Cantidad	Subtotal ($)
Viáticos	400 /persona*día	20	*8000*
Combustible	24.00 / lt	150 lts	*3600*
Alquiler Camión	2300 / día	2 días	*4600*
Servicios Chofer	1000 / jornada	2 jornadas	*2000*
Globo	1600 / unidad	1 unidad	*1600*
Paracaídas	350 / unidad	1 unidad	*350*
Gas He	300 / m^3	6 m^3	*1800*
Poliestireno Expandido	200 / m^3	0.5 m^3	*100*
Otros	-	-	*1500*
		TOTAL:	***23550***

Cuadro 10.2.: Resumen de la estimación de costos de la tercera liberación.

La estimación de costos para la tercera liberación se lista en la tabla 10.2.

10.2. Primera Liberación.

10.2.1. Objetivos y motivaciones.

Dentro del WBS del proyecto esta tarea estaba prevista hacerla dentro de nuestro último entregable. Pero en conjunto con el grupo de Teleglobosats y los tres tutores, Juan Pechiar, Sebastián Fernández y José Luís Vila decidimos que no sería una mala

idea realizar una liberación previa a la final. Y como fue señalado en el capítulo C esto no estaba previsto y tuvo varias consecuencias sobre el desarrollo del proyecto como también fue analizado en dicho capítulo.

Los objetivos y motivos principales que impulsaron esta liberación fueron testear la comunicación implementada por el grupo de TELEGLOBOSATS, y ganar un poco de experiencia con respecto a todo lo que es la liberación del globo sonda como un experimento de campo muy amplio. Todo lo que significa la preparación previa, las herramientas que no deben olvidarse llevar a una liberación, el armado de las antenas de recepción, el llenado con helio del globo y los cuidados que se deben tener a la hora de manipular el globo, los cálculos realizados para que el globo tuviera la carga justa de Helio, y finalmente las conclusiones que se pueden sacar para que a la hora de hacer la liberación final se obtengan mejores resultados y se pueda realizar una vez arribada la cápsula a Tierra, una búsqueda más eficaz.

En esta liberación se participó realizando y probando el circuito QUEMA TANZA, encargado de desacoplar la carga útil del globo en el caso en que éste tomara un rumbo indeseado. También se participó en el modelado térmico y realización de la cápsula. Por último y lo más importante en toda la aventura de lo que fue esta primera liberación del globo, desde que salimos de MONTEVIDEO rumbo a DURAZNO a realizar la liberación hasta que se recuperó la cápsula en el departamento de TREINTA Y TRES.

10.2.2. Problemas.

El principal inconveniente ocurrido fue no funcionó la recepción de los satélites por el módulo GPS que brindaría los datos de posición: longitud, latitud y altura. Al momento de la liberación no se pudo detectar cuál era el defecto puntual, lo único que se sabía era que el GPS indicaba que no estaba recibiendo señal de satélite a través del mensaje transmitido por el sistema que desplegaba el mensaje «`NO SAT`».

Hay que destacar que este problema no era nuevo, ya que en el transcurrir de toda la preparación y pruebas previas pocas veces el sistema logró establecer su posición, presentándose frecuentemente el mencionado problema. En ese momento se creyó que la causa de esto era intrínseca del módulo GPS que se estaba empleando. Pruebas posteriores a la liberación identificaron el origen del defecto, que resultaron ser interferencias producidas por el transmisor de telemetria en la linea de la antena del gps debido a fallas en el blindaje de la misma.

Un problema derivado de no conocer la posición GPS era que nunca se activaría el QUEMA TANZA, por lo tanto en caso de que el globo y su carga se mantuvieran en equilibrio a determinada altura y el viento arrastrara al globo de forma prolongada se perdería la posibilidad de rescate.

El surgimiento del inconveniente con el GPS y la búsqueda de una solución en ese momento, acarreó un retraso en la hora planificada para la liberación de dos horas, ya que la misma se efectivizó a las 9:14 a.m. habiendo sido prevista para las 7 a.m..

Otro problema era que la cápsula presentaba un orificio muy grande en la posición de la cámara, razón por la cual se filtraba el aire frío bajando la temperatura interna de la cápsula, exponiendo la electrónica y baterías a condiciones extremas. Esta puede haber sido la causa de la detención de la filmación, afectando directamente a la cámara de video o a las pilas que le servían de alimentación.

Un detalle que puede considerarse como un inconveniente era que los sensores utilizados por el grupo TELEGLOBOSATS no estaban calibrados, por lo que la información que nos brindaban no era muy confiable.

10.2.3. Resultados.

De todas formas los resultados obtenidos fueron positivos, especialmente a lo que se refiere a la transmisión de datos, ya que se pudo realizar el seguimiento del experimento de principio a fin sin interrupciones, aunque como era de esperar la recepción a medida que el globo se distanciaba se iba deteriorando, provocando la rotura de algunos paquetes.

También es destacable la forma en que se llevaron adelante los procedimientos explicados en la sección de logística 10.1, conllevando un desarrollo fluído del experimento y sin mayores sobresaltos.

Las temperaturas mínimas registradas por los sensores fueron -7 ºC la temperatura interna y -21ºC la externa.

Un resultado positivo pero que se dio de forma fortuita fue la recuperación de la cápsula, la cual fue hallada en el departamento de TREINTA Y TRES, en una finca rural del paraje de la QUEBRADA DE LOS CUERVOS. La carga útil fue encontrada junto al paracaídas y los restos del globo tras su explosión por los moradores del lugar, quienes amablemente se comunicaron con uno de los celulares inscriptos sobre la cápsula. El recorrido final en línea recta del *payload* fue de 194 km (figura 10.1). La duración del vuelo fue de aproximadamente 3 horas y 15 minutos, estimado a partir del momento de la liberación y cuando se dejaron de recepcionar las trasmisiones.

Fueron capturadas imágenes a gran altura de nuestro territorio. La filmación estimando *grosso modo* se detuvo a una altura cercana a los 15.000 metros, cuando incluso ya se había superado la altura de las nubes.

10.2.4. Conclusiones.

En líneas generales se puede concluir que el experimento fue exitoso a pesar del ya comentado grave problema sucedido con la recepción de la señal satelital. Se ganó en experiencia con respecto a los procedimientos a seguir y se comprobó el correcto funcionamiento de la transmisión.

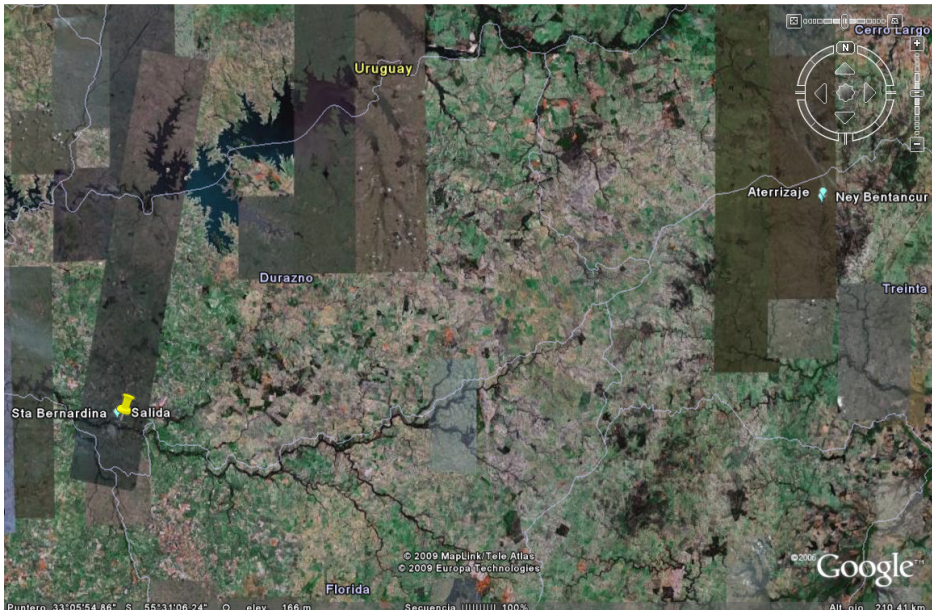


Figura 10.1.: Foto satelital de los puntos de partida y arribo del GLOBOSAT01.

10.3. Segunda Liberación.

10.3.1. Objetivos y motivaciones.

El objetivo principal de esta liberación era llevar a cabo el experimento que sometería memorias RAM estáticas al efecto de la radiación, cumpliendo de esta forma con nuestro cliente. También en este lanzamiento se comprobaría el funcionamiento de prácticamente todo el HW diseñado, excepto por la placa ANTI LATCHUP, y el SW implementado.

La motivación principal de la fijación de la fecha alrededor del 20 de Setiembre de 2008 para la liberación fue la presencia en el país de RAOUL VELAZCO, nuestro cliente, quien venía desde FRANCIA y traía consigo la placa con las memorias que serían testeadas, la cuál denominamos como DUT. La fecha exacta de la liberación fue el 25 de Setiembre, día en el que RAOUL VELAZCO partía a FRANCIA por lo que finalmente no pudo presenciar el experimento.

10.3.2. Problemas.

En la segunda liberación los dos problemas de mayor importancia que se suscitaron fueron:

- La **interrupción parcial de las transmisiones** durante el descenso del globo.
- **No haber podido recuperar la cápsula por medios propios**, habiendo sido ésta encontrada tal como en la primer liberación por el propietario del campo en que cayó.

En *tests* posteriores realizados a la carga útil, sin modificarla con respecto a la liberación, no fue posible identificar la causa del ruido percibido en la señal transmitida, que distorsionaba los paquetes a tal punto que la mayoría de ellos no pudo ser decodificado.

En cuanto al segundo problema mencionado, se cree aunque no se ha podido comprobar que la cápsula dejó de enviar paquetes al caer. Esto es relevante para poder encontrarla ya que a través de las antenas que son direccionales, si se recibe señal, es posible determinar la dirección a seguir para dar con el lugar en que está la carga útil. Se estima, como fue descripto en la sección 10.3, que se rodeó por completo este sitio, tomando como mejor aproximación la última coordenada recibida.

El primer error debido al *software* implementado se dio en esta liberación

- Un **error en la interpretación de la información de altura dada por el GPS** causaba el cálculo equivocado de la altura a la que se encontraba el receptor. Ésta era transmitida y generaba entonces confusión en quienes debían interpretarla.
- Un error no menor que se cometió fue el de **no reiniciar la electrónica antes de cerrar el *payload***.

Esto sumado a que la misma había permanecido encendida por un período aproximado de dos horas en tierra trajo como consecuencia el desbordamiento de la capacidad de almacenamiento de datos por parte de la caja negra, quedando registrados apenas una fracción de los mismos, correspondientes al período en que se mantuvo la carga útil en el suelo y una parte del ascenso.

- Un inconveniente que se repitió en esta liberación con respecto a la primera y se volverá a repetir en la tercera como será explicitado más adelante[3] fue el **retraso en el cumplimiento del horario pactado con las autoridades para el momento en que se debía dejar partir el globo**, en este caso el retraso debido a que las tareas que se debían efectuar antes tomaron un tiempo mayor al esperado.

10.3.3. Resultados.

- Se pudo llevar a cabo el experimento sobre el efecto de la radiación en circuitos electrónicos, más específicamente sobre un banco de memorias RAM estáticas que en conjunto tenían una capacidad de 1 GB. De todas formas este experimento no arrojó los resultados esperados, ya que no se registraron errores en los *bits* almacenados.
- Los sensores utilizados respondieron de forma correcta durante todo el vuelo y se recabaron datos internos y externos al *payload*, incluyendo presión atmosférica y temperatura. Cabe señalar que todavía no se había calibrado la medición de la última pero al almacenar el voltaje muestreado (figura 10.3a), relacionado a la temperatura externa, luego de la calibración y a partir de los voltajes se podría hallar la temperatura medida.

[3] Subsección 10.4.2.

- El sensor de presión, cuyos datos de calibración se poseían pero que por una cuestión de tiempo no se pudieron tomar en cuenta en el *software* [4], registró la presión mínima de 19 hPa. Los datos de presión eran útiles para estimar la altura, ya que como se indicó en la sección anterior un error en el *software* provocaba que los mismos no pudieran ser interpretados correctamente en tiempo real.

A continuación se pueden observar varias gráficas 10.3 con las muestras obtenidas de los diferentes sensores en función de altura, cuyo máximo registrado fue de 33.173 metros. La distancia en línea recta desde Durazno hasta Molles de Godoy, sitio en que la cápsula hizo contacto con tierra es de 130 Km y el tiempo total del vuelo fue de aproximadamente 2 horas y 55 minutos. En la figura 10.2 se presenta el recorrido de la carga del globo arrastrada por los vientos.

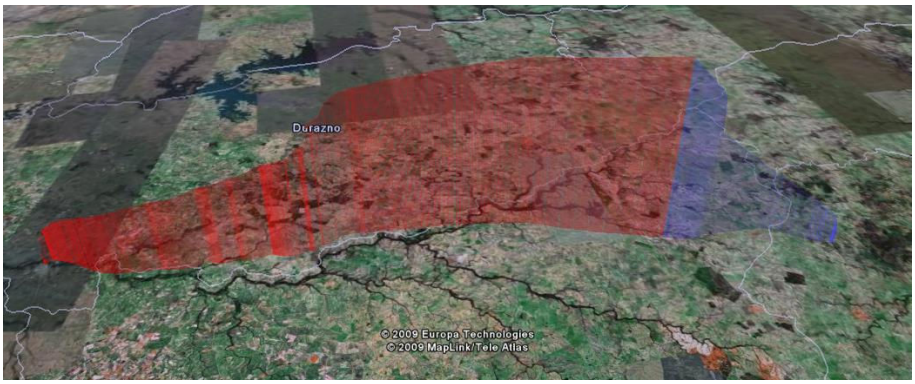
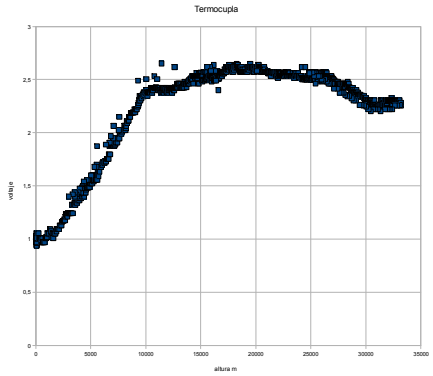


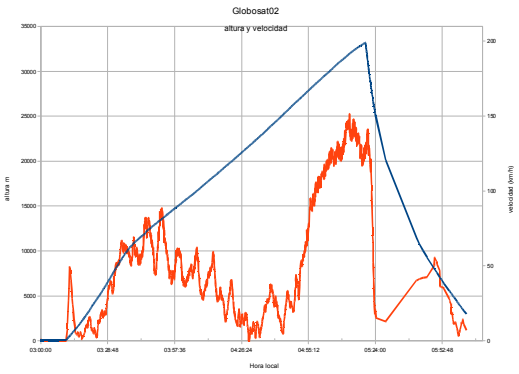
Figura 10.2.: Trayectoria del Globosat02 representada en el Google Earth.

- El sistema GPS no presentó contratiempos funcionando correctamente durante todo el vuelo, pudiéndose entonces seguir al *payload* en todos los instantes en que la transmisión era correcta, informando de este modo su posición al sistema de Control Aéreo del Aeropuerto Internacional de Carrasco.

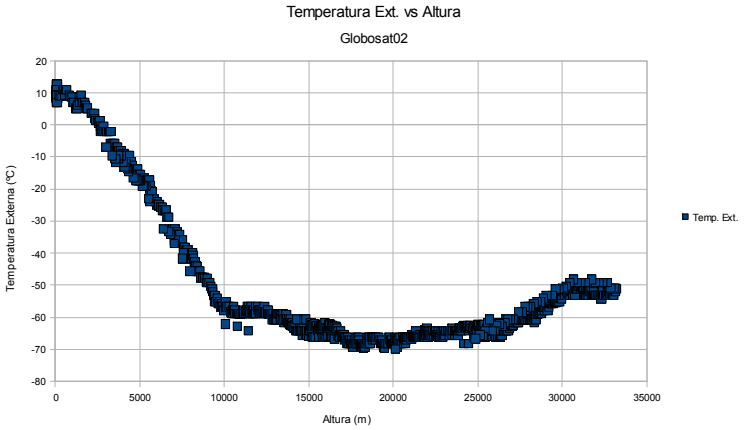
[4] Tener en cuenta el *offset* del mismo.



(a) Gráfica de voltaje de la señal acondicionada de la termocupla en función de la altura.



(b) En azul se observa la altura y en rojo la velocidad horizontal en función del tiempo.



(c) Gráfica de temperatura externa en función de la altura a partir de la curva ajustada con los datos de la calibración.

Figura 10.3.: Gráficas de los datos recabados por sensores y GPS.

Luego de la calibración y a apartir de la curva ajustada (ecuación 7.6) para la temperatura externa en función del voltaje del circuito de acondicionamiento de la señal de la termocupla, se pudo graficar la temperatura externa medida en función de la altura, la cuál se observa en la figura 10.3c, habiéndose registrado una temperatura mínima cercana a los $-70\,^{o}C$.

10.3.4. Conclusiones.

Esta liberación fue muy importante y marcó el cumplimiento de los más importantes objetivos del proyecto, ya que fue testeada la plataforma *hardware* diseñada corroborando

su correcto funcionamiento, y se llevó acabo el experimento de investigación acerca del efecto de la radiación sobre celdas de memoria, además de la liberación en sí misma como una forma de efectuar experimentos a grandes alturas.

10.4. Tercera Liberación.

10.4.1. Objetivos y motivaciones.

El propósito de la tercera liberación estaba orientado a consolidar completamente todo el sistema, así como la forma de realizar este tipo de experimentos, el *know-how*. Se buscó que en ésta ocurrieran la mínima cantidad de errores posibles, para esto la preparación iba a ser con un tiempo de antelación suficiente como para hacer pruebas más prolongadas que en las otras dos ocasiones. Una de las motivaciones que también impulso el desarrollo de este experimento fue, luego de la aceptación de la prórroga de los proyectos involucrados, el dar un cierre a los mismos, dejando paso a los otros grupos que comenzaron en el segundo semestre de 2008.

10.4.2. Problemas.

- Hubo dos problemas significativos de último momento, un **falso contacto en el conector de la antena del GPS** y la **retención de la señal de** `PPT` **del transmisor**. Decimos que estos fueron de último momento por la simple razón de que se presentaron instantes antes del sellado de la cápsula. Sin lugar a dudas la preparación para esta liberación había sido la más prolongada y consistente, y durante las largas pruebas en que se monitoreo el funcionamiento del sistema, nunca ocurrieron este tipo de inconvenientes. Incluso se habían realizado pruebas la madrugada del día de la liberación, apenas unas horas antes de la misma y no se habían registrado contratiempos.
  Finalmente se debió solucionar el falso contacto eliminando el conector, soldando los cables y adosándole un blindaje «*casero*» al punto de la soldadura. Como se llegaba al límite de tiempo autorizado para liberar el globo, el segundo problema no se solucionó ya que a pesar de su presencia el conjunto podía continuar funcionando y brindando las prestaciones necesarias.
- Durante el vuelo se produjo lo que pudo ser la consecuencia directa del problema no solucionado, **repentinamente la carga útil dejó de transmitir**. Por motivos que se desconocen cerca de 45 minutos más tarde se volvieron a captar con los equipos de radio las tramas transmitidas. Aunque se estableció la hipótesis de que el transmisor pudo verse afectado por la activación continua de su señal de `PTT`, está causa no pudo ser determinada, por lo que no se tiene certeza sobre el motivo de esta falla grave.
- El tercer error aconteció apenas despegó el globo del suelo, entonces se observó que **la medida de temperatura externa indicaba 43 ºC la mayor parte**

del tiempo. Luego de recabadas las medidas de temperatura que habían sido almacenadas en las memorias se encontraron varios datos correctos, por lo que se determinó que el origen del problema fue un falso contacto en alguna de las conexiones entre la placa MAIN y la de compensación de punta fría.

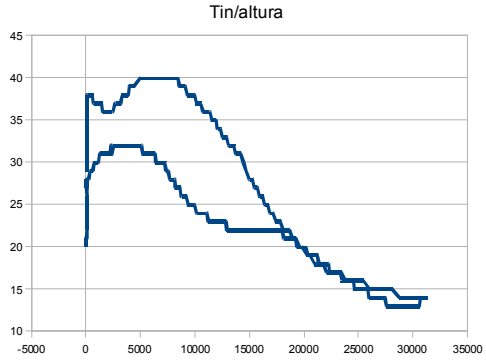
10.4.3. Resultados.

- Los resultados obtenidos en esta liberación son similares a los de la liberación anterior. Para el caso de los **sensores de presión y temperatura externa**, ya habían sido **calibrados** y el ajuste correspondiente había sido implementado en las rutinas de *software* que calculaban estas magnitudes. Las gráficas de las muestras recabadas por el sistema y recuperadas de la caja negra, en función de la altura se muestran en las siguientes imágenes 10.5.

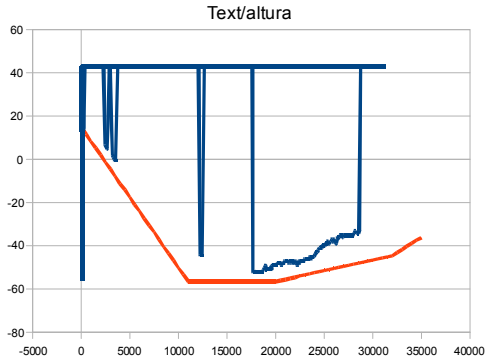
- Luego del problema corregido antes de cerrarse la cápsula, se recibían correctamente los datos de posición provenientes del módulo GPS. Esto posibilitó el **seguimiento de la carga útil y se logró cumplir con el objetivo hasta ahora inalcanzado de recuperarla a partir de los datos recibidos**. Un elemento que facilitó en parte este objetivo fue la cercanía del sitio en que la cápsula aterrizó, con lo cual la mayor parte de los participantes pudieron ir al rescate colaborando con su búsqueda.

- **Todos los datos recabados por la electrónica fueron almacenados en las memorias**, sin problemas de capacidad, incluso quedando ociosa una gran parte de la misma. Con los datos recuperados se reconstruyó la trayectoria realizada por el *payload* (fig.10.4). La distancia final en línea recta fue de apenas 40 Km y la altura alcanzada de 31.339 metros y la duración del vuelo fue de 2 horas y 20 minutos.

Figura 10.4.: Reconstrucción de la trayectoria del GLOBOSAT03 utilizando el *software* GOOGLE EARTH.



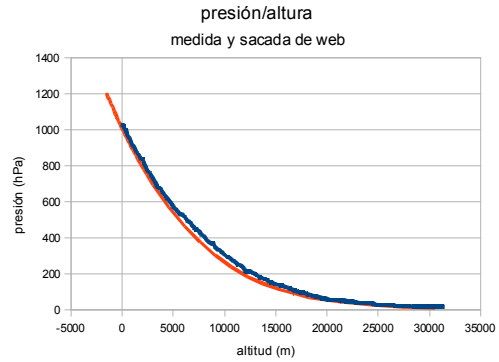
(a) Temperatura interna de la cápsula vs altura. La línea inferior son los puntos del ascenso , mientras los otros el descenso.



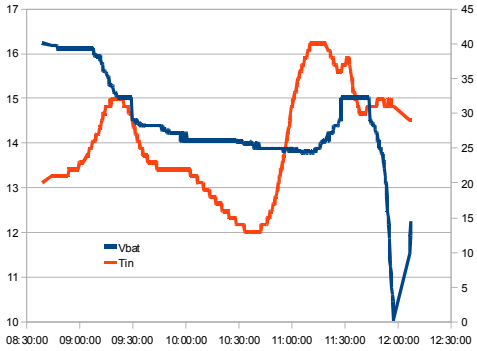
(b) En azul se observa la temperatura externa medida y en rojo la esperada teóricamente. Se puede observar la mencionada falla provocada por un falso contacto en el circuito de acondicionamiento de la señal de la termocupla.

Figura 10.5.: Gráficas de los datos recabados por sensores y GPS.

- Nuevamente **se llevó adelante la exposición de las memorias a la radiación natural** y no se detectaron errores en los bits guardados en las celdas.



(a) Presión vs altura. En azul se graficó los datos medidos y en rojo la curva de presión teórica [APC05, Pre].



(b) En rojo se observa la temperatura interna medida por el `TMP 100` y en azul el voltaje de la batería, ambos en función del tiempo. Se puede apreciar cierta relación entre ambos, dándose los voltajes más bajos para la batería simultáneamente a los menores valores de la temperatura interna.

Figura 10.6.: Gráficas de los datos recabados por sensores y GPS.

10.4.4. Conclusiones.

Los objetivos propuestos se cumplieron, siendo la única liberación en la que se pudieron cumplir todas sus etapas, desde la preparación hasta la recuperación de la carga útil. El *hardware* y *software* se desempeñaron correctamente y cumplieron con las funciones para las que fueron diseñados, el control del experimento del DUT se comportó de acuerdo a lo establecido. A pesar de los problemas citados se considera que la liberación fue exitosa.

11. Conclusiones Finales del Proyecto.

En este capítulo se detallan las conclusiones alcanzadas luego de la finalización del proyecto. Asimismo se analizan diversas mejoras que eventualmente se le podrían realizar al sistema.

11.1. Conclusiones.

Al inicio del proyecto se planteó como objetivo principal la creación de un *hardware* específico con determinadas funcionalidades expresadas en la sección 1.7. Con el tiempo esta definición evolucionó pasando a ser el objetivo del proyecto la construcción de una plataforma *hardware* capaz de controlar otros dispositivos con el fin de llevar adelante experimentos científicos. Creemos que al término del proyecto se logró aún más que esto: además de este objetivo, se reunieron y documentaron los conocimientos necesarios para la realización de experimentos utilizando como plataforma globos estratosféricos. En conjunción el logro de estos dos objetivos trae como resultado global la adquisición de medios y métodos necesarios para la implementación de experimentos científicos sometidos a las condiciones de grandes alturas.

Por tanto después de lo expresado se concluye que los objetivos planteados fueron cumplidos en su totalidad. Puntualmente se cumplieron los objetivos de diseño y fabricación de una plataforma *hardware*, que cuenta con las interfaces de comunicación necesarias para el control del DUT, la recepción de datos provenientes de un módulo GPS y la interacción con un *hardware* encargado de la modulación y transmisión de datos. A su vez se cuenta con una variedad de sensores analógicos y digitales a través de los cuales se pueden relevar las condiciones del entorno en que se desarrollan los experimentos.

El sistema está dotado con las capacidades necesarias para controlar de forma eficiente el consumo de energía y es capaz de cumplir con un plan de vuelo liberándose del vínculo con el globo en caso de ser necesario. El *software* implementado cumple con todas las funcionalidades requeridas, recabando los datos de todos los sensores y realizando el manejo de las interfaces con otros dispositivos recibiendo y enviando información a los mismos. Toda la información requerida puede ser almacenada en la memoria disponible para su posterior análisis.

La plataforma cuenta con la característica de autoreiniciarse en caso de bloqueo, gracias a la utilización del *watchdog*, sin sobreescribir la información previa que había sido guardada, debido al manejo de la interrupción de este dispositivo. El estudio de la

aislación térmica condujo a la fabricación de las cápsulas de forma que soportaran y brindaran la protección necesaria a la carga útil de cada liberación.

Como fue señalado en el primer párrafo de esta sección se alcanzó el objetivo de adquirir, depurar y documentar los medios y métodos utilizados para la liberación de globos sonda, esperando que estos sirvan como base para posteriores experimentos, evitando así que los grupos que nos sucedan deban adquirir desde cero el *know-how* necesario.

Se explicitaron mejoras a los diseños implementados, las cuales pueden ser tomadas para la evolución de los mismos, mejorando sus características. Dentro de las mismas se destaca la mejora del diseño de la placa MAIN, de la cual fueron eliminados los errores constatados y se agregaron nuevas funcionalidades para un mejor aprovechamiento de los recursos brindados por el microcontrolador empleado.

El circuito ANTI LATCHUP diseñado y parcialmente implementado está completamente documentado, restando únicamente la adquisición de algunos componentes para completar el montaje del PCB, siendo posible una vez finalizada esta etapa realizar su testeo.

Desde una mirada holística, se puede remarcar que los puntos débiles del diseño se encuentran en las conexiones y componentes susceptibles de ser afectados por la radiofrecuencia, a saber:

- ✍ **La conexión entre el módulo GPS y su antena.** Puede provocar que no se reciba la información desde los satélites por falta de señal en caso de falsos contactos, o directamente recibir demasiada interferencia en casos de blindajes defectuosos.
- ✍ **Las bobinas de la placa de fuentes.** Las bobinas empleadas no pueden ser del tipo toroidal, sino que se deberán procurar del tipo blindado. De lo contrario, pueden dañarse componentes como sucedió con uno de los módulos GPS empleados.
- ✍ **La conexión del PTT del transmisor.** La tierra del circuito que comande el PTT del transmisor[1] debe extraerse, en lo posible, directamente de la batería y también filtrada a través de un capacitor, ya que de extraerse directamente de la placa TELEMET los bucles de corriente elevan el nivel de tierra y pueden ocasionar que el PTT del transmisor quede activo. Esto se traduciría en consumos mayores a los esperados y en peligro de daño del transmisor por verse forzado a disipar demasiada potencia.

En cuanto a los datos recabados por los sensores se logró corroborar la consistencia de los mismos frente a modelos teóricos y datos experimentales de fuentes externas al proyecto. Mientras que el experimento llevado acabo en el DUT no arrojó resultados positivos, lo cuál era de esperar debido a la baja probabilidad de que ocurrieran errores en los bits almacenados por las memorias como fue señalado por Velazco. Esto se debe al corto período de tiempo que permanece el experimento a grandes alturas. Luego de señalado esto se debe concluir que el tipo de plataforma utilizado, globosats, no es el adecuado para la aceleración de experimentos sobre el efecto de la radiación sobre componentes eléctricos.

[1] Circuito ubicado en la placa TELEMET.

También con respecto al aspecto de los efectos de la radiación sobre circuitos electrónicos, en la sección 1.5 se mencionaba la utilización de memorias en experimentos realizados con globos sonda para el almacenamiento de datos y se decía que en dichos casos no se analizaba la posibilidad de los errores que pudieran ser provocados en dicha información por parte de la radiación. En este proyecto también se utilizó un banco de memorias para almacenar la información recabada durante el experimento, pero a pesar de considerar los efectos de la radiación, los mismos fueron desestimados dada su baja probabilidad y que un error en alguno de los datos de las memorias usadas como caja negra no trascendería demasiado.

Por último queremos destacar la interacción y colaboración establecida con el grupo TELEGLOBOSATS y los tutores, la que permitió que todos en conjunto lleváramos adelante el comienzo al gran emprendimiento que significa el objetivo final del proyecto LAÍ, la construcción del primer satélite experimental uruguayo.

11.2. Trabajos a Futuro.

En lo que se refiere al corto plazo, las principales líneas de continuación de los trabajos realizados, son potenciar las capacidades del *hardware* a través de la implementación de *software*, ya que los porcentajes de utilización de la memoria de programación disponible del micro y su capacidad de procesamiento son muy bajos.

También queda pendiente la calibración de dos sensores, el de humedad y el de temperatura interna. Mediante los vínculos establecidos con el LABORATORIO TECNOLÓGICO DEL URUGUAY esta actividad puede realizarse sin inconvenientes. Particularmente, existe un método de calibración de sensores de humedad denominado «*Método de las Sales Higroscópicas*», el cual resulta sencillo de implementar [ERC08].

Como ya había sido mencionado está pendiente la finalización de la placa ANTI LATCHUP y el testeo de su funcionamiento. Para cumplir con esta tarea solamente es necesaria la adquisición de unos pocos componentes. Como consecuencia directa de la finalización de la placa ANTI LATCHUP se podrá desarrollar el *software* para el control de la corriente consumida por el circuito en cada instante y de esta manera la carga consumida a la batería. Esta información sería útil al momento de la administración de la energía del sistema.

Puede continuarse el perfeccionamiento de los métodos y procedimientos para la realización de liberaciones, implementando nuevas ideas para evitar problemas ocurridos haciendo una mejora continua del sistema.

A mediano y largo plazo se podría afrontar la optimización de los diseños *hardware*, tomando como base las versiones mejoradas ya diseñadas, como por ejemplo placa MAIN o de compensación de punta fría y acondicionamiento de la señal de la termocupla.

Otro aspecto a mejorar es el estudio del comportamiento mecánico de la cápsula, para determinar problemas como los que pudieran haber causado la no transmisión de paquetes luego de la caída de la carga útil. Diseñando mecanismos para disuadir o disminuir

estos efectos o pensar una nueva forma para la transmisión de los datos de posición estando la cápsula en el suelo.

Una tarea que se torna necesaria[2] de llevar a cabo antes de una nueva liberación es la implementación de algún mecanismo de detección del *umbral* de descarga para las baterías de Li-Po, para el posterior apagado del sistema. Como se analizó en la sección 3.8, continuar descargando la batería por debajo de este *umbral* puede provocar daños permanentes sobre las mismas.

Por otro lado quedó abierta la posibilidad de la iniciación de nuevos experimentos en la rama de estudio de los efectos de la radiación sobre celdas de memoria y circuitos electrónicos utilizando otro tipo de plataforma que incluiría globos de gran altura pero que permanecen estacionarios a cierta altura por períodos prolongados de tiempo.

Como queda evidenciado existen varias líneas de trabajo a seguir dentro del marco del proyecto LAÍ, siempre persiguiendo el objetivo final de este proyecto. Surge además la posibilidad de una extensión del proyecto a otra área dentro del convenio de la FACULTAD DE INGENIERÍA con la RED ALFA NICRON. Consiguientemente se pueden desarrollar varios proyectos de fin de carrera insertados en el entorno del proyecto LAÍ o la RED ALFA NICRON.

[2] si no imprescindible

A. Listas de componentes.

Power Board.

Nombre	Tipo	Valor	Footprint	Código Farnell
$C1_A$, $C1_B$, $C1_C$	Capacitor Tantalio	10 μF 25V	C	1432595
$C2_A$, $C2_B$, $C2_C$	Capacitor Cerámico	.27 μF 100V	1206	7414717
$C3_A$, $C3_B$, $C3_C$	Capacitor Cerámico	1500 pF 50V	0805	1301773
$C3_A$, $C3_B$, $C3_C$	Capacitor Cerámico	1500 pF 50V	0805	1301773
$C4_A$, $C4_B$, $C4_C$	Capacitor Tantalio	100 μF 10V	7343-28 (EIA)	9229256
$C5_B$, $C5_C$	Capacitor Tantalio	100 μF 10V	7343-28 (EIA)	9229256
$C5_A$	Capacitor Tantalio	10 μF 25V	C	1432595
L_A, L_B, L_C	Self	10 μH 4.0A SMD	DIAG	1539522
$R1_A$	Resistor	11K	0805	9332456
$R2_A$, $R2_B$, $R2_C$	Resistor	4k7	0805	9333266
$R1_B$	Resistor	5K1	0805	9333320
$R1_C$	Resistor	1K6	0805	9332715
R_{serie}VC	Resistor	10K	0805	9332391
$D1_A$, $D1_B$, $D1_C$	Diodo Switch	HI SPEED 85V	SOT-23	9207198
$D2_A$, $D2_B$, $D2_C$	Diodo Schottky	30V 4A	SMC	1459078
$U1_A$, $U1_B$, $U1_C$	Regulador Step-down	LT1374	8SOIC	1273741

Cuadro A.1.: Lista de componentes para la placa de Fuentes. Los nombres de los componentes listados se corresponden con los de la figura H.1.

Placa de acondicionamiento de señal para la termocupla - versión 1.

Nombre	Tipo	Valor	Footprint	Código Farnell
R_1, R_2	Resistencia	200 kΩ	1206	9336133
R_{ext}	Resistencia	100 kΩ	0207/10	-
$R4$	Resistencia	470 Ω	0207/10	-
R_6	Resistencia	180 Ω	0207/10	-
$TRIM_1$	Preset	1kΩ	TRIM4006	-
$TRIM_2$	Preset	20 kΩ	TRIM4006	-
D_2	Diodo Zener	3,9 V	DO41-10'	-
$IC1$	AD594 Integrado	-	DIL14	409182
$IC2$	OP07 Amplificador Operacional	-	DIL08	-

Cuadro A.2.: Lista de componentes placa tratamiento de señal termocupla 1º Diseño. Los nombres de los componentes listados se corresponden con los de la figura H.5.

Placa de acondicionamiento de señal para la termocupla - versión 2.

Nombre	Tipo	Valor	Foot Print	Código Farnell
R_1, R_2, R_3	Resistencia	50 kΩ	1206	115309
$TRIM_1$	Preset	100 kΩ	TRIM4006	-
C_1, C_2	Capactior	10 μF	5-6'	-
C_3, C_4	Capacitor	100 nF	1206	1414715
$AO1$	OPA177 Amplificador Operacional	-	DIL08	1219410
U$1	INA128 Amplificador de Instrumentación	-	DIL08	1212411
$IC1$	AD594 Integrado	-	DIL14	409182

Cuadro A.3.: Lista de componentes placa tratamiento de señal termocupla 2º Diseño. Los nombres de los componentes listados se corresponden con los de la figura H.6.

Anti - Latchup Board.

Nombre	Tipo	Valor	Footprint	Farnell Code	Cantidad
$IC4$	Regulador Lineal LM7805	5 V	TO-220-3	1359960	1
C_2	Capacitor Cerámico 50 V	100 nF	1206	1414715	1
C_1	Capacitor Cerámico 50 V	220 nF	1206	1362557	1
$IC1$	Amplificador Instrumentación	LT1167	SOIC8	1503428	1
R_{13}	Resistencia Shunt LVK24	$0{,}5\,\Omega \pm 1\,\%$	2412	1462317	1
$TRIM1$	Preset Multivuelta	$5\,k\Omega$	3266W	9352759	1
C_3	Capacitor Cerámico 50 V	10 nF	1206	757603	1
C_4, C_5	Capacitor Cerámico 50 V	1 nF	1206	1362558	2
$R_{14}, R_{15}, R_{16}, R_{17}$	Resistencia	$10k\Omega \pm 1\,\%$	1206	1469970	4
$IC11$	Amplificador Operacional	LT1112	SOIC8	9560009	1
$TRIM2$	Preset Multivuelta	$10\,k\Omega$	3266W	9352651	1
R_{18}, R_{19}	Resistencia	$49{,}9\,k\Omega$	1206	1153094	2
R_{20}, R_{21}	Resistencia	$100\,\Omega \pm 1\,\%$	1206	1469977	2
$IC12$	8 BIT DAC	AD5300	MSOP8	1079290	1
$IC13$	Comparador de Precisión	LT1016CS8	SOIC8	9559361	1

Continúa...

Nombre	Tipo	Valor	Footprint	Farnell Code	Cantidad
$IC14$	*Flip - Flop* D	CD74HC74	SO14	1103175	1
$U\$3$	Inversor de Voltaje ICL7660	-5 V	SOIC8	En placa micro	1
C_7, C_8	Capacitor Electrolítico 50 V	$10\,\mu$F		9452702	2
$IC3$	PMOSFET	-	SO8	9935770	1
$IC2$	NMOSFET	-	SOT23-5	1021754	1
$R2_A1$	Resistencia	$4{,}7\,k\Omega$	1206	9240608	1

Cuadro A.4.: Lista de componentes de la placa Anti Latchup. La columna Nombres se corresponde con las denominaciones de la figura H.4. Como se había mencionado en la sección 8.2, la representación esquemática del circuito se nos había brindado, con lo cual la mayor parte de los componentes necesarios, ya estaban identificados, debiéndose únicamente realizar la búsqueda de los mismos en el distribuidor Farnell. También se determinaron y agregaron a la lista de componentes a adquirir aquellos que eran necesarios debido a las modificaciones que se hicieron.

Main Board - Versión 1.

Nombre	Tipo	Valor	Footprint	Farnell Code	Cantidad
$IC1$	Microcontrolador	ATmega2560	TQFP100	1288330	1
C_3, C_4, C_5, C_6	Capacitor Cerámico 6.3 V	$10\,\mu F$	1206	1301815	4
C_1, C_2	Capacitor Cerámico	$18\,pF$	1206	1163997	2
L_1, L_2, L_3, L_4, L_5	Inductor	$10\,\mu H$	1812	1174073	5
R_5, R_6, R_{21}	Resistencia	$4{,}7\,k\Omega$	1206	9240608	3
$Q11$	Cristal	$8\,MHz$	HC49/U	9712380	1
$IC8$	Amplificador Operacional -	LT1114S	SO16	9560033	1
R_1	Resistencia	$200\,\Omega$	1206	9336109	1

Continúa...

Nombre	Tipo	Valor	Footprint	Farnell Code	Cantidad
R_2	Resistencia	$220\,\Omega$	1206	9240900	1
R_3	Resistencia	$2{,}2\,k\Omega$	1206	1152748	1
R_4	Resistencia	$2\,k\Omega$	0805	2135450	1
R_{13}	Resistencia	$1{,}65\,k\Omega$	0805	1152193	1
R_{14}	Resistencia	$10\,k\Omega$	0805	2136053	1
$IC9$	Control de tensión	MAX811LEUS+T	SOT-143	1188060	1
$IC4$	Transceiver	MAX232ACWE+	SOIC16	9724370	1
$C_{20}, C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{24}$	Capacitor Cerámico	$100\,nF$	1206	1414715	5
RLY_1, RLY_2 RLY_3	Relé	G6HK-2100 5DC	G6H2-100	1181061	3
$R_7, R_8, R_9, R_{10}, R_{11}, R_{12}$	Resistencia	$1\,k\Omega$	1206	9240527	6
R_{18}, R_{19}, R_{20}	Resistencia	$120\,\Omega$	1206	9335854	3
$Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_6, Q_8$	Transistor -NPN	BC547	TO-92	1097287	6
$D_2, D_3, D_4, D_5, D_6, D_7$	Diodo	1N4002	DO41-10’	9565000	6
D_8, D_9, D_{11}	LED	HSMC-S690	Chipled - 0603	3229531	3
JP_4, JP_{13}	header	6 pines	Pinhead 2x03	1248132	2
$IC2, IC5$ $IC6, IC7$	Serial EEPROM I^2C	24FC512-I/SM.	SO-08M	9548548	4
$U\$4$	Sensor de presión	ASCX15AN	ASCX	1383908	1
$TRIM3$	Preset Multivuelta	$10\,k\Omega$	3266W	9352651	1
R_{22}	Resistencia	$200\,k\Omega$	1206	9336133	1
$TMP100$	sensor de temperatura	TMP100NA/250G4	TMP100	1234659	1
$U\$3$	generador de $-5V$	ICL7660AIBA	SOIC8	1524896	1

Continúa...

Nombre	Tipo	Valor	Footprint	Farnell Code	Cantidad
C_7, C_8	Capacitor electrolítico	$47\,\mu F$	RLC 5-6	1144612	2
$IC3$	Compensador de punta fría	AD594AQ	DIL14	409182	1
$SW1$	dip switch	A6S-2102-H	Switch	1455487	1
$U\$2$	sensor de humedad	HIH-4031-001	HIH403X	1566263	1

Cuadro A.5.: Lista de componentes para la Main Board versión 1. Los nombres de los componentes listados se corresponden con los de la figura H.2.

B. Conexionado de pines.

Tipo	Nombre	Nº Pin	Descripción
ADC	ADC0 / PF0	97	Sensor de Presión
ADC	ADC1 / PF1	96	Batería Escalada
ADC	ADC6 / PF6	91	Sensor de Humedad
ADC	ADC5 / PF5	92	Salida placa Termocupla
ADC	ADC2 / PF2	95	Voltaje resistor *shunt* placa Anti Latchup. **Entrada diferencial -**
ADC	ADC3 / PF3	94	Voltaje resistor *shunt* placa Anti Latchup. **Entrada diferencial +**
UART	TXD0 / PE1	3	UART para el DUT - con MAX232
UART	RXD0 / PE0	2	UART para el DUT - con MAX232
UART	TXD2 / PH1	13	UART para el GPS
UART	RXD2 / PH0	12	UART para el GPS
UART	TXD3 / PJ1	64	UART para la Telemet Board
UART	RXD3 / PJ0	63	UART para la Telemet Board
TWI	SDA / PD1	44	Datos - direcciones serie
TWI	SCL / PD0	43	Reloj para los esclavos
Reset	$\overline{\text{RESET}}$	30	Reset
Cristal oscilador	XTAL1	33	Oscilador
Cristal oscilador	XTAL2	34	Oscilador
I / O	PA7	71	Prender Memorias
I / O	PA6	72	Apagar Memorias
I / O	PA5	73	Prender Sensores
I / O	PA4	74	Apagar Sensores
I / O	PA3	75	Prender DUT
I / O	PA2	76	Apagar DUT
I / O	PA0	78	$\overline{\text{CUT OFF}}$ - Quemado de la tanza
SPI / Programación	MISO / PB3	22	MISO - Master Input Slave Output
SPI / Programación	MOSI / PB2	21	MOSI - Master Output Slave Input
SPI / Programación	SCK/ PB1	20	SCK - Reloj SPI
SPI / Programación	$\overline{\text{SS}}$/ PB0	19	$\overline{\text{SS}}$ - Slave Select
Alimentación	VCC	10, 31, 61, 80	Tensión de alimentación para el microcontrolador
Alimentación	GND	11, 32, 62, 81	Tierra del microcontrolador

Tipo	Nombre	Nº Pin	Descripción
Referencia ADC	AVCC	100	Tensión de referencia analógica para el ADC
Referencia ADC	AGND	99	Tierra analógica del ADC
I / O	PG0	51	Propósito general
I / O	PG1	52	Propósito general
I / O	PC0	53	Propósito general
I / O	PC1	54	Propósito general
I / O	PC2	55	Propósito general

Cuadro B.1.: Resumen del conexionado de contactos del ATmega2560.

C. Planificación.

En este capítulo realizaremos una descripción acotada de la planificación del proyecto, el cuál era uno de los objetivos implícitos a cumplir al estar el proyecto dentro del marco del curso de proyectos de fin de carrera. También se hará el análisis del cumplimiento de dicha planificación y las modificaciones que sufrió durante el desarrollo del proyecto.

C.1. Plan del Proyecto.

El plan del proyecto es la guía básica para el seguimiento del proyecto y la verificación del cumplimiento de los objetivos dentro de los plazos de tiempo estipulados. Para la confección del mismo se utilizan varias herramientas de la gestión de proyectos dentro de las cuales se incluyen: la formulación inicial, descomposición del objetivo general en objetivos específicos, estructura de división del trabajo (WBS), cronograma, costos del proyecto y gestión de riesgos.

El plan del proyecto incluye la descripción del mismo, la definición de los objetivos generales expuestos en el capítulo anterior, los principales actores, restricciones y supuestos, una descripción y especificación funcional en la que se define el alcance del proyecto. También se incluyen los objetivos específicos, entregables y el WBS, se realiza un análisis de posibles riesgos y un cronograma y listado de tareas. Finalmente a partir de toda la información generada con las diferentes herramientas y análisis se realiza un diagrama Gantt del proyecto en el cual se puede observar gráficamente la evolución e interdependencia temporal de las diferentes tareas que fueron identificadas.

C.2. Resumen del Plan del Proyecto.

- **Estudiantes:**
  - Gonzalo Caudullo, 3.686.022-0, lalo1984_908@hotmail.com
  - Matías Lens, 3.893.423-7, matiaslens@gmail.com
  - Manuel Fajardo Sokol, 3.803.691-4, gallegofs@gmail.com
- **Cliente:**
  - Raoul Velazco, investigador del Instituto Politécnico de Grenoble.

- **Tutores:**
  - Ing. Sebastián Fernández.
  - Ing. Juan Pechiar.
- **Co - Tutor:**
  - José Luis Vila.
- **Fecha prevista de finalización:**
  - 2 de Setiembre de 2008.
- **Total de horas a realizar previstas por el grupo del proyecto:**
  - 650 horas por estudiante.

Fecha y descripción de los entregables intermedios:

15/02/2008 – Primer entregable.

Se entregarán tres placas idénticas conteniendo el micro, los sensores, todos los demás integrados y componentes requeridos (reguladores, capacitores, resistencias, oscilador, bobinas, etc.) y las interfaces necesarias para la comunicación con el resto de los bloques. Para esta instancia se pretende tener validada la comunicación del micro con los sensores y demás periféricos. No se pretende verificar el correcto funcionamiento de los sensores sino la transmisión de los datos de los mismos hacia el micro (no importa la información de los datos proveniente de los sensores sino que se reciban datos).

16/06/2008 – Segundo entregable.

Para este entregable se deberá tener validada la placa en su totalidad, comprobando el correcto funcionamiento en todos los aspectos de la misma (adicionalmente a los puntos verificados en el entregable anterior, deberá funcionar correctamente el procesamiento de datos, la comunicación con la placa de transmisión RF y con la placa de testeo del DUT). Para esto será necesario haber concluído y validado las rutinas *software* que se deben implementar. Se estudiará el diseño VHDL implementado por estudiantes franceses del Politécnico de Grenoble. Se deberá comprender el funcionamiento del mismo por completo, y en el caso de ser necesario se realizarán modificaciones o agregados de forma de lograr la correcta comunicación entre esta placa y el micro y que el testeo del DUT se logre en forma exitosa. Se realizará el modelado térmico del sistema. El mismo se validará en el último entregable en primera instancia mediante ensayos bajo condiciones similares a las de grandes alturas y luego con el posterior lanzamiento del *balloonsat*.

1/09/2008 – Entrega final.

Se entregarán los resultados y conclusiones obtenidos de la etapa de experimentación, tanto de ensayos en laboratorio como los experimentos de campo de lanzamiento del globosat, así como la documentación completa del proyecto.

Este resumen es el que fue incluído dentro de la planificación del proyecto realizada y entregada como una de las tareas del curso de proyectos de fin de carrera. El documento completo puede ser consultado en el moodle del instituto (poner referencia). Cabe destacar que con el transcurso del proyecto se fueron provocando cambios importantes que fueron apartando el transcurso del mismo de la planificación. Los principales cambios sufridos, en tareas y objetivos del proyecto serán analizados en la siguiente sección.

C.3. Análisis de los principales cambios en la Planificación.

Antes de señalar y examinar los cambios más significativos sufridos durante el proyecto debemos subrayar que cuando se inicio el proyecto la delimitación del alcance y las tareas a realizar se encontraban lejos de una definición exacta y precisa. Desde el inicio del proyecto en el arranque del segundo semestre de 2007 se fijaron y realizaron reuniones de proyecto todos los lunes en las que participaban los tutores y los grupos HWGlobosats y Teleglobosats con el fin de definir y coordinar los trabajos que debían ser realizados por cada grupo. Cuando se realizó el plan del proyecto todavía quedaban muchas dudas acerca de la realización de algunas tareas y los límites de las mismas, con lo cuál luego de haber entregado dicho plan se siguieron modificando objetivos y actividades haciendo que el proyecto se alejara del plan entregado.

Uno de los acontecimientos más importantes y que marcaron un punto importante a partir del cuál se puede establecer que finalmente se fijaron definitivamente el alcance de cada uno de los proyectos de fin de carrera involucrados y los objetivos que se debían cumplir, fue la fijación de la primer liberación a realizar, que trajo consigo la modularización definitiva del *hardware*. Este acontecimiento, dada su relevancia, fue analizado en el capítulo 2.

La dificultad señalada en lograr una definición exacta de lo que se debía realizar en el proyecto trajo aparejado el retraso en las tareas que se habían planificado. También se volvió bastante engorrosa la tarea de búsqueda y definición de los componentes a utilizar que debían ser adquiridos para la implementación de los diseños, dado que el proceso no estaba propuesto con un desarrollo natural y se había marcado que está tarea debía ser realizada antes de haber concluído los diseños. O sea se debía definir todos los componentes a utilizar antes de haber diseñado los circuitos, cosas que claramente debían realizarse en paralelo. Con esto queremos decir que la lista definitiva de componentes se tendría que finalizar una vez que se tuviera completo el esquemático de los circuitos que se implementarían, cosa que sucedió en los hechos.

Otra desviación importante fue la fijación de una primera liberación para la prueba de la telemetría, esto es así ya que lo que se había planificado era una única liberación a

realizar luego de haber concluído la fabricación y pruebas del HW e implementación del SW. Esto además de agregar una actividad no planificada, modificó el orden de otras tareas que habían sido previstas como el diseño del payload y la planificación de la liberación.

Visto el retraso con el que se iba desarrollando el proyecto en una reunión con el tutor Sebastián Fernández se decidió eliminar la tarea de estudio del diseño VHDL que sería cargado en el FPGA que controlaría las memorias a ser testeadas. También se decidió dar una prioridad baja al diseño e implementación del circuito anti Latchup, el cuál finalmente no pudo ser implementado debido a la falta de algunos componentes. Este diseño quedará documentado para su posterior continuación por parte de los otros grupos que continuarán el proyecto Laí.

También se debe señalar que hubo retrasos y prolongación en el tiempo de algunas tareas más allá de lo previsto. Principalmente en la realización del *software* y planificación y pruebas para las liberaciones, que como se señaló había sido previsto únicamente una, siendo que finalmente fueron realizadas 3. Otros factores que contribuyeron al retraso general del proyecto fueron imprevisiones un poco más difíciles de evitar como por ejemplo los problemas que surgieron por el efecto de la radiofrecuencia sobre las fuentes implementadas, como se vio en la sección 4.3.

Como conclusión el proyecto sufrió retrasos importantes que llevaron a que el mismo se extendiera más allá de los plazos estipulados para su desarrollo y conclusión, teniéndose que solicitar una prórroga, aunque creemos que los motivos principales que llevaron a esto fueron los expuestos en los párrafos anteriores y a que el alcance del proyecto era muy amplio y que la dedicación del horaria del grupo fue correcta y también se extendió más allá de lo previsto para los proyectos de fin de carrera.

D. Proyectos de SW para testeo de HW y funciones implementadas.

En este capítulo se analiza y describe el desarrollo de los diferentes proyectos de SW que permitieron la validación tanto del HW como de las funciones que luego serían utilizadas por el grupo de estudiantes TELEGLOBOSATS para el manejo de los periféricos.

D.1. Proyecto `get_humedad_test`.

Para el testeo de la función `get_humedad` se construyó el proyecto `get_humedad_test`. La secuencia de acciones que se toman en dicho proyecto se ilustran en el diagrama de flujo de la figura D.1.

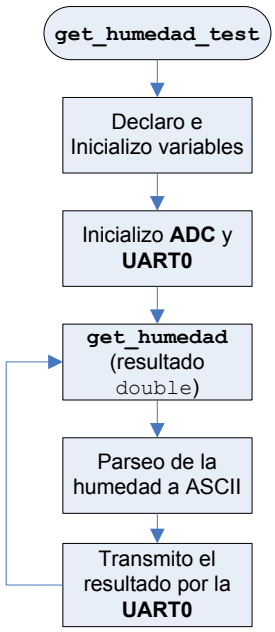


Figura D.1.: Diagrama de flujo para el proyecto `get_humedad_test`.

- Las funciones incluidas dentro del proyecto son:
  - `adc_init2`. Consultar la sección 9.2.1.
  - `get_humedad`. Consultar la sección 9.2.8.
  - `UART_Init`. Consultar la sección 9.2.29.
  - `UART_Transmit`. Consultar la sección 9.2.31.

D.2. Proyecto `get_presion_test`.

Para el testeo de la función `get_presion` se construyó el proyecto `get_presion_test`. La secuencia de acciones que se toman en dicho proyecto se ilustran en el diagrama de flujo de la figura D.2.

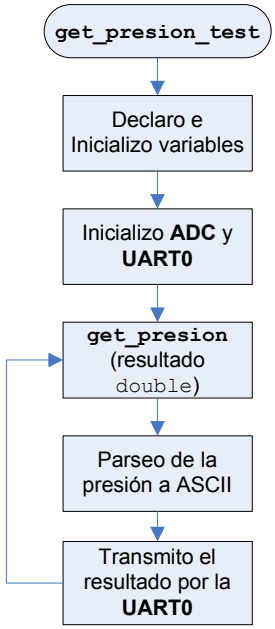


Figura D.2.: Diagrama de flujo para el proyecto `get_presion_test`.

- Las funciones incluidas dentro del proyecto son:

- `adc_init2`. Consultar la sección 9.2.1.
- `get_presion`. Consultar la sección 9.2.9.
- `UART_Init`. Consultar la sección 9.2.29.
- `UART_Transmit`. Consultar la sección 9.2.31.

D.3. Proyecto `get_Vss_test`.

Para el testeo de la función `get_Vss` se construyó el proyecto `get_Vss_test`. La secuencia de acciones que se toman en dicho proyecto se describen en el diagrama de flujo de la figura D.3.

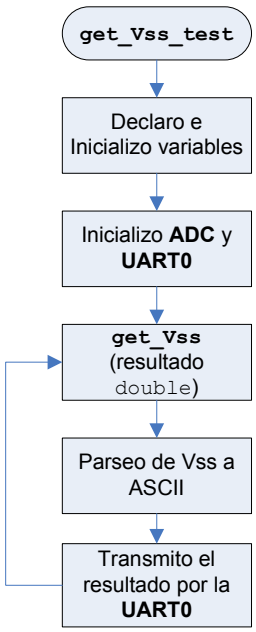


Figura D.3.: Diagrama de flujo para el proyecto `get_Vss_test`.

- Las funciones incluidas dentro del proyecto son:
  - `adc_init2`. Consultar la sección 9.2.1.
  - `get_Vss`. Consultar la sección 9.2.11.
  - `UART_Init`. Consultar la sección 9.2.29.
  - `UART_Transmit`. Consultar la sección 9.2.31.

D.4. Proyecto `Quema_Tanza_TEST`.

Para el testeo de la función `quemar_tanza` se construyó el proyecto `Quema_Tanza_Test`. La secuencia de acciones que se toman en dicho proyecto se ilustran en el diagrama de flujo de la figura D.4. La acción Salida **PA0** = 1 vuelve a nivel alto la salida 0 del puerto A, PA0, la cual, para realizar las pruebas, se había llevado a nivel bajo en el archivo `quemar_tanza.c` que se utilizó en este proyecto sólo a efectos de testeo[1].

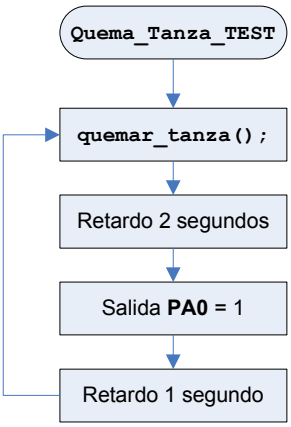


Figura D.4.: Diagrama de flujo para el proyecto `Quema_Tanza_Test`.

- Función utilizada dentro del proyecto:
  - `quemar_tanza`. Consultar la sección 9.2.18.

D.5. Proyecto `tmp_termocupla_test`.

Para el testeo de la función `tmp_termocupla` se construyó el proyecto `tmp_termocupla_test`. La secuencia de acciones que se toman en dicho proyecto se ilustran en el diagrama de flujo de la figura D.5.

[1] Como se describe en la sección 9.2.18, el archivo `quemar_tanza.c` utilizado en las liberaciones pone en *nivel alto* la salida.

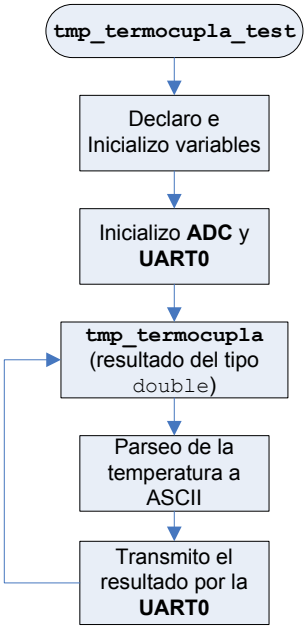


Figura D.5.: Diagrama de flujo para el proyecto tmp_termocupla_test.

- Las funciones incluidas dentro del proyecto son:
  - `adc_init2`. Consultar la sección 9.2.1.
  - `tmp_termocupla_test`. Consultar la sección 9.2.27.
  - `UART_Init`. Consultar la sección 9.2.29.
  - `UART_Transmit`. Consultar la sección 9.2.31.

D.6. Proyecto `UART_Init_Test`.

Para el testeo de la función `UART_Init` se construyó el proyecto `UART_Init_test`. El diagrama de flujo de este proyecto se muestra en la figura D.6.

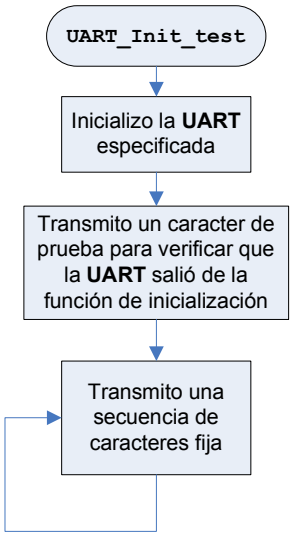


Figura D.6.: Diagrama de flujo para el proyecto `UART_Init_Test`.

- Las funciones incluidas dentro del proyecto son:
  - `UART_Init`. Consultar la sección 9.2.29.
  - `UART_Transmit`. Consultar la sección 9.2.31.

D.7. Otros proyectos de test.

En la presente sección se detallan otros proyectos de *test* que no necesariamente prueban funciones específicas, sino que pueden *testear conjuntos* de ellas o directamente pueden haber sido desarrollados con algún propósito particular.

D.7.1. Proyecto `calibracion`.

Este proyecto fue desarrollado en ocasión de la concurrencia a los laboratorios del LATU para realizar las calibraciones de los sistemas de medida de presión y temperatura externa.

La secuencia de acciones realizadas es la siguiente:

1. Se declaran e inicializan variables.
2. Se inicializa la UART0, habilitándola para transmisión y recepción a 4800 BPS.
3. Se ingresa en un bucle infinito en el que:
   a) Se llama a la función `tmp_termocupla()`. Se obtiene un `float` con el valor de voltaje proporcionado por la placa de amplificación y compensación de la termocupla. De esta manera se releva una curva $V_{placa\,termocupla} = \mathcal{F}(\mathcal{T})$.
   b) Se *parsea* el resultado anterior a ASCII.
   c) Se transmite el voltaje de la placa de la termocupla por la UART0.
   d) Se espera cierta cantidad de tiempo.
   e) Se llama a la función `get_presion()`. Recordar que ésta devuelve un `float` con un valor de presión. De esta manera se releva una curva $Presión\,Placa = \mathcal{F}(\text{Presión LATU})$.
   f) Se *parsea* el resultado anterior a ASCII.
   g) Se transmite la presión medida por la placa por la UART0.
   h) Se espera cierta cantidad de tiempo.

- Las funciones utilizadas en este proyecto son:
  - `adc_init2`. Consultar la sección 9.2.1.
  - `tmp_termocupla`. Consultar la sección 9.2.27.
  - `get_presion`. Consultar la sección 9.2.9.
  - `UART_Init`. Consultar la sección 9.2.29.
  - `UART_Transmit`. Consultar la sección 9.2.31.
- Se importan las librerías `util/delay.h` y `stdlib.h`.

D.7.2. Proyecto `prende_apaga_test`.

Para el testeo de las funciones `apagar_DUT`, `apagar_memorias`, `apagar_sensores`, `prender_DUT`, `prender_memorias` y `prender_sensores`, se construyó el proyecto `prende_apaga_test`. La secuencia de acciones que se toman en dicho proyecto se describen en el diagrama de flujo de la figura D.7.

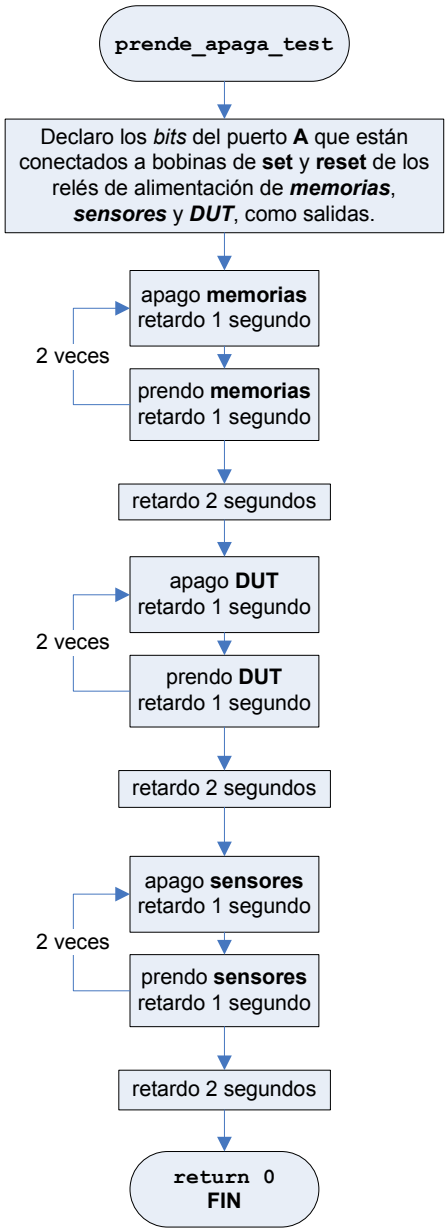


Figura D.7.: Diagrama de flujo para el proyecto `prende_apaga_test`.

Si se parte de un estado en el que todos los relés estén *seteados*, alimentando a sus respectivos dispositivos[2][3], y con los *jumpers* que conectan los diodos que denotan la alimentación conectados; se podrá ver:

1. El apagado y encendido del *led* de alimentación de las memorias, con los *leds* de sensores y DUT encendidos.
2. El apagado y encendido del *led* de alimentación del DUT, con los *leds* de sensores y memorias encendidos.
3. El apagado y encendido del *led* de alimentación de los sensores, con los *leds* de DUT y memorias encendidos.
4. Culminado el *test* luego de algunos segundos, todos los *leds* de alimentación permanecerán prendidos, permaneciendo en este estado indefinidamente.

- Las funciones incluidas dentro del proyecto son:
  - `apagar_DUT`. Consultar la sección 9.2.2.
  - `apagar_memorias`. Consultar la sección 9.2.3.
  - `apagar_sensores`. Consultar la sección 9.2.4.
  - `prender_DUT`. Consultar la sección 9.2.15.
  - `prender_memorias`. Consultar la sección 9.2.16.
  - `prender_sensores`. Consultar la sección 9.2.17.
- En caso de observar un comportamiento inesperado con respecto al encendido / apagado de los relés, se sugiere revisar las conexiones (las soldaduras) de los relés y los transistores que los manejan.

D.7.3. Proyecto `Memory_test_read.c`.

Esta rutina cuenta con la misma forma que la rutina `Memory_write` 9.2.13, siendo bastante similares. Pero debido a que la misma no era utilizada durante el vuelo y era posible leer el contenido de las memorias sin inconvenientes, se mantuvo el manejo de los punteros de las memorias externas mediantes variables externas (**`extern`**).

Los atributos que se pasan a la rutina son el número de esclavo correspondiente a la memoria que se desea leer, un puntero al primer elemento de un *buffer* en el cual serán guardados los datos leídos y el largo del *buffer*, que es equivalente a la cantidad de datos que se deben leer. En la primera parte se selecciona el *address* del *slave* y los valores de los punteros de memoria según el numero de esclavo, como se muestra en la figura 9.4.

[2] Llámese DUT, memorias o sensores.
[3] Por ejemplo luego de haber ejecutado el propio proyecto `prende_apaga_test`.

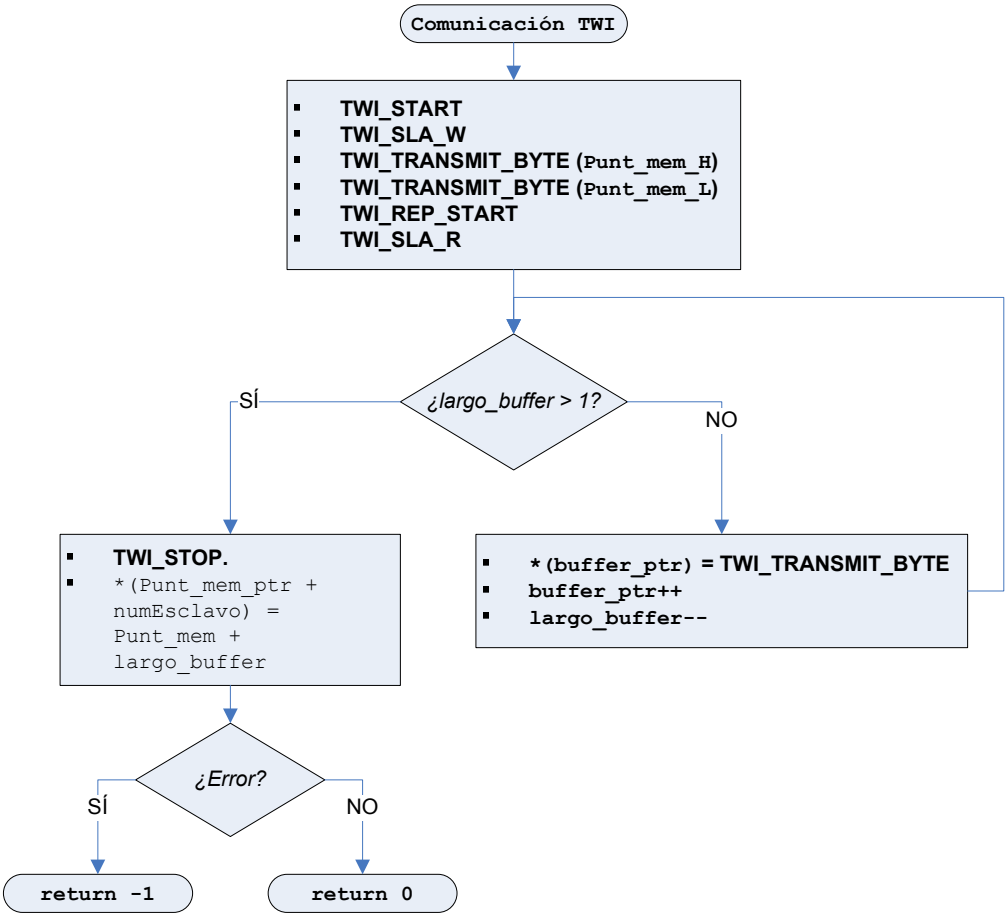


Figura D.8.: Diagrama de flujo para el proyecto `Memory_test_read`.

En la figura D.8 se puede observar la secuencia de comandos enviados por el maestro al *bus* TWI para establecer la comunicación con el esclavo y luego esperar los *bytes* transmitidos desde el esclavo al maestro, cuando finaliza el proceso el último envía un `STOP` al *bus*. La función retorna un «`0`» si no se producen errores, o un «`-1`» en otro caso.

D.7.4. Proyecto `Prueba_ADC`.

Para el testeo de la función `adc_init2` se construyó el proyecto `Prueba_ADC` [Fu07]. La idea detrás de este proyecto es simplemente inicializar un canal del ADC dado, realizar la conversión, parsear el resultado a ASCII y enviarlo a través de una UART. Midiendo los voltajes en los contactos de salida de los sensores analógicos y comparándolos con la salida de este programa se puede testear que las conversiones se están realizando de una manera correcta.

La secuencia de acciones que se toman en dicho proyecto es la siguiente:

1. Declaración e inicialización de variables.
2. Inicialización de un canal dado del ADC.
3. Inicialización de una UART para realizar la transmisión del resultado de la conversión.
4. Se ingresa en un bucle infinito en el que:
   a) Se comienza un conversión y se aguarda su completitud.
   b) Se lee el resultado de la conversión.
   c) Se *parsea* el resultado a formato ASCII.
   d) Se transmite el mismo por la UART que previamente se había inicializado.
   e) Se espera un tiempo dado.

- Las funciones incluidas dentro del proyecto son:
  - `adc_init2`. Consultar la sección 9.2.1.
  - `UART_Init`. Consultar la sección 9.2.29.
  - `UART_Transmit`. Consultar la sección 9.2.31.

E. Descripción de las Liberaciones de los Globosats.

E.1. Descripción de la liberación del GS01.

La partida a Durazno fue en la tarde del Miércoles 23 de Abril, hacia la Base Aeronáutica Militar de Santa Bernardina para preparar la liberación del globo, determinada para el día siguiente, 24 de Abril, a las 7 de la mañana. Entre las 22 horas del Viernes y las 2 de la mañana del dia siguiente se relizaron los preparativos relativos a la liberacion, montandose el equipo de recepción para adquisición de los datos transmitidos desde la cápsula, se controlo el paracaídas, se conectó la válvula de transferencia y la manguera correspondiente al tanque de helio para realizar el llenado del globo. También se hicieron tambien los cálculos necesarios para determinar la cantidad de gas adecuada para el llenado del globo según datos del fabricante. En la figura E.1 podemos observar parte de lo dicho en el párrafo anterior.

La carga útil de la cápsula estaba compuesta por el transmisor, la placa del grupo de TeleGlobosat que se encargaba de formar la trama con los datos a ser transmitidos a Tierra, el circuito Quema Tanza, una batería de11,1 V y una *handycam* con capacidad para grabar hasta dos horas del recorrido de la cápsula. En la figura E.2 podemos ver lo mencionado.

Para controlar el empuje del globo inflado con helio, se contaba con una balanza digital, dos pesas, y un circuito de transferencia del gas desde el el tanque de helio de6 m^3 a la boca del globo. Éste debía ser cargado con 4 m^3 de Helio según las especificaciones del fabricante. Esta cantidad esta indicada como óptima para alcanzar la altura máxima de 34 km y obtener asi un ascenso adecuado con relacion a la masa total a elevar.

Los 4 m^3 de Helio proporcionan un empuje de 3830 g, y el globo presenta una masa de 1500 g (nominales), con lo cual el empuje del globo con el Helio pasaría a ser de 2330 g (3830 − 1500), colocándole una carga nominal (indicada por el fabricante) de 1050 g, el empuje que determina la velocidad del ascenso sería de 1280 g (2330 − 1050).

Figura E.1.: Equipo utilizado para la recepción de los datos transmitidos desde la cápsula.

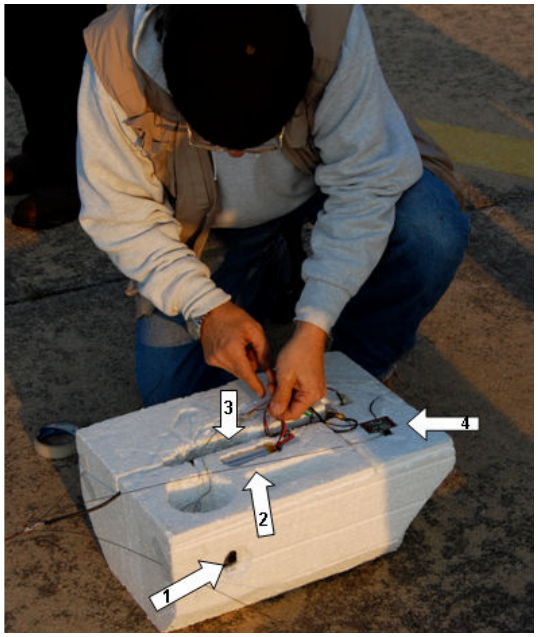
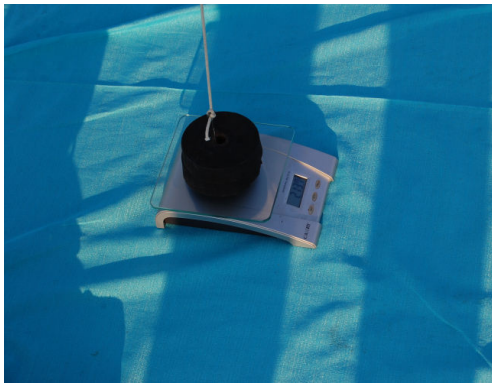
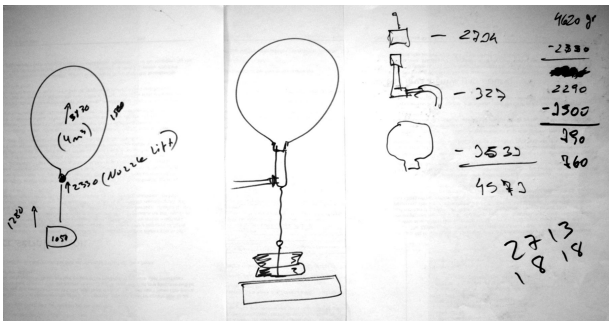


Figura E.2.: Señalamos mediante «**1**» la *handycam*, «**2**» la batería, «**3**» la ranura media de la cápsula en que se encontraban el transmisor y la placa del grupo TELEGLOBOSAT y «4» el circuito QUEMA TANZA.



(a) Balanza.



(b) Cálculos realizados para determinar el empuje necesario.

Figura E.3.: Medición de la balanza y cálculos realizados.

Debía entonces determinarse el momento en el cual se había llenado el globo con 4 m³ sin contar con ninguna forma de medir el volumen de Helio que fue suministrado. Para esto fueron utilizadas las dos pesas y la balanza digital. Se midió la masa de las dos pesas que totalizó 2714 g, la masa del artefacto utilizado para el llenado del globo de 327 g y la masa del globo de 1530 g.

La masa de estos tres objetos totaliza 4571 g. Si le restamos el empuje del globo sin la carga nominal de 1050 g y sin la masa del globo de látex de 1530 g que es de de 3830 g, obtenemos haciendo un balance de fuerzas que la balanza debe medir una masa de aproximadamente 750 g cuando el globo se encuentre cargado con 4 m³ de He. En la figura E.3 se muestra una imagen de los cálculos realizados en el local de la liberación y de la medición de la balanza digital en el momento en que se llenaba el globo.

Al mismo tiempo que se realizaba el inflado también se preparaba la cápsula con la carga útil y se colocaron todos los circuitos dentro de la misma, conectándolos para comenzar a recibir los datos transmitidos. En ese momento se advirtieron problemas con el GPS, el cual en ningún momento envió información de posición, lo que indicaba que no recibía señal de satélite. Esto se comprobo a traves del software de decodificación de mensajes al recibir la indicación de «`NO SAT`», enviada por el sistema cuando el GPS no podía fijar la posición pues no captaba la señal de una cantidad suficiente de satélites.

Luego de varios intentos moviendo la cápsula a diferentes ubicaciones y no obtener resultados positivos, se decidió liberar del globo sin información del GPS. Estta determinación se tomó dado que a esa hora existían dos horas de retraso con respecto al horario previsto para la liberación que era a las 7 a.m.. El Globo se liberó a las 9 de la mañana del Jueves 24 de Abril, momento registrado en la figura E.4.

Figura E.4.: El jefe del proyecto en el momento de la liberación del GLOBOSAT01.

A partir de ese momento se comenzó el monitoreo de los datos trasmitidos durante el ascenso y descenso de la sonda a través de dos equipos de recepción. Estos datos decodificados por un *software* de recepcion de APRS y con cada transmisión correctamente recepcionada se obtenía datos de temperatura interna y externa, así como el mensaje de que el GPS no recepcionaba señal de satélite.

Fue posible seguir en forma aproximada la dirección y altitud del globo mediante estimaciones, realizando cálculos observando la dirección a la que apuntaban las antenas de los equipos de recepción, ángulo y datos de temperatura.

Se recibieron tramas de datos por aproximadamente 3 horas, tiempo estimado para el vuelo, por lo cual se piensa que se pudo seguir todo el periplo de la carga. Lamentablemente, al no contar con la información de posición GPS, no se pudo establecer de forma exacta el lugar en donde cayó la carga con su paracaídas.

Inmediatamente que se perdió la telemetría se estimó que el artefacto habia tocado tierra y se partió en la dirección aproximada en la que se estimaba que había caído la carga, con la esperanza de que en algún momento se volveria a recibir la transmisión, aunque conscientes de que esto era poco probable.

Finalmente, y a mitad de camino se recibe una llamada telefónica con la noticia de que la cápsula había sido encontrada en un establecimiento agropecuario en el departamento de Treinta y Tres, en el paraje Quebrada de los Cuervos. Los moradores del lugar (figura E.5) enviaron un mensaje de texto a uno de los teléfonos escritos en el exterior de la cápsula, para que en un caso como este pudiéramos ser contactados y recuperarla como sucedió.

Figura E.5.: Momentos de la recuperación de la cápsula.

Una vez recuperada la cápsula por los tutores el Viernes 25 pudimos recuperar todos los equipos que no sufrieron ningún tipo de daño por la caída y tuvimos a disposición el

video grabado por la *handycam*. En el video se pueden observar 40 minutos del vuelo, no pudiéndose ver el momento en que se alcanzaba la altura máxima dado que se estima que el ascenso duró aproximadamente una hora y media. A pesar de que la capacidad de la cámara era suficiente para almacenar dos horas, la grabación se detuvo con anterioridad. Una de las hipótesis que se maneja es que la temperatura del entorno en el que se encontraba la misma alcanzó valores muy bajos, pudiendo influir directamente sobre su electrónica o las baterías que la alimentaban sufriendo una caída significativa en su voltaje, no siendo suficiente para alimentar a la cámara.

En resumen, se puede considerar que el experimento fue exitoso, en el cual se tuvo un único problema grave con el GPS, pero se adquirió mucha experiencia para próximas liberaciones la cual, como se podrá comprobar en las secciones 10.3 y 10.4, fue de gran utilidad.

E.2. Descripción de la liberación del GS02.

A partir de la experiencia obtenida en la primer liberación se realizó una distribución diferente de los recursos humanos y se realizaron algunos cambios en los procedimientos. Cabe destacar la incorporación al proyecto LAÍ de dos nuevos grupos de proyectos de fin de carrera, siendo que algunos de sus integrantes colaboraron en la realización del experimento.

Durante la preparación del experimento los estudiantes de los grupos HWGLOBOSATS y TELEGLOBOSATS se dedicaron a la depuración del sistema, realizando pruebas y testeando el *software* de manera de minimizar errores y asegurar el correcto funcionamiento del mismo. Una de las preocupaciones fundamentales era la recepción de información de posición obtenida del GPS, debido a la experiencia de la primera liberación. Fueron realizadas varias pruebas para comprobar la recepción correcta de estos datos, probando diferentes antenas y ajustando el *software*.

Además fueron corroborados la recabación de datos de los sensores - para esta liberación el único sensor calibrado era el de presión[1] -, y el correcto pasaje de los mismos vía *software* a la rutina principal, y la correcta comunicación con la PLACA DE TELEMETRÍA con la posterior transmisión de datos. Se comprobó la correcta interpretación del protocolo de comunicación implementado con el DUT, realizando simulaciones con la propia placa, en la cual se insertaban errores a drede para poder verificar que éstos errores eran identificados y transmitidos por el sistema.

En esta ocasión se construyó una cápsula nueva, a partir de un trozo del bloque de poliestireno expandido que había sido donado por el ING. DANIEL ULTRA en representación de la empresa BROMYROS. La decisión de hacer una nueva cápsula se fundamentó en el hecho de que la la carga útil que se debía llevar en esta segunda oportunidad era significativamente distinta a la primera.

[1] Más información sobre la calibración de este sensor se encuentra en la sección 7.3.

El grupo HWGlobosats, así como todos los involucrados formaron parte de varias reuniones de coordinación, en las cuáles se tomaban las decisiones, se planificaba el experimento y designaban tareas para realizar a corto plazo. Se redactaron *tasklists* para las tareas a través de las cuales se realizaría el seguimiento de las preparaciones. Dentro de las responsabilidades básicas que quedaron asignadas, los docentes se harían cargo de todos los trámites que se debían realizar ante autoridades, tales como las de la Facultad, Fuerza Aérea y empresas que brindarían apoyo, como AGA (LINDE) que suministro el Helio y Bromyros que aporto el material aislante.

Como fue mencionado en párrafos anteriores los dos grupos de fin de carrera más involucrados estaban encargados de consolidar el funcionamiento del sistema, mientras que los otros grupos integrados al proyecto posteriormente se encargaban de cosas como la previsión de la zona en la que caería la carga en base a los pronósticos de vientos.

Una vez que se consiguió que el sistema funcionara de acuerdo a lo previsto, se realizó una prueba del mismo en tierra, la cual servía para testear la comunicación de datos, y ganar experiencia a la hora de montar la base terrestre a ser desplegada en Durazno.Una de las razones para la realización de la misma era que en esta ocasión se había cambiado el transmisor, dado que el que había sido utilizado en el Globosat01 se había dañado y no se había podido reparar.

Para la prueba en cuestión se montaron las antenas de recepción en el estacionamiento de la Facultad, y el grupo HWGlobosats en conjunto con su tutor Sebastián Fernández, pusieron en funcionamiento el sistema realizando un recorrido en automóvil por la ciudad. La prueba de recepción desde la base resultó exitosa, recibiendo todas las tramas correctamente, logrando obtener los datos de los sensores, la información proporcionada por el GPS, y los resultados de los testeos del DUT.

La carga de la cápsula estaba conformada por el DUT, la Placa Main, de Telemetría, de fuentes, de Acondicionamiento de señal de la Termocupla, el nuevo transmisor y la batería de Li-Po. Esta cápsula no contaba con la cámara para la obtención de imágenes del vuelo debido a que la liberación estaba programada para la madrugada del 25 de Septiembre a las 2 a.m.

Uno de los principales cambios que se decidieron en las reuniones con respecto a la organización de la liberación en sí fue la división en grupos de los involucrados para efectuar distintas tareas. En la primer liberación todos los participantes estuvieron en Durazno, lugar en que fue realizado dicho evento. El seguimiento de la carga también se realizó desde la misma Base Aérea de Santa Bernardina. Y finalmente aquellos que desearon pudieron participar de la búsqueda de la carga que inició una vez que se creyó que la carga había arribado al suelo.

En esta oportunidad las fuerzas serían divididas en tres grupos. El primero sería el encargado de la liberación desde la Base Aérea Nº2 Santa Bernardina, y el establecimiento de una base para la recepción de los datos transmitidos. El segundo grupo estaría apostado en un lugar hacia el Este de Durazno con el fin de realizar el seguimiento y la posterior recuperación del *payload*, o *fox hunting*. Mientras tanto, el tercer grupo estaría en una base de recepción de datos establecida en Montevideo.

Figura E.6.: Equipo de personas en el proceso de inflado del globo. De derecha a izquierda, Tabaré Camargo, Emiliano Pastorino, Natacha Reyes, Gonzalo Caudullo, Matías Lens, Sebastián Fernández, Federico Cancela, periodista oriundo de Durazno.

Al día siguiente a la prueba, 24 de Septiembre, se reunieron en la facultad a las 16 hs como se había acordado todos los involucrados para corroborar y cargar en los móviles disponibles todo lo necesario para la liberación y a partir de ese momento cada grupo partió a ubicarse en sus lugares correspondientes para cumplir con las funciones planificadas anteriormente.

Rumbo a Santa Bernardina partieron dos autos, alrededor de la hora 20, llegando a destino 22:30. En los mismos se encontraban integrantes de los grupos de estudiantes de proyecto de fin de carrera y Sebastián Fernandez (figura E.6). El otro móvil disponible que fue destinado a la recuperación de la cápsula una vez que ésta tomara contacto con Tierra, tenía como tripulantes a José Luis Vila y Manuel Fajardo, quienes partieron alrededor de la hora 21, desde Montevideo con dirección hacia Sarandí del Yí. Los restantes estudiantes de proyecto en conjunto con Juan Pechiar montaron una radio base en Montevideo.

Una vez dentro de la base se procedió a realizar las principales tareas, dividiéndonos en grupos de forma de realizarlas en paralelo. Mientras se montaron las antenas (figura E.7a), otro grupo se encargó de verificar el cableado y todas las conexiones internas de la cápsula. Una vez verificadas las conexiones se dejó el equipo encendido monitoreando su funcionamiento (figura E.7b). Cerca de la una de la mañana del día 25 de Septiembre se cerró la capsula, retocando el calado de la misma, para que ésta quedara cerrada de la forma más hermética posible. En la planchada otro grupo de personas se encargaba de disponer todo para el llenado del globo con Helio. La masa final de la cápsula era

de 2090 g, significativamente mayor a la del *playload* de la primer liberación y mayor a la carga nominal del globo. Sin embargo, esto no representó un problema como fue resaltado en la sección 10.1. Todo el procedimiento del llenado del globo con Helio (figura E.7c), y la forma en que se deben atar el conjunto de cápsula más paracaídas más globo se hizo de la forma descripta en la misma sección.

Finalmente todo quedó listo para la liberación del GLOBOSAT02 y el mismo se realizó exactamente a las 3:15 hs de la madrugada. Luego de este momento apenas el globo adquirió la altura suficiente los tres grupos (el de la base aérea, el de rastreo y la base en MONTEVIDEO) comenzaron la recepción de las tramas enviadas desde la cápsula y el análisis de los datos recibidos (figura E.8).

Casi al mismo tiempo en que salía el grupo hacia DURAZNO, partió desde MONTEVIDEO el grupo que estaba encargado del *fox hunting* a las 21 hs. El vehículo utilizado era un LAND ROVER equipado con equipos de radio para la recepción de la señal del *payload*, computadoras portátiles con el *software* de decodificación de los mensajes, y un GPS que se conectaba a la misma máquina para obtener los datos de ubicación global del LAND ROVER.

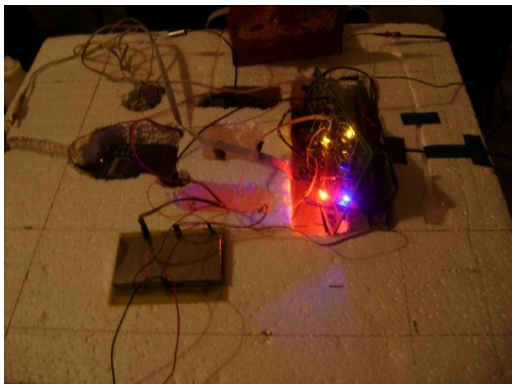
Aproximadamente a las 2 a.m., hora de la liberación se detuvo la marcha y se decidió esperar el aviso por parte del primer grupo de que el globo sonda había sido liberado. El lugar en que se detuvo el vehículo fue a pocos kilómetros de la intersección de las rutas 56 y 6 en el departamento de FLORIDA por ruta 56. Apenas notificada la liberación se empezaron a recibir las primeras transmisiones y se inició inmediatamente el seguimiento del globo a través de un mapa digital y otro en papel. Atentamente se seguió el recorrido impuesto por los vientos al experimento y una vez que el mismo en su trayecto en dirección Este intersectó la longitud en la que se encontraba el grupo, el grupo de *fox hunting* emprendió nuevamente la marcha tomando la ruta 6, siempre tratando de seguir lo más cercanamente posible la cápsula.

El recorrido realizado por el equipo luego de haber tomado la ruta 6 en dirección de SARANDÍ DEL YÍ, giró al Sureste por la ruta 41 y luego al Noreste por la ruta 7 en dirección a JOSÉ BATLLE Y ORDOÑEZ. Cuando el equipo de búsqueda transitaba por la ruta 7, la cápsula ya había aterrizado y se estaba siguiendo la última coordenada recibida, la cual había sido comparada con la última coordenada decodificada por la base en MONTEVIDEO, ésta era

Latitud: 33,5508 º Sur.

Longitud: 55,1297 º Oeste.

(a) Antenas YAGI de 5 elementos montadas para la recepción de la señal.



(b) Cápsula y carga útil siendo testeada minutos antes de la Liberación.

(c) . Inflado del globo. Se puede observar que los encargados de la tarea están utilizando guantes, el tanque de Helio y la manta que se coloca sobre la superficie para protección.

Figura E.7.: Tareas realizadas en paralelo en la preparación de la segunda liberación.

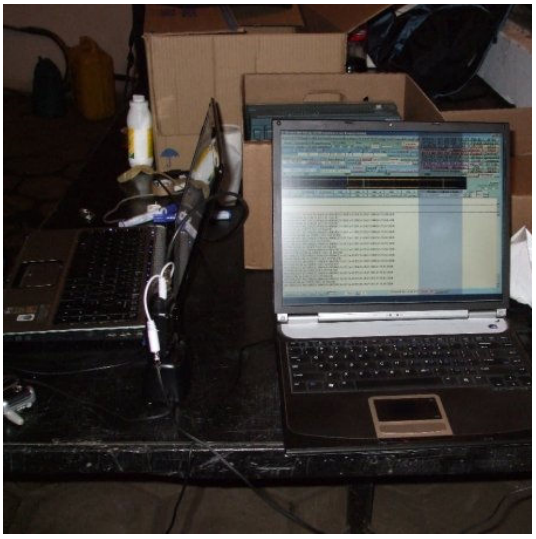


Figura E.8.: *Laptops* con el *software* de decodificación de paquetes, en las cuales se pueden visualizar los datos recibidos.

Altura: 3006 metros.

A medida que se iba moviendo el vehículo se comparaba constantemente la posición del mismo[2] con la mencionada coordenada, hasta que se alcanzó un punto en el cuál era imposible aproximarse más transitando por la ruta. En ese momento, manteniendo contactos con Montevideo, los cuales a través de Google Earth pasaban información al grupo sobre el local de la caída, se tomó la decisión de ir hasta Batlle y Ordoñez y luego tomar la ruta 14 en dirección Este para finalmente tomar un camino vecinal hacia el Sur. Todo el recorrido se hizo siempre con los equipos de radio encendidos y variando la posición de una antena Yagi que estaba conectada al equipo de radio, ya que en el caso en que el transmisor aún estuviera enviando paquetes estos podrían ser escuchados y a través de la posición de la antena se podría determinar la dirección a seguir para ubicar la cápsula.

En determinado momento el camino vecinal desviaba su rumbo de la dirección que se debía seguir y para continuar se necesitaba ingresar a una estancia. Aqui se decidió realizar una parada para llegar al establecimiento rural cerca del mediodía, hora en la cual probablemente se podría encontrar gente y así pedir paso para continuar la búsqueda. Cuando llegó el momento se habló con el encargado del local, pero este mencionó que no era posible proseguir por dentro del campo hacia donde se quería y que se debía regresar al camino. Nuevamente entonces se retomó el camino con la esperanza de recibir alguna transmisión que indicara el camino a seguir.

Después de un largo periplo por algunos caminos vecinales se terminó circundando el lugar de la última coordenada recibida sin lograr visualizar la cápsula con el paracaídas

[2]Obtenida via GPS.

y ni detectar con el receptor de radio ninguna señal proveniente de la misma. Entonces se emprendió el regreso a la capital por la ruta 7 a eso de la 1 p.m.. Alrededor de las 4 p.m. Sebastián Fernández comunicó al grupo de rescate que el experimento había sido encontrado por el dueño de una finca rural en el paraje de Molles de Godoy, pero el grupo de rescate ya se encontraba en Tala por lo cual se decidió no volver atrás y pedirle a Washington Puppi, productor que encontró la carga, que enviara la misma a través de una encomienda, a lo que accedió generosamente.

Como fue citado durante la descripción antes realizada, se puede apreciar la importante labor de apoyo realizada por la base de Montevideo, quien vía telefónica brindó datos para ayudar en la búsqueda del globo y cabe señalar además que con el equipo montado en esta base, fue con el cual se recibieron la mayor cantidad de paquetes incorruptos a pesar de la distancia y gracias a contar con antenas de mejor direccionabilidad y ganancia.

E.3. Descripción de la liberación del GS03.

Ya habiendo realizado dos liberaciones con anterioridad, en las cuales se había corrido contra el reloj para llegar a cumplirlas, se deseaba que el desarrollo de ésta fuera más tranquilo con plazos de tiempo más extendidos para su realización. Para esto las preparaciones se iniciaron veinte días antes de que la misma se concretara. Nuevamente se concretaron reuniones entre todos los involucrados distribuyendo las tareas de cada uno, de forma que las mismas fueran realizadas de forma ordenada.

Los grupos HWGlobosats y Teleglobosats siendo los más interesados en el cumplimiento de los objetivos en este experimento y también los más comprometidos, dedicaron sus esfuerzos a trabajar sobre el sistema que iría en el *payload*, tratando de prevenir todo error que pudiera surgir y corrigiendo problemas que acontecieron en la liberación anterior. Para esto fueron modificadas básicamente fallas del *software* y se volvió a montar todo el HW verificando conexiones.

Luego de las depuraciones realizadas se probó el sistema en su totalidad, usando como base, la bóveda que se encuentra en la azotea de la facultad. En este lugar se instaló el sistema y el mismo fue dejado funcionando durante la noche, dos días consecutivos.

Existían dos resultados fundamentales que se deseaban lograr de este tipo de pruebas. El primero era de que el sistema funcionaba correctamente, reportando todos los datos, los recabados de los sensores, los provenientes del DUT y los datos de posicionamiento global y que esto se realizara en forma cíclica y sin interrupciones inesperadas o tramas incorrectas.

El otro propósito buscado era determinar la duración de la batería determinando entonces hasta que momento se podía esperar recibir mensajes de la cápsula luego de que la misma cayera al piso.

Los resultados obtenidos fueron muy satisfactorios siendo que no se produjeron errores en ningún momento, y los paquetes transmitidos fueron recepcionados correctamente con sus equipos de radio por José Luis Vila y Juan Pechiar.

El dato que se quería conocer sobre la duración aproximada de la bateríade Li-Po era de 13 horas,lo que garantizaba un buen período de tiempo para la búsqueda de la cápsula y despejar la duda de que durante el rescate del Globosat02 este no fue el motivo que impidió escuchar la señal que debía haber provenido del mismo.

Otra de las tareas desempeñadas por el grupo HWGlobosats durante la preparación fue la calibración de los circuitos para la medición de la temperatura externa, para esto se trató de implementar varios métodos, pero finalmente se debió contar con la asistencia del LATU para su realización[3]. Cabe señalar que esta tarea demandó un gran esfuerzo por parte del grupo.

En conjunto con dos integrantes de uno de los grupos que se integraron al proyecto Laí, fue realizada la simulación de la caída de la cápsula con el paracaídas, como se observa en la figura E.9. Para esto se utilizó la cápsula de la primer liberación colocándole adentro una masa de forma que fuera equivalente a la masa de la carga en las liberaciones 2 y 3. Luego se ató el conjunto payload más paracaídas y se dejó caer el mismo desde la azotea de la facultad, en su esquina Sur Oeste. Se pudo observar claramente como el paracaídas frenaba la caída libre, haciendo que la cápsula aterrizara de forma suave sobre el suelo.

Figura E.9.: Momento de la caída de la cápsula en conjunto con el paracaídas desde la azotea de Facultad, comprobando el funcionamiento del último.

[3]En el capítulo 7 se puede profundizar en los aspectos que involucraron las calibraciones

Como fue mencionado en el relato de la liberación anterior los tutores se encargaron nuevamente de la parte administrativa, llevando acabo los trámites correspondientes en Facultad, para concesiones de permisos y pago de algunos gastos, en la Fundación Julio Ricaldoni para la obtención de financiación y ante las autoridades de la Fuerza Aérea para la obtención del permiso necesario por parte de los controladores de vuelo, quienes asignaron la fecha y hora de liberación del GLOBOSAT03 para las 6 a.m. Como en ediciones anteriores el Helio necesario fue suministrado por la empresa AGA.

Debido a que en esta ocasión no se realizó una previsión de la zona en la que pudiera caer la cápsula se decidió que se conformarían dos grupos, uno que permanecería en Montevideo y cumpliría el seguimiento del experimento desde la base montada en la azotea de la facultad. Este grupo estaba conformado por el tutor Juan Pechiar y los estudiantes que por distintos motivos no pudieron ir a Durazno. El otro grupo partiría a Durazno y realizaría la liberación del globo, para luego dividirse en dos, ya que un vehículo emprendería rumbo tratando de seguir el globo desde que se lo liberara, mientras los restantes efectuarían el seguimiento de los datos a través de la recepción de los mismos con una base montada en Santa Bernardina.

El día viernes 19 de diciembre a las 16 hs se encontraban en Facultad de Ingeniería todos aquellos que iban a participar de una forma u otra en la liberación. En ese momento todos se dedicaron a la tarea de cargar los equipos necesarios y hacer el chequeo correspondiente contra las listas confeccionadas de lo que debería ser llevado. Cuando estaba todo prácticamente listo el grupo que iría en el Land Rover partió debido a que les toma una mayor cantidad de tiempo el viaje, y dos horas después alrededor de las 20 hs salieron con destino a Durazno dos vehículos con los restantes.

A las 23 horas ya todos se encontraban en la planchada de la Base Aérea Nº2 organizando todo para luego de un descanso de algunas horas, regresar a las 5 a.m. para iniciar el proceso de la liberación. Se armaron las antenas para la recepción de la señal (figura E.10a), se ultimaron detalles en la carga de la cápsula (figura E.2), poniéndola en funcionamiento y verificando que todo se encontraba conforme lo esperado. Estos procedimientos finalizaron a las 2:30 a.m., cuando los involucrados se retiraron a cenar y descansar para la aventura que se aproximaba.

Luego de hora y media destinada para cenar, todos retornaron a la Base Aérea y se empezaron a desarrollar las tareas para la posterior liberación. Naturalmente se produjo una división de la misma y se conformaron dos grupos, uno que se encargaba de la preparación de la cápsula, cerrado, ataduras, paracaídas, y un segundo grupo se preocupaba por el llenado con el He del globo de látex.

Para sorpresa de todos se produjeron una serie de inconvenientes de último momento que pudieron ser subsanados con solvencia y utilizando lo que se tenía a disposición. Dentro de estos inconvenientes, se produjo un problema con la antena del GPS que presentaba un falso contacto en su conector, el cual no se había presentado durante las pruebas en

(a) Antenas Yagi de 5 elementos siendo montadas por Federico Cancela con la ayuda del chofer de la fundación Ricaldoni, Agustín.

(b) Preparación de la cápsula y carga útil.

Figura E.10.: Tareas realizadas en paralelo en la preparación de la segunda liberación.

Figura E.11.: Momento en que el jefe del proyecto realizaba la liberación del GLOBOSAT03.

Facultad o la realizada hacía pocas horas durante la preparación del paquete. También se percibió otro problema con la señal que comandaba el `PTT` del transmisor, a diferencia del anterior este problema no se solucionó, en parte por la urgencia y porque además se podía llevar adelante el experimento a pesar del mismo. Luego de solventada la falla de la antena y sobre la hora límite para la liberación se dejo despegar el globo y su *payload* a las 7:14 a.m (figura E.11) del 20/12, siendo que la hora límite determinada por control aéreo había sido las 7:15 a.m..

Unos minutos más tarde el equipo de *fox hunting* salió iniciando el seguimiento de la carga y al mismo tiempo los demás involucrados se dispusieron a observar la decodificación de las tramas recibidas. También fue comunicado por parte de la base en MONTEVIDEO que se estaban recibiendo de forma correcta dichas tramas. Fue cuando transcurridos un poco más de treinta minutos se produjo un problema grave y que aún permanece sin explicación: todos los receptores dejaron instantáneamente de recibir paquetes, sin percibirse además siquiera ningún tipo de ruido en la frecuencia de transmisión que indicara que el experimento se encontrara con problemas, pero al menos funcionando.

Tras un período de tiempo considerable sin cambios en la situación que se estaba viviendo y cuando ya se había resuelto desmontar la base y las antenas, y emprender el retorno a la capital el país, una llamada de JUAN PECHIAR informando que se volvió a recibir paquetes produjo un viraje en los acontecimientos. Se volvieron a armar los equipos para la recepción y se retomó el seguimiento observando atentamente los paquetes recibidos.

Después del fallo y su posterior recuperación todo transcurrió normalmente, y a través del seguimiento que se realizaba de las coordenadas se verificó que a diferencia de los

lanzamientos anteriores en que el rumbo del globo pasada determinada altura se mantuvo prácticamente incambiado hacia el Este-Noreste; en este caso el viento provocaba variaciones importantes en las direcciones que seguía la cápsula, cambiando varias veces de dirección, lo cuál llevó a que el local que se estimaba había caído la cápsula era a tan solo 40 km de donde nos encontrábamos. Habiendo hablado con el grupo que estaba realizando el *fox hunting* y dada la cercanía del lugar se decidió ir tras el *payload* y cooperar en su recuperación.

En ese momento nos empezamos a preparar para la salida de la base, desarmando todos los equipos y cargando todo en los vehículos disponibles. Luego emprendimos camino a la zona de las últimas coordenadas recibidas por parte del móvil que ya se encontraba en camino, la cual había sido a tan solo 600 m de altura y era longitud -56.20500 y latitud -33.12283, punto ubicado geográficamente al Noreste de Durazno cercano a la ruta 100. Para llegar al lugar se debía tomar la ruta 14 en dirección a Villa del Carmen y luego tomar la ruta 100.

A través de un GPS, la utilización de mapas y la ayuda brindada desde Montevideo ubicando la posición a través de Google Earth llegamos a destino cerca del medio día del Sábado, siendo que la hora de aterrizaje de la cápsula se estimaba a las 10:30 a.m.. Estando apostados en la ruta, como se observa en la imagen E.12a, se tomó la decisión de pedir permiso para entrar a una de las fincas rurales cercanas al lugar. Otorgado el permiso un grupo de estudiantes, junto a uno de los tutores y un colaborador se prestó a realizar una especie de rastrillaje por la zona, mientras los demás esperaban alguna noticia.

(a) En la Ruta 100, en el departamento de Durazno, en pleno *fox hunting*.

(b) Lugar en el cual se encontró el globo, en los campos de Carrasco.

Figura E.12.: Búsqueda y recuperación de la carga útil.

Figura E.13.: Posición en la que fueron encontrados la cápsula, el paracaídas y los restos del globo.

Cuando ya había regresado la mayoría de ellos y el tutor lo hacía cercano al casco de la estancia una persona le comentó que un vecino había avisado que habían observado algo extraño y con los buenos augurios marchamos a la casa del vecino cuando fue avistado el paracaídas junto a la cápsula por uno de los estudiantes, «*Allí está*», dijo (figura E.12b). Casi sin poder contenerse y luego de hablar con el dueño del establecimiento se fue al encuentro de la cápsula.

Se constató que la misma estaba en buen estado, pero no transmitía y que el paracaídas había funcionado correctamente (figura E.13). Después de una primera inspección se abrió la cápsula y se encontraba todo en orden. Se midió el voltaje de la batería indicando poco más de 3 V estando completamente agotada. Se tomo la carga, el paracaídas y el resto del globo retornando a la casa del establecimiento, donde se mantuvo una charla con la gente del lugar, registrada por la cámara de José Luis Vila E.14. Nuestros anfitriones fueron muy amables y junto a ellos se observaron algunas de las imágenes captadas por la cámara.

Finalmente vino la despedida y se volvió a la carretera para regresar a Montevideo con la satisfacción, a pesar del cansancio que se había acumulado, de haber cumplido con los objetivos propuestos.

Figura E.14.: Charlando con Iribarren y su familia, dueños del establecimiento vecino al de Carrasco, donde fue encontrada la cápsula. Abajo a la izquierda se puede apreciar la cabeza del Kiwi.

F. ♠ Compendio de Piques ♠.

F.1. Cuidados de las baterias de LiPo.

♠ *Observaciones:*

- Nunca cargarlas con un cargador diseñado para baterías de NiCd ni de NiMH.
- El voltaje nominal de las celdas de litio es de 3.7 V. No se debe permitir que se descarguen a menos de 3.0 V, ni que se carguen por encima de los 4.3 V. En caso de que la batería esté formada por n celdas, se multiplican los valores anteriores por n. Por ejemplo:
  - Para una batería de voltaje nominal igual a 11.1 V, es decir de 3 celdas serie, debe cumplirse: $9{,}0\,\text{V} \leq V_{Batería} \leq 12{,}9\,\text{V}$.
  - Para una batería de voltaje nominal igual a 14.8 V, es decir de 4 celdas serie, debe cumplirse $12\,\text{V} \leq V_{Batería} \leq 17{,}2\,\text{V}$.

De no cumplirse con estos cuidados, la batería puede explotar, perder vida útil o hasta experimentar el fenómeno de *inversión de polaridad* en algunas de sus celdas[a].

[a] Si se deja que la batería se descargue demasiado, el desapareo entre las capacidades (C, $[C]$= mAh) de cada una de las celdas que forman la batería lleva a que primero se descargue la más débil de ellas mientras las que todavía están cargadas hacen que circule corriente con la polaridad inversa por la celda más débil.

F.2. Características y cuidados de la Power Board.

♠ Una de la razones señaladas para la inducción del voltaje en las fuentes no pudo ser evitada: la *inclusión de las bobinas toroidales*, ya que no se contaba con otro tipo de bobinas para sustituirlas. *Es de importancia señalar esto ya que se cree que uno de los principales motivos del mal funcionamiento es justamente la presencia de estos componentes.*

♠ Como principales características que diferenciaban a esta fuente de las realizadas previamente, se puede señalar:

- Las mismas fueron fabricadas por un fabricante de PCBs.
- La ***bobina*** utilizada para su implementación era ***blindada***[a] .
- Contaba con un ***plano de tierra*** que aseguraba una buena referencia de potencial cero, además de utilizar otro modelo de regulador *switcheado*.

[a] O *shielded*.

♠ *El blindaje se encuentra conectado a tierra*. Por lo tanto se debe tener mucho cuidado al manipular los cables para la alimentación de las fuentes y los voltajes de salida de forma de no cortocircuitarlos con el blindaje.

F.3. Bus I²C.

♠ **Sobre la selección para los valores de las resistencias de *pull - up* para las señales `SDA` y `SCL` del protocolo *Two - Wire* [Atmel]:**

Condición	Mín	Máx	Unidad
$f_{SCL} \leq 100\,\text{kHz}$	$\frac{V_{CC}-0{,}4\,\text{V}}{3\,\text{mA}}$	$\frac{1000\,\text{ns}}{C_b}$	Ω
$f_{SCL} > 100\,\text{kHz}$	$\frac{V_{CC}-0{,}4\,\text{V}}{3\,\text{mA}}$	$\frac{300\,\text{ns}}{C_b}$	Ω

C_b = Capacidad de la línea para ese contacto.

♠ La capacidad total (esto es, la sumatoria de las capacidades de cada uno de los dispositivos) que «*se cuelgue*» de cada línea del *bus* deberá ser menor de 400 pF [Atmel].

F.4. Voltaje de referencia ADC.

♠ También es muy importante señalar que si se realiza la opción de utilizar un voltaje externo conectado a `VREF` no podrá ser utilizado en ningún momento y para ninguno de los canales del ADC otro de los voltajes disponibles (`AVCC`, 1,1 V o 2,56 V) ya que **esto provoca un cortocircuito entre el voltaje seleccionado y `VREF`**. Esto se puede observar en la figura 5.8.

F.5. Placas de acondicionamiento de la señal de la termocupla.

♠ **Observaciones:**

- Al pasar a estar el circuito de compensación de punta fría de la termocupla a un placa aparte de la MAIN BOARD se produce el problema de interconexión de las mismas. Desde la MAIN BOARD se provee al circuito los voltajes de alimentación V_S, 0 V y $-Vs$, y desde la placa que realiza la compensación se provee la señal de salida correspondiente a la medición de la temperatura externa. Por lo tanto se debe tener sumo cuidado al momento de interconectar ambas placas, verificando que las señales sean las correctas porque de otra forma se podría dañar de forma permanente el circuito.
- Otro aspecto importante es que al ser fabricadas de forma manual y al contar con un plano de tierra de superficie importante, que no tiene ninguna protección aislante, se debe tener cuidado con el contacto con conductores a otros potenciales para evitar cortocircuitos.
- Una vez que fueron calibradas las placas como se expondrá en el capítulo 7, no se deben cambiar componentes o modificar la configuración del *offset* o el proceso descripto en dicho capítulo perderá su validez.
- *La posición de los terminales de la termocupla no es invertible*, siendo que el cable negro (metal hierro, Fe) debe ir conectado a tierra, potencial cero, mientras el terminal blanco (metal constantan, Cu55Ni45) irá conectado al terminal positivo de la entrada del `AD594`.

F.6. Recomendacion Comunicación PC con PLACA MAIN.

♠ Para realizar el diálogo PC - placa MAIN se sugiere utilizar la UART0, ya que la misma está conectada a un `MAX232`, lo que nos brinda tranquilidad de que no habrá problemas con los niveles de voltaje entre a placa MAIN y la PC que se conecte para leer los datos.

La UART0 se podría cambiar por ejemplo por la UART2 o la UART3, que están previstas para dialogar con el GPS o el PIC de la placa TELEMET respectivamente, y que por lo tanto no tienen uso al momento de realizar la calibración de los sensores; pero en caso de optar por esta opción debe tomarse la precaución de no enviar datos desde la PC hacia esas UARTs, ya que no está previsto su funcionamiento para niveles TTL[a], y de este modo se pueden interpretar de manera incorrecta los niveles lógicos o peor aún, dañar la respectiva UART del microcontrolador.

[a] Para la siguiente versión de la placa MAIN, como se indica en la sección 5.7, se podrá acceder a la UART1 (la cual no estaba en uso en la primera versión), de propósito general, a través de un `MAX232`.

F.7. Precauciones en la determinación del origen de reinicio del microcontrolador.

♠ La detección del origen del reinicio del sistema se hace a través de un registro en el que se codifican las diferentes causas, tales como *Power-up*, *Watchdog*, programador, etc. La verificación de los *bits* del registro debe realizarse inmediatamente después del arranque del sistema pues la información almacenada podría ser no confiable en otro caso.

F.8. Consejos para las liberaciones.

♠ A la hora de los preparativos de la liberación se aconseja contar con repuestos de:

- Componentes de la Main Board.
- Placa de modulación.
- Placa de fuentes.
- GPS, especialmente conectores blindados para conectar antenas, así como repuestos de las propias antenas.
- Cable incandescente (del quema tanza).
- Termocupla.
- Batería de Li-Po de *backup*. Como se menciona en la sección 3.8, las baterías de Li-Po son muy delicadas y un manejo descuidado puede llevar a la pérdida de las mismas dada la inutilización de una o más de sus celdas.

G. † Homenaje a los caídos †.

En esta sección queremos detenernos en un breve pero sentido recuerdo a todos aquellos que han contribuido con sus vidas al desarrollo de este proyecto. Para todos ellos nuestro recuerdo:

† Módulo GPS - `Trimble Lassen IQ`.

† Placas de Fuentes.

† Transmisor.

† Relé.

† `AD594`.

† Baterías de Li - Po varias.

† Cápsulas 1 y 2.

† Globos 1, 2 y 3.

† Led ámbar de la placa Main.

† Nosotros.

H. Esquemáticos.

H.1. Power Board.

H.2. Main Board v 1.0.

H.3. Anti Latchup Board.

H.4. Thermocouple Board v 1.0.

H.5. Thermocouple Board v 2.0.

Bibliografía

[AD99] «Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation. AD594/AD595», Revisión C, © Analog Devices, Inc., 1999.

[AD623] «Single Supply, Rail-to-Rail, Low Cost Instrumentation Amplifier. AD623», Revisión C, © Analog Devices, Inc., 1999.

[AlN] Sitio *web* de la red Alfa Nicron: http://tima.imag.fr/qlf/alfa-nicron/index.htm.

[Alo07] Antonio Alonso, «El Vuelo Eléctrico», Febrero 2007. URL: http://www.icmm.csic.es/jaalonso/velec/baterias/bateria.htm.

[APC05] «Atmospheric Properties Calculator», basado en US Standard Atmosphere 1976, Version 2.1.4, Agosto 2005. URL: http://www.aerospaceweb.org/design/scripts/atmosphere/.

[Atmel] «ATMEL® 8-bit AVR® Microcontroller with 64K/128K/256K Bytes In-System Programmable Flash. ATmega640/V ATmega1280/V ATmega1281/V ATmega2560/V ATmega2561/V Preliminary», Hoja de datos del microcontrolador ATmega2560, revisión 2549L-08/07.

[AUV+98] V. Asenek, C. Underwood, R. Velazco, S. Rezgd, M. Oldeld, P. Cheynet, and R. Ecoet, «SEU induced errors observed in microprocessor systems», *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, vol. 45, pp. 2876-2883, Diciembre 1998.

[AVR06] «AVR042: AVR Hardware Design Considerations», Application note de Atmel®, Revisión 2521E-AVR-06/06.

[BB95] «INA128 / INA129. Precision, Low Power INSTRUMENTATION AMPLIFIERS», ©1995 Burr-Brown Corporation.

[BOM1] Selección de materiales primaria: http://iie.fing.edu.uy/twiki/bin/view.cgi/Satelite/HWGloboSatsSeleccionComponentes.

[De98] H. M. Deitel - P. J. Deitel, «Como Programar en C/C++», Prentice Hall, 2da Edición, Febrero 1998. ISBN: 9688804711.

[ERC08] Estrada. M. A., Rodríguez. S. A., Caballero E., Sarmiento. R., Racedo. N. F, «Desarrollo de un Sistema de Monitoreo en Tiempo Real para la Humedad Relativa» , *REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA*, vol.40, No. 2, pp. 382-384, Junio 2008.

[Fu07] B. J. Furman, «ADC with the Atmega128», 10 de Abril de 2007.

[Go06] T. Gobert, «LA ACES program flight readiness review document for the M.R.E. (MCNEESE RADIATION EXPERIMENT)», Mayo 2006.

[GSMB] «*Globosats Main Board*», Sebastián Fernández. http://iie.fing.edu.uy/twiki/bin/view.cgi/Satelite/GloboSatsMainBoard.

[Hon] «Microstructure Pressure Sensors. Signal Conditioned. 0 psi to 1 psi up to 0 psi to 150 psi», 009021-4-EN IL50 GLO, Hoja de datos de Honeywell.

[Hon08] «HIH-4030/31 Series Humidity Sensors», 008104-1-EN IL50 GLO 1203, Hoja de datos de Honeywell, Marzo de 2008.

[HRBM05] J. Hignight, J. Rollins, T. Butler, and S. Mullins, «ACES program preliminary design review document for the HUSP», Mayo 2005.

[HSS92] R. Harboe-Sorensen and A. Sund, «Radiation pre-screening of R3000/R3000a microprocessors», in *Radiation Effects Data Workshop, 1992. Workshop Record., 1992 IEEE*, 1992, pp. 3441.

[HTG89] K. J. Hass, R. K. Treece, and A. E. Giddings, «A radiation- hardened 16/32-bit microprocessor», *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, vol. 36, pp. 2252-2257, Diciembre 1989.

[I2C] «UM10204 I2C-bus specification and user manual», Rev. 03 — 19 de Junio de 2007. http://www.nxp.com.

[Kal02] David Kalinsky y Roee Kalinsky, «Introduction to Serial Peripheral Interface», 2002. http://embedded.com/columns/beginerscorner/9900483?_requestid=268365.

[KHP04] T. Karnik, P. Hazucha, and J. Patel, «Characterization of soft errors caused by single event upsets in CMOS processes», *IEEE TRANSACTIONS ON DEPENDABLE AND SECURE COMPUTING*, vol. 1, pp. 128-143, Abril - Junio 2004.

[KSC91] J. L. Kaschmitter, D. L. Shaeer, and N. J. Colella, «Operation of commercial R3000 processors in the Low Earth Orbit (LEO) space environment», *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, vol. 38, pp. 1415-1420, Diciembre 1991.

[Lai] Sitio *web* del Proyecto Laí: http://iie.fing.edu.uy/twiki/bin/view.cgi/Satelite/WebHome.

[LaIQ] «Lassen™ iQ GPS Receiver System Designer Reference Manual», Revision A, Febrero 2005.

[LaS] Sitio *web* de LA SPACE: http://laspace.lsu.edu/aces/.

[Mar98] Joe Marcin, «Thermocouple Signal Conditioning Using the AD594/AD595», AN-369 APPLICATION NOTE de Analog Devices, E1796a-0-7/98.

[Micr05] «512K I²C™ CMOS Serial EEPROM», Hoja de datos de MICROCHIP®, 2005.

[Micr07] «dsPIC30F3010/3011 Data Sheet», Hoja de datos de MICROCHIP®, 2007.

[MK95] M. Maher and R. Koga, «Single Event Upset and Latchup considerations for CMOS devices operated at 3.3 V», National Semiconductor Application Note 989, Abril 1995.

[NASA] Glenn Research Center, «AtmosModeler Simulator»: http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/atmosold.html.

[NB93] E. Normand and T. J. Baker, «Altitude and latitude variations in avionics SEU and atmospheric neutron flux», *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, vol. 40, pp. 1484-1490, 1993.

[Nor96] E. Normand, «Single Event Effects in avionics», *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, vol. 43, pp. 461-474, Abril 1996.

[OmTI] OMRON ELECTRONIC COMPONENTS LLC, «Relays Technical Information».

[Om90] OMRON ELECTRONIC COMPONENTS LLC, «Relay User's Guide», 1990.

[Ox05] «Pocket Oxford Spanish Dictionary © 2005 Oxford University Press».

[Pou05] A. L. R. Pouponnot, «Strategic use of SEE mitigation techniques for the development of the ESA microprocessors: Past, present and future», en *Proceedings of the 11th International On-Line Testing Symposium*, 2005.

[Pre] «Air Pressure and Altitude above Sea Level Elevation above sea level - in feet and meter - with barometric and atmospheric pressure - inches mercury, psia, kg/cm² and kPa». URL: http://www.engineeringtoolbox.com/air-altitude-pressure-d_462.html.

[PRS08] E. Pastorino, N. Reyes e I. Scapinello, «Telemetría para globosats», Noviembre 2008.

[Ra01] Real Academia Española ©, «DICCIONARIO DE LA LENGUA ESPAÑOLA - Vigésima segunda edición», 2001.

[Sch00] Martin Schwerdtfeger, «SPI - Serial Peripheral Interface», Junio de 2000. http://www.mct.net/faq/spi.html.

[SKW+92] D. L. Shaeer, J. R. Kimbrough, J. W. Wilburn, S. M. Denton, J. L. Kaschmitter, N. J. Colella, P. G. Coakley, and C. Casteneda, «Proton induced SEU, dose effects, and LEO performance predictions for R3000 microprocessors», *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, vol. 39, pp. 2309-2315, Diciembre 1992.

[TeBG] Sitio *web* del proyecto TENNESSEE BALLOON GROUP: http://www.groovin.net/ke4pjw/balloon/.

[TI05] «Digital Temperature Sensor with I²C™ Interface», Hoja de datos de TEXAS INSTRUMENTS®, SBOS231F, Enero 2002, revisión de Diciembre de 2005.

[Ur06] L. Urbanski, «Cygnus High Altitude Balloon», 2006. URL: http://moo.pl/~tygrys/balloon/.

[VKC92] R. Velazco, S. Karoui, and T. Chapuis, «SEU testing of 32-bit microprocessors (for space application)», in *Radiation Effects Data Workshop, 1992. Workshop Record.*, 1992 IEEE, New Orleans, LA, USA, 1992, pp. 1620.

[Wiki] en.wikipedia.org.

[Wiki2] es.wikipedia.org.

[Zie] J. F. Ziegler, «Trends in electronic reliability - effects of terrestrial cosmic rays». URL: http://www.srim.org/SER/SERTrends.htm.

[1374] «LT1374 4.5A, 500kHz Step-Down Switching Regulator», *Datasheet* de Linear Technology.

[1767] «LT1767/LT1767-1.8/ LT1767-2.5/LT1767-3.3/LT1767-5 Monolithic 1.5A, 1.25MHz Step-Down Switching Regulators», *Datasheet* de Linear Technology.

Plataforma Hardware Para Globos Estratosféricos.

G. Caudullo, M. Fajardo y M. Lens

Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, UdelaR.

***Resumen*—El presente artículo describe el proceso de desarrollo de una plataforma estratosférica capaz de monitorear y transmitir datos recopilados sobre efectos de radiaciones presentes en la atmósfera a grandes alturas sobre un banco de memorias SRAM, y datos de las condiciones atmosféricas a esas alturas. Luego de una breve introducción explicativa de los fenómenos y condiciones a tener en cuenta a grandes alturas, se prosigue con descripciones del hardware y software desarrollados, el proceso de calibración de sensores y las liberaciones propiamente dichas. Para finalizar, se listan los resultados de cada una de las liberaciones y se concluye acerca de los mismas.**

***Index Terms*—Globosats, DUT, latchup.**

I. Introducción.

El desarrollo de una plataforma estratosférica fue llevado a cabo por dos grupos de estudiantes de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República - grupos HWGlobosats[1] y TeleGlobosats[2] - como parte de sus respectivos proyectos de grado. El proyecto estaba enmarcado dentro del proyecto Laí y la Red Alfa Nicron. El primero tiene el objetivo de construir, lanzar y operar un satélite experimental [Lai], mientras que la mencionada red busca el fortalecimiento de la investigación y colaboración entre universidades de Latinoamérica y Europa [AlN].

La importancia fundamental del desarrollo de la plataforma era la incorporación de conocimientos que serán ciertamente necesarios y servirán como base para alcanzar el objetivo final del Proyecto Laí, proporcionando a su vez a los estudiantes involucrados una posibilidad de acercamiento al ejercicio de su futura profesión.

El objetivo de la plataforma era poder acelerar los procedimientos de experimentación del efecto de la radiación natural sobre circuitos electrónicos, específicamente sobre un banco de memorias RAM estáticas. Asimismo, se deseaba adquirir conocimientos valiosos para la implementación de sistemas de comunicación y adquisición de datos que pudieran ser utilizados en la futura implementación del satélite experimental.

I-A. Efectos de la radiación sobre circuitos electrónicos.

Desde hace poco más de dos décadas, dados los cambios en la tecnología de circuitos integrados, el estudio de la sensibilidad de componentes electrónicos ante radiaciones ha venido aumentando en importancia [Zie]. Los componentes que se muestran como los más afectados son, debido a su área y su mayor número de bits, las RAMs tanto estáticas como dinámicas [Nor96].

Parte de la radiación es fruto de los rayos cósmicos y partículas cargadas que llegan a las capas de la alta atmósfera de la Tierra, y en este caso pueden ser sutiles y difíciles de tratar. En este caso, la atmósfera actúa absorbiendo gran cantidad de las partículas antes de que éstas lleguen al nivel del mar. Siendo la mayor parte de las partículas problemáticas presentes a grandes alturas neutrones de alta energía [Nor96].

I-A1. Tipos de Fallas: Ya sea que el impacto sea directamente de una partícula cargada parte de la radiación, o de un impacto secundario como consecuencia del choque con un neutrón, el resultado son corrientes que alteran la carga en nodos - y por lo tanto afectan el valor almacenado - del circuito afectado [MK95].

Entre los efectos del impacto de la radiación en la electrónica se pueden mencionar los denominados *Total Ionizing Dose* (TID), y los *Single Event Effects* (SEE). Éstos últimos a su vez se pueden separar principalmente en:

- *Single Event Latchup* (SEL).
- *Single Event Upset* (SEU).
- *Single Event Transient* (SET).

El primero de ellos es el más destructivo y se produce por la activación de transistores bipolares parásitos presentes en los transistores CMOS, pudiendo llevar inclusive a la destrucción del circuito. En el caso del SEU, se trata del cambio en el valor almacenado por ejemplo en un *flip - flop*, mientras que en el caso del SET, consiste en pulsos transitorios de varios cientos de picosegundos que introducidos a la salida de una compuerta lógica [Pou05].

I-B. Descripción del experimento.

En las liberaciones efectuadas en el transcurso del proyecto se pueden distinguir claramente tres componentes esenciales que conforman la plataforma, siendo los mismos:

1. El **hardware** que conforma la carga útil.
2. El **software** que correrá en dicho hardware.
3. Los **artefactos físicos**, tales como, el globo sonda, la cápsula y el paracaídas.

Los dos primeros ítems declarados están claramente ligados, ya que cada uno de ellos por separado no es capaz de cumplir ninguna función. El tercero es el que constituye la protección

[1]Integrado por los autores del presente artículo.
[2]Integrado por E. Pastorino, N. Reyes e I. Scapinello.

y el medio de transporte para la carga útil conformada por los dos primeros para poder exponer el experimento a las condiciones deseadas para su desarrollo.

I-B1. Condiciones en la alta atmósfera: Las condiciones y el entorno a los que se desea exponer el experimento es a mayores flujos de partículas radiactivas, con respecto a los flujos presentes a nivel del mar. Para esto el experimento debe alcanzar alturas superiores a los $20 \sim 25$ km, en las cuales el flujo de neutrones se vuelve significativamente mayor que a nivel del mar, debido a que la atenuación provocada por la atmósfera sobre la radiación se ve disminuída [NB93], [Nor96]. Como consecuencia, un globo estratosférico se presenta como una opción válida para cumplir con este cometido, más aún teniendo en cuenta el beneficio que representa su bajo costo y facilidad de ejecución.

Para alcanzar las alturas que se pretenden lograr[3], la plataforma deberá resistir y operar correctamente en temperaturas que pueden llegar a ser tan bajas como $-56{,}46$ ºC entre 11000 m y 25000 m, y presiones cercanas al vacío[4] [ASim], [EAM].

II. HARDWARE.

El hardware desarrollado por el grupo HWGlobosats puede separarse en 3 módulos:

- Power Board.
- Main Board.
- Anti - Latchup Board.

A estos módulos se agrega una placa de Telemetría diseñada por el grupo TELEGLOBOSATS, la placa del DUT[5] y el transmisor empleado, el cual en este caso era un handy comercial.

El conexionado entre las distintas placas puede verse en la figura 1. Por razones de claridad se ha omitido en la figura la alimentación del microcontrolador.

A continuación se describe el hardware diseñado y fabricado por el grupo HWGlobosats.

II-A. Power Board.

La Power Board, o Placa de Fuentes recibe como entrada el voltaje de la batería y lo regula a todos los voltajes necesarios por los demás dispositivos presentes en la carga útil. En el caso de las liberaciones realizadas hasta la fecha, los voltajes necesarios son los que se listan en el cuadro I.

Al ser el sistema alimentado a partir de una batería se debía lograr la mayor eficiencia en el consumo de la energía que esta nos puede brindar.

[3]Rondando los treinta kilómetros.
[4]Del entorno del kPa.
[5]*Device Under Test*, o *Dispositivo Bajo Prueba* por su sigla en inglés.

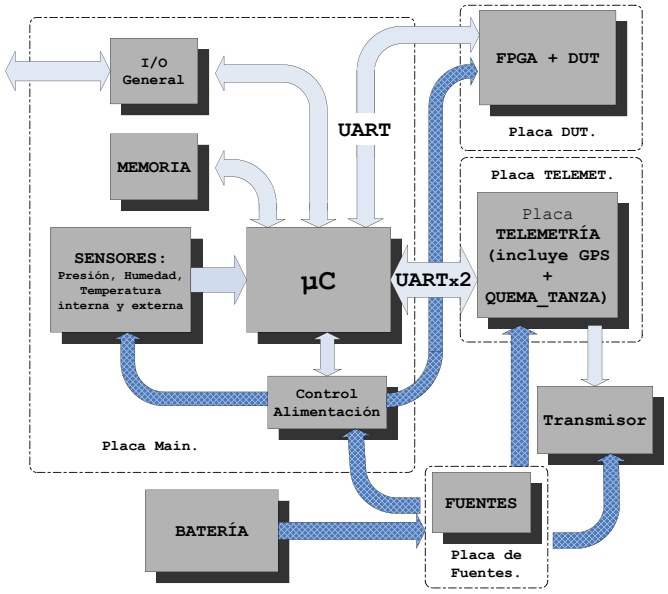


Figura 1. Conexionado de las distintas placas dentro de la carga útil. Las flechas oscuras indican alimentación, mientras que las de color claro denotan señales de comunicación.

Voltaje (V)	Dispositivos
3,3	Módulo GPS
5,0	Microcontrolador, Sensores, Memorias I²C, Sensores, etc.
8,0	Transmisor

Cuadro I
VOLTAJES EMPLEADOS POR LOS DISTINTOS DISPOSITIVOS PRESENTES EN LAS PAYLOADS.

Se analizaron dos posibilidades para la implementación de las fuentes:

Lineales. Poseen una extrema simplicidad[6], permitiendo ahorro de componentes y área de layout[7]. Por otro lado la peor característica que exhiben este tipo de reguladores es su eficiencia, la cual depende directamente de la diferencia de voltajes entre la entrada y la salida. Básicamente la potencia consumida por estos reguladores está dada por $(\mathrm{V}_{entrada} - \mathrm{V}_{salida})\,\mathrm{I}_{salida}$[8]. Por ejemplo, si el voltaje de entrada fuera 10 V y la salida de 5 V, la potencia disipada por el regulador sería equivalente a la entregada al circuito que se está alimentando. Claramente esta característica no era deseable en el sistema a diseñar.

Switcheados. Presentan una mayor eficiencia en la conversión de voltaje. Aceptan un rango amplio de voltajes de entrada, siendo en algunos casos incluso voltajes menores al voltaje de salida deseado. Poseen una baja resistencia de salida y mantienen su voltaje de salida aún frente a grandes demandas

[6]Disponibles en encapsulados de tres contactos.
[7]Ahorro de peso y espacio.
[8]Toma de la fuente una cantidad igual de corriente a la que requiere la carga.

de corriente. Como contrapartida, cabe consignar que, además del circuito integrado propiamente dicho, requieren de algunos componentes auxiliares para su implementación tales como bobinas, capacitores, diodos y resistencias. Asimismo, los encapsulados del integrado suelen ser de más de tres contactos.

Centrándonos en aspectos de consumo, los reguladores de voltaje seleccionados son del tipo switcheado, utilizándose para su implementación bobinas blindadas[9].

II-B. Main Board.

En la implementación de este diseño se buscaba lograr una plataforma para globosats capaz de monitorear los experimentos que se lleven acabo. El diseño debe ser capaz de monitorear las condiciones ambientales en que los mismos transcurren y a partir de los datos generar una trama a ser transmitida.

II-B1. Características - Requerimientos: Dentro de las características deseadas se buscaba realizar un diseño que fuera robusto y de dimensiones lo más pequeñas posibles dadas las condiciones austeras a las que iba a ser sometido durante la realización de las liberaciones y el espacio reducido con el que se contaba adentro de la cápsula.

Las funcionalidades que debía cumplir esta placa eran:

- Aquisición de datos de condiciones ambientales.
- Monitoreo del experimento que se llevara a cabo en el DUT.
- Armado de las tramas a ser transmitidas y envío de las mismas a la placa de telemetría.
- Recepción de los datos de GPS y ejecución del plan de vuelo según los datos recabados.

Para cumplir con estas funcionalidades, en el diseño de la placa serían incluídos:

- Sensores de temperatura, humedad y presión.
- El microcontrolador.
- Un banco de memorias utilizado como *caja negra*[10].
- Relés para la activación y desactivación de algunos de los circuitos y componentes incluídos en la carga.

La ***adquisición de datos***, se refiere a la obtención de muestras de los datos proporcionados por los sensores, cuya frecuencia sería determinada luego en la implementación del la rutina principal a ser cargada en el micro.

En el caso de los sensores analógicos se debe leer el valor del voltaje a la entrada del ADC y luego realizar la conversión del mismo a las unidades correspondientes a la lectura realizada. En el caso de sensores digitales, sus valores se leen directamente una vez direccionados dentro del conjunto de esclavos del bus I²C implementado, pudiéndose realizar una eventual corrección por software en caso de ser necesario.

El ***monitoreo del experimento*** que se lleva acabo se realizaría mediante una interfaz serie RS232 a través de un protocolo establecido que puede variar según cuál sea el DUT. Por lo tanto, la plataforma puede adaptarse fácilmente a diferentes tipos de experimentos, siempre y cuando el dispositivo a ser testeado cuente con una interfaz del tipo mencionado.

La ***recepción de los datos del GPS*** es un punto clave y muy importante, ya que estos datos - que serán transmitidos a la base terrestre - son necesarios para el seguimiento de la carga útil así como para su posterior ubicación. La interfaz de este tipo de dispositivos también es serial RS232. Los datos obtenidos del GPS además de ser transmitidos a tierra son muy importantes para la ejecución del plan de vuelo, el cual debe entre otras cosas monitorear y administrar la carga de la batería desactivando circuitos mediantes los relés, y liberar la carga en caso de que la misma se salga de un perímetro preestablecido activando el circuito encargado para desacoplar la carga útil del paracaídas. También puede interesar ejecutar el experimento sobre el DUT desde el momento de la liberación hasta una vez alcanzada la altura máxima y luego desconectar el DUT, o medir las variables ambientales desde la liberación hasta la caída de la carga útil, luego de lo cual se apagan los sensores; por lo que resultaría imprescindible conocer en qué posición se encuentra la carga útil en cada momento.

II-B2. Principales componentes de la Main Board: Además del microcontrolador[11] que será el corazón del diseño, en esta placa se conectarán los distintos sensores encargados de muestrear las condiciones del entorno, los relés para la conexión / desconexión de otros circuitos y el banco de memorias que cumple la función de caja negra.

Los ***sensores*** incorporados al sistema son:

- **Sensor de temperatura externa.** Con el propósito de medir esta variable se utilizó una termocupla tipo J, debido al rango de temperaturas que se debía abarcar ($-70\,$ºC a $35\,$ºC)[12]. Como consecuencia de las características de la señal proporcionada por la termocupla se implementó un circuito para su acondicionamiento, utilizando un compensador de punta fría, el que además linealizaba y amplificaba la señal.
- **Sensor de temperatura interna.** Fue elegido en este caso un integrado con una interfaz digital, el que proporcionaba directamente el valor de la temperatura medida[13] con una resolución de hasta 12 bits. El rango abarcado era de -25ºC a 85ºC. El integrado es el TMP100 del fabricante Texas Instruments.

[9]Durante el desarrollo de diferentes versiones de la Power Board, se encontró que el único tipo de bobina que permitía un correcto desempeño de las fuentes reguladas eran las del tipo *blindado*. El uso de bobinas toroidales en entornos de radiofrecuencia inducía voltajes que elevaban las salidas y dañaban dispositivos alimentados por las fuentes.

[10]Guardado de todas las tramas transmitidas para su posterior recuperación, independientemente de su correcta recepción en tierra.

[11]El microcontrolador seleccionado es un ATMega2560, de Atmel.

[12]Recordemos que la temperatura mínima prevista por los modelos era de $-56{,}46\,$ºC [ASim], [EAM], a pesar de lo cual, como previsión en el diseño se supuso una temperatura mínima de $-70\,$ºC. La cota superior de la temperatura está dada por una temperatura máxima razonable para un día de verano por ejemplo.

[13]El sensor elegido mide la temperatura a través de su contacto GND.

- **Sensor de presión.** El sensor de presión es del tipo absoluto y posee una salida analógica, la cual fue conectada directamente al ADC del microcontrolador. El modelo es el ASCX15AN de Honeywell.
- **Sensor de humedad.** Se requería que el sensor abarcara el rango completo de humedad relativa, o sea 0 a 100 % de HR. El sensor elegido fue el HIH-4031-001 de Honeywell.

Se dispusieron tres ***relés*** de forma de manejar independientemente la alimentación de los sensores, el banco de memorias y el DUT. El tipo de relés elegidos con este propósito fue el *double - winding latching*, los cuales dadas sus características permitían el cambio de su estado utilizando dos pines del microcontrolador, generando pulsos, sin la necesidad de mantener energizadas permanentemente sus bobinas. El modelo elegido fue `G6HK-2100 5 DC` de OMRON.

Las ***memorias*** escogidas para el banco de memorias fueron EEPROMs con interfaz del tipo I²C, dada la facilidad que presentaba su conexión y la característica de conservar los datos a pesar de estar desenergizadas, a diferencia de las memorias RAM. La cantidad de chips y por consiguiente la cantidad de espacio disponible para el almacenamiento de datos fue determinada por el espacio disponible en la placa, ya que durante la etapa de diseño de la placa no se había determinado la cantidad de información a almacenar. Finalmente se incluyeron 4 chips del modelo `24FC512` de MICROCHIP con 64 kB cada uno, *representando un total de 256 kB*.

II-C. Anti - Latchup Board.

La Anti - Latchup Board se encarga de mitigar los efectos de las fallas de latchup.

El funcionamiento del mismo es bastante sencillo y se basa en la medición de la corriente consumida por el circuito que se desea proteger.

La medida de la corriente se realiza debido a que justamente lo que provoca una falla del tipo latchup, desencadenada por una partícula radioactiva, ***es la conformación de un camino de baja impedancia entre fuente y tierra, o sea un cortocircuito***, incrementando drásticamente la corriente consumida por el integrado afectado. Si este efecto se prolonga por suficiente tiempo puede provocar daños irreversibles al chip.

En el circuito de latchup implementado se hace circular toda la corriente provista por la batería por un resistor muy bajo del tipo shunt de cuatro terminales. La caída de voltaje en este resistor es amplificada y comparada frente a un voltaje fijo, provisto por un DAC[14]. El voltaje fijo es determinado de forma que sea igual a la máxima caída deseada en la resistencia shunt, proporcional a su vez a la máxima corriente que sería permitida en operación normal del circuito monitoreado.

La comparación entre los voltajes en el shunt y el voltaje de salida del DAC comandará[15] entonces un transistor MOSFET de potencia, el que funcionará como llave, cortando la corriente suministrada por la batería en el caso en que la caída de voltaje en el shunt sea mayor a la deseada.

Este circuito contará con su propia fuente de voltaje regulado, que en este caso será lineal ya que el consumo del circuito y la complejidad de una fuente switcheada no ameritan la implementación de una fuente de este último tipo.

El voltaje fijo con el cual se comparará el voltaje proporcional a la corriente consumida de la batería será comunicado al DAC a través de su interfaz SPI. El valor que se fije será determinado luego de las pruebas que se realizarán de la medición de consumo de los circuitos que integrarán toda la carga útil del globo.

Se previó la posibilidad de anular la actuación del circuito anti latchup sobre el transistor que funciona como llave, de forma que no se pueda cortar la corriente a los circuitos alimentados desde la batería a través del mismo. Sin embargo aún es posible la utilización de la caída de voltaje en el shunt para realizar una estimación de la cantidad de carga consumida de la batería, utilizando el conversor A/D del microcontrolador e implementando un integrador por software.

III. SOFTWARE.

El *software* involucrado en el proyecto se puede dividir en tres grandes grupos:

1. Uno encargado de recibir la trama a transmitir y realizar la modulación en audio, alojado en el PIC de la placa de TELEMETRÍA.
2. La rutina principal que corre en el `ATmega2560` encargada de ejecutar el plan de vuelo y realizar el armado de los paquetes de datos enviados a la placa de TELEMETRÍA.
3. El resto de las funciones con distintos objetivos particulares, pero con el propósito de hacer transparente el manejo del *hardware* a la rutina principal del `ATmega2560`.

El software que corre en el PIC fue implementado por el grupo TELEGLOBOSATS, así como la mayor parte de la rutina principal del micro de la placa *Main*. Con este grupo se debió acordar la interfaz de las diferentes funciones que serían desarrolladas por el grupo HWGLOBOSATS a través de una API.

El propósito de estas funciones era realizar el manejo de todos los periféricos del micro, actuando como *drivers*, entre ellos: los sensores, el DUT, la placa de TELEMETRÍA y el GPS y también algunas de las herramientas del micro tales como contadores, el conversor analógico-digital, interfaces serie, etc. Otras de las funciones que se implementaron abarcan todo lo relativo a la implementación del plan de vuelo y administración del consumo, como por ejemplo el manejo de los relés para la alimentación o desconexión de sensores, DUT y memorias; o la implementación física del desacoplado entre la carga útil y el globo.

[14] *Digital to Analog Converter*.

[15] A través de un operacional funcionando justamente como comparador.

Cabe destacar que para cada una de las funciones o grupos de funciones relacionadas fueron desarrollados proyectos dentro de los cuales las mismas eran testeadas, así como también era testeado el hardware que las rutinas involucraban.

IV. Calibraciones.

La calibración de los sensores se llevó a cabo en los laboratorios del área de Metrología Científica del Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU). El esquema del conexionado de las placas y los distintos elementos para realizar las calibraciones se ilustra en la figura 2. La Main Board es alimentada por la Power Board. Dependiendo de si se deseaba calibrar presión o temperatura, se conectaba la bomba de vacío del laboratorio al sistema de medida de presión, o se introducía la termocupla en un baño de alcohol. Como se verá luego, la termocupla está conectada a su respectiva placa de acondicionamiento de señal, y la salida de esta placa a su vez está conectada a la Main Board. Luego del procesamiento por software, se transmitían los resultados a través de una UART del microcontrolador hacia una PC, la cual ejecutaba un software capaz de dialogar por puertos serie[16].

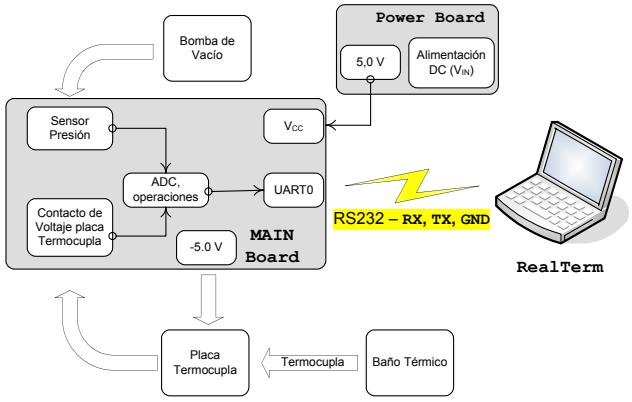


Figura 2. Esquema del conexionado necesario para realizar las calibraciones. Por razones de claridad se omitieron las señales de GND y 5.0 V para la placa de la termocupla, así como la señal GND para la Main Board.

IV-A. *Calibración de sensores de Presión.*

Los sistemas de medida de presión fueron calibrados contra un patrón del LATU: un calibrador de presión marca DH - Budenberg de la línea *24610*, trazable a patrones primarios. Dicho calibrador es del tipo de presión diferencial, por lo que para calcular la presión absoluta se debió estrangular una de las dos mangas, conservando la presión atmosférica. La otra manga se introdujo en una bomba de vacío junto a otra manga conectada al sensor de presión de nuestro sistema de medida.

De este modo, el sistema de medida de presión montado en la placa Main mide directamente la presión absoluta en la bomba de vacío, y el calibrador mide la diferencia entre la presión atmosférica y la presión en la bomba de vacío. Conociendo la presión atmosférica se puede hallar la presión absoluta en la bomba de vacío según el patrón.

[16]El software utilizado con motivo de las calibraciones se denominaba RealTerm.

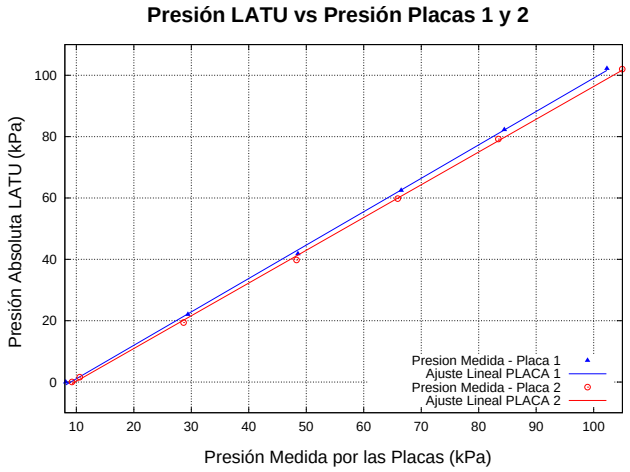


Figura 3. Gráfico de los datos del relevo para los sistemas de medida de presión, junto a las funciones de primer orden que mejor ajustan las curvas de presión para cada placa.

En cada uno de los procesos fueron tomadas seis muestras desde vacío hasta una atmósfera a partir de las cuales fue realizado el ajuste de las curvas para cada uno de los sensores de cada placa[17]. Los valores de presión relevados se muestran en la figura 3. Las curvas resultantes que fueron utilizadas para determinar la presión medida en las liberaciones son las correspondientes a las ecuaciones 1 y 2:

$$P^{Abs}_{LATU}\,(kPa) = 1{,}089 \times P_{Placa\,1}\,(kPa) - 9{,}801\,kPa \quad (1)$$

$$P^{Abs}_{LATU}\,(kPa) = 1{,}068 \times P_{Placa\,2}\,(kPa) - 10{,}443\,kPa \quad (2)$$

IV-B. *Calibración del sistema de medida de temperatura externa.*

El equipo empleado para la calibración del sistema de medida de temperatura consistió en:

- Termómetro de resistencia de platino, resistencia de valor nominal $100\,\Omega$ `PT100` modelo *9351416*.
- Puente de Wheatstone `ASLF700`.
- *Software* desarrollado por el Departamento de Metrología del Laboratorio Tecnológico del Uruguay.

[17]Se dispone de dos Main Boards fabricadas actualmente, con sus respectivos sistemas de medida de presión.

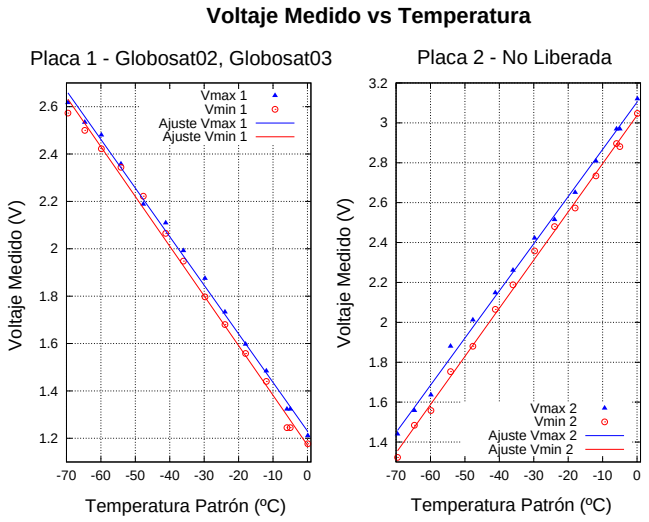


Figura 4. Gráficos de los voltajes relevados en función de la temperatura, junto a las funciones de primer orden que mejor ajustan las curvas de voltajes mínimos y máximos para los conjuntos *Placa Main 1 + Placa de Termocupla 1* y *Placa Main 2 + Placa de Termocupla 2* .

El rango de temperaturas en que se pretendía realizar la calibración del sistema de medida de temperatura externa abarcaba desde $35\,°C$ a $-70\,°C$. Para lograr estas temperaturas se empleó un baño de alcohol. Dentro del mismo se introducirían la sonda del patrón del LATU y dos termocuplas:

- Una de ellas iría conectada a la primera versión de la placa de acondicionamiento de señal de la termocupla, y la salida de esta placa a su vez conectada a la MAIN BOARD 1.
- La otra termocupla se conectaría a la segunda versión ensayada de la placa de acondicionamiento de señal de la termocupla, y la salida de esta placa conectada a la MAIN BOARD 2.

Finalmente las muestras fueron tomadas dentro del rango $0\,$ºC a $-70\,$ºC, con lo cuál los valores para temperaturas mayores a cero serían extrapolados a partir de las curvas halladas. Los intervalos tomados entre cada muestra eran aproximadamente de $5\,$ºC a $6\,$ºC. Los valores de presión relevados se muestran en la figura 4. Las curvas determinadas para el sistema de medida de la temperatura externa se presentan en las ecuaciones 3 y 4:

$$T^{(1)} = (-48{,}193\,{}^{\circ}\mathrm{C}/\mathrm{V})\,\mathrm{V}^{Promedio}_{Termocupla\,1} + (57{,}872\,{}^{\circ}\mathrm{C}) \qquad (3)$$

$$T^{(2)} = (41{,}754\,{}^{\circ}\mathrm{C}/\mathrm{V})\,\mathrm{V}^{Promedio}_{Termocupla\,2} + (-128{,}207\,{}^{\circ}\mathrm{C}) \qquad (4)$$

V. LIBERACIONES.

Las liberaciones realizadas hasta la fecha de la redacción del presente artículo son tres. Como detallaremos a continuación, cada liberación perseguía sus propios objetivos, por lo que las cargas útiles se ajustaron a los objetivos perseguidos en cada etapa del proyecto.

También dentro de esta sección se detallan los resultados y algunas conclusiones para cada una de las liberaciones.

V-A. Primera Liberación.

V-A1. Objetivos y Motivaciones: Esta liberación tenía como objetivos testear la comunicación implementada por el grupo TeleGlobosats, y ganar un poco de experiencia con respecto a todo lo que es la liberación del globo sonda como un experimento de campo muy amplio. La misma se concretó el 24 de Abril de 2008.

Las tareas que se llevaron a cabo con motivo de la primera liberación implicaron el desarrollo de un circuito capaz de desacoplar la carga útil del globo durante el vuelo[18], tareas relativas al modelado térmico de la cápsula así su como fabricación, y todas las tareas necesarias para llevar a cabo la liberación.

La carga útil para esta liberación constaba de una placa encargada de realizar la modulación de las tramas y enviarlas a un transmisor. Las tramas incluían información proveniente de un módulo GPS y dos sensores de temperatura midiendo temperatura externa interna a la cápsula. Asimismo, dado que se pudo tramitar la liberación en horas del día, se decidió incluir dentro de la carga útil una video grabadora digital. No se incluyó el banco de memorias RAM dentro de la carga útil en esta oportunidad.

V-A2. Problemas: El principal inconveniente ocurrido fue el no funcionamiento de la recepción de señal de los satélites para su posterior utilización por el módulo GPS que brindaría los datos de posición: longitud, latitud y altura. Al momento de la liberación no se pudo detectar cuál era el defecto puntual, lo único que se sabía era que el GPS indicaba que no estaba recibiendo señal de satélite a través del mensaje transmitido por el sistema, que desplegaba el mensaje «NO SAT».

Mediante pruebas posteriores a la liberación, se identificó el origen del defecto, el cual era la eliminación del blindaje de la antena y los conectores entre la última y el GPS, lo cual permitía la filtración de ruido y principalmente de la señal del transmisor.

Un problema derivado de no conocer la posición global era que nunca se activaría el circuito de desacople entre la carga útil y el globo[19], por lo tanto en caso de que el globo y su carga se mantuvieran en equilibrio a determinada altura y el viento arrastrara al globo de forma prolongada se perdería la posibilidad de rescate.

Otro problema era que la cápsula presentaba un orificio muy grande en la posición de la cámara, razón por la cual se filtraba el aire frío, exponiendo la electrónica y baterías a condiciones

[18] Circuito Quema Tanza.

[19] El cual se activaría en caso de que la carga útil se saliera por fuera de una zona preestablecida.

extremas. Esta puede haber sido la causa de la detención de la filmación, afectando directamente a la cámara de video o a las pilas que le servían de alimentación.

V-A3. Resultados: Con respecto a la transmisión de datos en sí misma, se puede señalar que se pudieron recibir paquetes durante prácticamente todo el transcurso del experimento. No obstante, como se ya se mencionó, el no disponer de información de GPS llevó a que no se pudiera determinar la posición de la carga útil en ningún momento, particularmente la posición de su caída. La recuperación de la cápsula se concretó de forma fortuita, luego de la comunicación con los propietarios de una finca rural en donde se había producido el aterrizaje de la carga útil.

Las temperaturas mínimas registradas por los sensores fueron -7 ºC la temperatura interna y -21ºC la externa.

El recorrido final en línea recta del payload fue de 194 km. La duración del vuelo fue de aproximadamente 3 horas y 15 minutos, estimado a partir del momento de la liberación y cuando se dejaron de recepcionar las trasmisiones.

Fueron capturadas imágenes a gran altura de nuestro territorio y su espacio aéreo. La filmación estimando *grosso modo* se detuvo a una altura cercana a los 15.000 metros, cuando incluso ya se había superado la posición de las nubes.

V-A4. Conclusiones: En líneas generales se puede concluir que el experimento fue exitoso a pesar del ya comentado grave problema sucedido con la recepción de la señal satelital, siendo el principal aporte de esta liberación la experiencia adquirida respecto a los procedimientos a seguir. Asimismo se comprobó el correcto funcionamiento de la transmisión.

No se puede concluir acerca de los datos de temperatura recibidos[20], ya que no se dispone de información para determinar la altura correspondiente a cada temperatura[21], ni tampoco se contaba con sensores de temperatura calibrados en esta oportunidad.

V-B. Segunda Liberación.

V-B1. Objetivos y Motivaciones: El objetivo principal de esta liberación era llevar a cabo el experimento que sometería memorias RAM estáticas al efecto de la radiación. También en este lanzamiento se comprobaría el funcionamiento de prácticamente todo el HW diseñado, excepto por la placa anti Latchup, y el SW implementado relacionado a la misma.

La fecha de la liberación fue el 25 de Setiembre de 2008. Esta liberación se realizó en horas nocturnas, por lo que a diferencia de la primera liberación no se incluyó ninguna cámara digital dentro de la carga útil. Los dispositivos que se incluyeron en la carga útil fueron la Main Board[22], Power Board, Telemet Board[23], el transmisor y su antena, la termocupla junto a su placa de acondicionamiento de señal[24], y la antena del módulo GPS.

V-B2. Problemas: Los dos problemas de mayor importancia que se suscitaron fueron:

- **La interrupción parcial de las transmisiones** durante el descenso del globo.
- **No haber podido recuperar la cápsula por medios propios**, habiendo sido ésta encontrada tal como en la primer liberación por el propietario del campo en que cayó.

En tests posteriores realizados a la carga útil, sin modificarla con respecto a la liberación, no fue posible identificar la causa del ruido percibido en la señal transmitida, que distorsionaba los paquetes a tal punto que la mayoría de ellos no pudo ser decodificado.

En cuanto al segundo problema mencionado, se cree aunque no se ha podido comprobar que la cápsula dejó de enviar paquetes al caer. Esto tendría como consecuencias que no fuera posible determinar la dirección a seguir para dar con el lugar en que está la carga útil luego de que ésta se encontrara en tierra.

El primer error debido al software implementado se dio en esta liberación:

- Un **error en la interpretación de la información de altura dada por el GPS** causaba el cálculo equivocado de la altura a la que se encontraba el receptor.
- Un error no menor que se cometió fue el de **no reiniciar la electrónica antes de cerrar el payload**. Esto sumado a que la misma había permanecido encendida por un período aproximado de dos horas en tierra trajo como consecuencia el desbordamiento de la capacidad de almacenamiento de datos por parte de la caja negra, quedando registrados apenas una fracción del vuelo.

V-B3. Resultados:

- Se pudo llevar a cabo el experimento sobre el efecto de la radiación en el DUT, más específicamente sobre un banco de memorias RAM estáticas de una capacidad total de 1 GB, no se registrándose errores en los bits almacenados.
- Los sensores utilizados respondieron de forma correcta durante todo el vuelo y se recabaron datos internos y externos al payload, incluyendo presión atmosférica y temperatura, esta última indirectamente a través del voltaje de salida de la placa de acondicionamiento de señal de la termocupla. El resultado de la medición de temperatura externa a través de los voltajes medidos y una vez realizada la calibración del sistema se ilustra en la figura 5. En la misma se puede observar también la gráfica del modelo manejado [EAM].
- El sensor de presión, cuyos datos de calibración se poseían pero que por una cuestión de tiempo no se pudieron tomar en cuenta en el software, registró la presión mínima de 19 hPa[25]. Los datos de presión eran

[20] En el mejor caso se puede concluir que no son fiables.

[21] No se contó con información de GPS, ni de otros métodos de medida indirecta de la altura como por ejemplo la medida de presión atmosférica.

[22] Esta vez sin haber calibrado los sistemas de medida de temperatura -interna y externa -, presión y humedad.

[23] Incluye el módulo GPS.

[24] Primera versión de la placa de acondicionamiento de la termocupla.

[25] Tener en cuenta el offset del mismo, que no se había descontado en el software como ya se indicó.

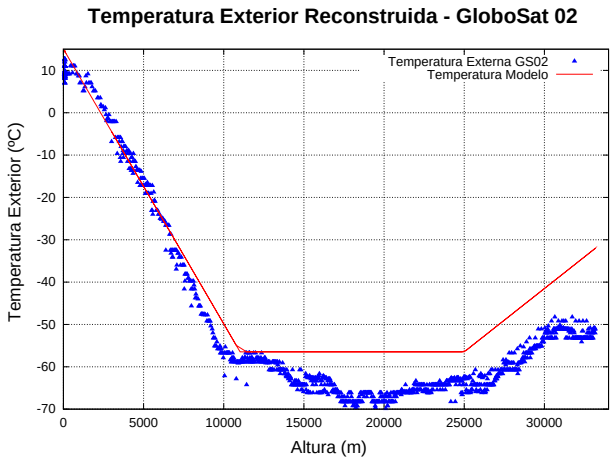


Figura 5. Gráfico de los datos de temperatura exterior en función de la altura basado en los datos de voltaje recolectados por el GloboSat 02, realizada a posteriori a partir de las curvas de ajuste obtenidas en la calibración. A modo de comparativa, se grafica el modelo de temperatura en función de la altura manejado [EAM].

útiles para estimar la altura, ya que como se indicó en la sección anterior un error en el software provocaba que los mismos no pudieran ser interpretados correctamente en tiempo real.
- La altura máxima registrada fue de 33.173 metros. La distancia en línea recta desde Durazno hasta Molles de Godoy, sitio en que la cápsula hizo contacto con tierra, es de 130 Km y el tiempo total del vuelo fue de aproximadamente 2 horas y 55 minutos.
- El sistema GPS no presentó contratiempos funcionando correctamente durante todo el vuelo[26], pudiéndose entonces seguir al payload en todos los instantes en que la transmisión era correcta, informando de este modo su posición al sistema de Control Aéreo del Aeropuerto Internacional de Carrasco.

V-B4. Conclusiones: Esta liberación fue muy importante y marcó el cumplimiento de los más importantes objetivos del proyecto, ya que fue testeada la plataforma hardware diseñada corroborando su correcto funcionamiento, y se llevó acabo el experimento de investigación acerca del efecto de la radiación sobre celdas de memoria, además de la liberación en sí misma como una forma de efectuar experimentos a grandes alturas.

V-C. Tercera Liberación.

V-C1. Objetivos y Motivaciones: El propósito de la tercera liberación estaba orientado a consolidar completamente todo el sistema, así como la forma de realizar este tipo de experimentos, el know-how. Se realizarían los ajustes correspondientes en el hardware y software a partir del análisis de los errores detectados en las liberaciones precedentes.

[26]Exceptuando el error ya mencionado de overflow en altura, aproximadamente a los 10000 metros.

V-C2. Problemas:

- Hubo dos problemas significativos de último momento, un falso contacto en el conector de la antena del GPS y la retención de la señal de PPT del transmisor. Estos inconvenientes nunca se habían presentado durante las largas pruebas en que se monitoreo el funcionamiento del sistema. Finalmente se debió solucionar el falso contacto eliminando el conector, soldando los cables y adosándole un blindaje «casero» al punto de la soldadura. Como se llegaba al límite de tiempo autorizado para liberar el globo, el segundo problema no se solucionó ya que a pesar de su presencia el conjunto podía continuar funcionando y brindando las prestaciones necesarias.
- Durante el vuelo se produjo lo que pudo ser la consecuencia directa del problema no solucionado, repentinamente la carga útil dejó de transmitir. Por motivos que se desconocen cerca de 45 minutos más tarde se volvieron a captar con los equipos de radio las tramas transmitidas. Aunque se estableció la hipótesis de que el transmisor pudo verse afectado por la activación continua de su señal de PTT, está causa no pudo ser determinada, por lo que no se tiene certeza sobre el motivo de esta falla grave.
- El tercer error aconteció apenas despegó el globo del suelo, momento a partir del cual se observó que la medida de temperatura externa indicaba 43 ºC la mayor parte del tiempo. Luego de recabadas las medidas de temperatura que habían sido almacenadas en las memorias se encontraron varios datos correctos, por lo que se determinó que el origen del problema fue un falso contacto en alguna de las conexiones entre la placa Main y la de compensación de punta fría.

V-C3. Resultados:

- Con respecto a los sensores de presión y temperatura externa, ya habían sido calibrados y el ajuste correspondiente había sido implementado en las rutinas de software que calculaban estas magnitudes. Como se indicó en la sección V-C2, el relevamiento de temperatura no pudo concretarse de manera satisfactoria. Los resultados para la presión atmosférica se grafican en la figura 6, junto al modelo manejado [EAM].
- Luego del problema corregido antes de cerrarse la cápsula, se recibían correctamente los datos de posición provenientes del módulo GPS. Esto posibilitó el seguimiento de la carga útil y se logró cumplir con el objetivo hasta ahora inalcanzado de recuperarla a partir de los datos recibidos. Un elemento que facilitó en parte este objetivo fue la cercanía del sitio en que la cápsula aterrizó.
- Todos los datos recabados por la electrónica fueron almacenados en las memorias, sin problemas de capacidad, incluso quedando ociosa una gran parte de la misma. La distancia final en línea recta fue de apenas 40 km y la altura alcanzada de 31.339 metros y la duración del vuelo fue de 2 horas y 20 minutos.
- Nuevamente se llevó adelante la exposición de las memorias a la radiación natural y no se detectaron errores en los bits guardados en las celdas.

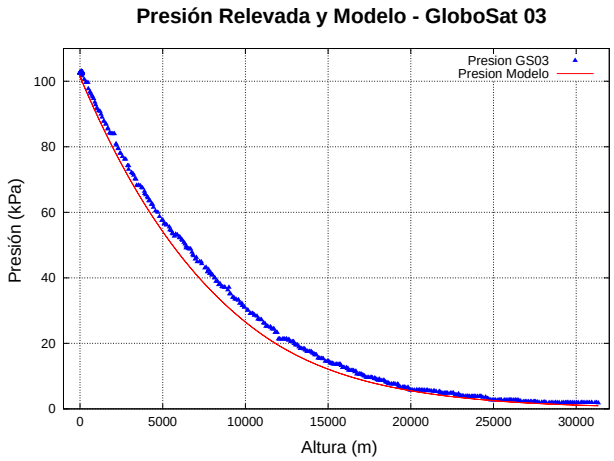


Figura 6. Relevamiento de la presión atmosférica para el rango de alturas recorrido por el globo, junto a la presión en función de la altura dada por el modelo [EAM].

V-C4. Conclusiones: Los objetivos propuestos se cumplieron, siendo la única liberación en la que se pudieron cumplir todas sus etapas, desde la preparación hasta la recuperación de la carga útil. El hardware y software se desempeñaron correctamente y cumplieron con las funciones para las que fueron diseñados[27], el control del experimento del DUT se comportó de acuerdo a lo establecido. A pesar de los problemas citados se considera que la liberación fue exitosa.

VI. Conclusiones finales del proyecto.

VI-A. Conclusiones.

Además de cumplir con el objetivo de desarrollar una plataforma hardware que cumpliera con determinados requerimientos, se reunieron y documentaron los conocimientos necesarios para la realización de experimentos utilizando como plataforma globos estratosféricos. En conjunción el logro de estos dos objetivos trae como resultado global la adquisición de medios y métodos necesarios para la implementación de experimentos científicos sometidos a las condiciones de grandes alturas.

Puntualmente se cumplieron los objetivos de diseño y fabricación de una plataforma hardware, que cuenta con las interfaces de comunicación necesarias para el control del DUT, la recepción de datos provenientes de un módulo GPS y la interacción con un hardware encargado de la modulación y transmisión de datos. A su vez se cuenta con una variedad de sensores analógicos y digitales a través de los cuales se pueden relevar las condiciones del entorno en que se desarrollan los experimentos.

El sistema está dotado con las capacidades necesarias para controlar de forma eficiente el consumo de energía y es capaz de cumplir con un plan de vuelo liberándose del vínculo con el globo en caso de ser necesario. El software implementado cumple con todas las funcionalidades requeridas, recabando los datos de todos los sensores, realizando el manejo de las interfaces con otros dispositivos recibiendo y enviando información a los mismos. Toda la información requerida puede ser almacenada en la memoria disponible para su posterior análisis.

La plataforma cuenta con la característica de autoreiniciarse en caso de bloqueo, gracias a la utilización del watchdog, sin sobreescribir la información previa que había sido guardada, debido al manejo de la interrupción de este dispositivo.

El estudio de la aislación térmica condujo a la fabricación de las cápsulas de forma que soportaran y brindaran la protección necesaria a la carga útil de cada liberación.

Se explicitaron mejoras a los diseños implementados, las cuales pueden ser tomadas para el perfeccionamiento de los mismos. Dentro de las mismas se destaca la mejora del diseño de la Main Board, de la cual fueron eliminados los errores constatados y se agregaron nuevas funcionalidades para un mejor aprovechamiento de los recursos brindados por el microcontrolador empleado. Algunas de estas mejoras comprenden por ejemplo la disponibilidad de una nueva UART para comunicación con un PC, la accesibilidad de los contactos de la interfaz I²C - útiles en caso de necesitar agregar nuevos esclavos - y la disponibilidad de contactos necesarios para realizar la depuración on - chip[28].

El circuito Anti Latchup diseñado y parcialmente implementado está completamente documentado, restando únicamente la adquisición de algunos componentes para completar el montaje del PCB, siendo posible una vez finalizada esta etapa realizar su testeo.

Desde una mirada holística, se puede remarcar que los puntos débiles del diseño se encuentran en las conexiones y componentes susceptibles de ser afectados por la radiofrecuencia, a saber:

- ***La conexión entre el módulo GPS y su antena.*** Puede provocar que no se reciba la información desde los satélites por falta de señal en caso de falsos contactos, o directamente recibir demasiada interferencia en casos de blindajes defectuosos.
- ***Las bobinas de la placa de fuentes.*** Las bobinas empleadas no pueden ser del tipo toroidal, sino que se deberán procurar del tipo blindado. De lo contrario, pueden dañarse componentes como sucedió con uno de los módulos GPS empleados.
- ***La conexión del PTT del transmisor.*** La tierra del circuito que comande el PTT del transmisor[29] debe extraerse, en lo posible, directamente de la batería y también filtrada a través de un capacitor, ya que de extraerse directamente de la Placa Telemet los bucles de corriente elevan el nivel de tierra y pueden ocasionar que

[27] Exceptuando el hardware de medición de la temperatura exterior a la cápsula.

[28] JTAG ICE.

[29] Circuito ubicado en la Telemet Board.

el PTT del transmisor quede activo. Esto se traduciría en consumos mayores a los esperados y en peligro de daño del transmisor por verse forzado a disipar demasiada potencia.

Los datos de presión relevados (figura 6) muestran una concordancia muy buena respecto del modelo manejado [EAM], sobre todo hasta los 2500 m y a partir de los 17000 metros de altura. Por otra parte, los datos de temperatura (figura 5) parecen concordar con el modelo manejado en lo que respecta a su forma, es decir, un descenso de temperatura lineal hasta cerca de 11000 metros, una zona más o menos constante y un posterior nuevo incremento de la temperatura lineal a partir de los 25000 metros. A partir de aproximadamente 13000 metros se produce un apartamiento más o menos significativo entre los datos relevados y el modelo. Sin embargo, resultaría apresurado concluir que los datos relevados no son correctos, ya que el modelo manejado en un tanto simplificado al determinar la temperatura únicamente en función de la altura. El análisis de modelos más acabados (por ejemplo [US76]) puede proveer un análisis más exacto[30]. Finalmente, acerca de los datos de humedad y temperatura externa, debemos decir que no es posible concluir acerca de los mismos en esta instancia, ya que como se verá en la sección VI-B, aún está pendiente su calibración.

Mientras tanto, el experimento llevado acabo en el DUT no arrojó resultados positivos, lo cual era de esperar debido a la baja probabilidad de que ocurrieran errores en los bits almacenados por las memorias. Esto se debe al corto período de tiempo que permanece el experimento a grandes alturas. Luego de señalado esto se debe concluir que el tipo de plataforma utilizado - globosats -, no es el adecuado para la aceleración de experimentos sobre el efecto de la radiación sobre componentes eléctricos.

VI-B. Trabajos a futuro.

En lo que se refiere al corto plazo, las principales líneas de continuación de los trabajos realizados, son potenciar las capacidades del hardware a través de la implementación de software, ya que los porcentajes de utilización de la memoria de programación disponible del micro y su capacidad de procesamiento son muy bajos.

También queda pendiente la calibración de dos sensores, el de humedad y el de temperatura interna. Mediante los vínculos establecidos con el Laboratorio Tecnológico del Uruguay esta actividad puede realizarse sin inconvenientes. Particularmente, existe un método de calibración de sensores de humedad denominado «Método de las Sales Higroscópicas», el cual resulta sencillo de implementar [ERC08].

Como ya había sido mencionado está pendiente la finalización de la Placa Anti Latchup y el testeo de su funcionamiento. Para cumplir con esta tarea solamente es necesaria la adquisición de unos pocos componentes. Como consecuencia directa de la finalización de la Placa Anti Latchup se podrá desarrollar el software para el control de la corriente consumida por el circuito en cada instante y de esta manera la carga consumida a la batería. Esta información sería útil al momento de la administración de la energía del sistema.

A mediano y largo plazo se podría afrontar la optimización de los diseños hardware, tomando como base las versiones mejoradas ya diseñadas, como por ejemplo Placa Main o de compensación de punta fría y acondicionamiento de la señal de la termocupla.

Otro aspecto a mejorar es el estudio del comportamiento mecánico de la cápsula, para determinar problemas como los que pudieran haber causado la no transmisión de paquetes luego de la caída de la carga útil, diseñando mecanismos para disuadir o disminuir estos efectos o pensar una nueva forma para la transmisión de los datos de posición estando la cápsula en el suelo.

Una tarea que se torna necesaria[31] de llevar a cabo antes de una nueva liberación es la implementación de algún mecanismo de detección del umbral de descarga para las baterías de Li-Po, para el posterior apagado del sistema, ya que continuar descargando la batería por debajo de este umbral puede provocar daños permanentes sobre las mismas.

NOMENCLATURA

DUT Device Under Test, o Dispositivo Bajo Prueba. Es el dispositivo cuyo comportamiento se quiere observar.

REFERENCIAS

[AlN] Sitio *web* de la Red Alfa Nicron: http://tima.imag.fr/qlf/alfa-nicron/index.htm.

[ASim] Glenn Research Center, «AtmosModeler Simulator», URL: http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/atmosi.html.

[EAM] Glenn Research Center, «*Earth Atmosphere Model* - Metric Units», URL: http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/atmosmet.html.

[ERC08] Estrada. M. A., Rodríguez. S. A., Caballero E., Sarmiento. R., Racedo. N. F, «Desarrollo de un Sistema de Monitoreo en Tiempo Real para la Humedad Relativa» , *REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA*, vol.40, No. 2, pp. 382-384, Junio 2008.

[Lai] Sitio *web* del Proyecto Laí: http://iie.fing.edu.uy/twiki/bin/view.cgi/Satelite/WebHome.

[MK95] M. Maher and R. Koga, «Single Event Upset and Latchup considerations for CMOS devices operated at 3.3 V», National Semiconductor Application Note 989, Abril 1995.

[NB93] E. Normand and T. J. Baker, «Altitude and latitude variations in avionics SEU and atmospheric neutron flux», *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, vol. 40, pp. 1484-1490, 1993.

[Nor96] E. Normand, «Single Event Effects in avionics», *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, vol. 43, pp. 461-474, Abril 1996.

[Pou05] A. L. R. Pouponnot, «Strategic use of SEE mitigation techniques for the development of the ESA microprocessors: Past, present and future», en *Proceedings of the 11th International On-Line Testing Symposium*, 2005.

[US76] «U. S. Standard Atmosphere, 1976», National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, United States Air Force, 1976.

[Zie] J. F. Ziegler, «Trends in electronic reliability - effects of terrestrial cosmic rays». URL: http://www.srim.org/SER/SERTrends.htm.

[30] Siempre teniendo en cuenta que se trata de un modelo *estándar* de la atmósfera.

[31] Si no imprescindible.