



Sistema de control y determinación de actitud (*ADCS board*)

Autor:

Ing. Valdez Gastón

Director:

Dr. Amilcar Rincón Charris (Aerospace Laboratory)

*Esta planificación fue realizada en el curso de Gestión de proyectos
entre el 10 de octubre 2023 y el 5 de diciembre 2023.*

Índice

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar	5
2. Identificación y análisis de los interesados	6
3. Propósito del proyecto	6
4. Alcance del proyecto	6
5. Supuestos del proyecto.	7
6. Requerimientos	7
7. Historias de usuarios (<i>Product backlog</i>).	8
8. Entregables principales del proyecto	9
9. Desglose del trabajo en tareas	9
10. Diagrama de Activity On Node.	10
11. Diagrama de Gantt	12
12. Presupuesto detallado del proyecto	14
13. Gestión de riesgos	14
14. Gestión de la calidad	16
15. Procesos de cierre	18

Registros de cambios

Revisión	Detalles de los cambios realizados	Fecha
0	Creación del documento	10 de octubre 2023
1	Se añade contexto en sección 1 Se vuelve a redactar el primer ítem de la sección 5 Sección 4 se redacta la última oración	11 de noviembre 2023
2	Se redactan las secciones 5 a 9	11 de noviembre 2023
3	Se completa hasta el punto 12 inclusive Se cambia cubesat por CubeSat Se modifica la segunda sección Se cambia la cantidad de horas de algunas de las tareas	13 de noviembre 2023
4	Se completa el plan Se modifica la figura 1 al idioma español Se añaden tareas a la sección 9 Se modifica el diagrama <i>Activity On Node</i> Se modifica la figura 3	15 de noviembre 2023

Acta de constitución del proyecto

Buenos Aires, 10 de octubre 2023

Por medio de la presente se acuerda con el Ing. Valdez Gastón que su Trabajo Final de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos se titulará “Sistema de control y determinación de actitud (ADCS *board*)”, consiste en el diseño electrónico de un sistema ADCS cuya funcionalidad es orientar de forma controlada un satélite denominado CubeSat y tendrá un presupuesto estimado de 600 hs de trabajo y con fecha de inicio 10 de octubre 2023 y fecha de presentación pública 30 de septiembre de 2024.

Se adjunta a esta acta la planificación inicial.

Dr. Ing. Ariel Lutenberg
Director posgrado FIUBA

Dr. Amilcar Rincon Charris
Aerospace Laboratory

Dr. Amilcar Rincón Charris
Director del Trabajo Final

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar

El presente proyecto, se realiza para el equipo PR-cunar2, perteneciente a la Universidad de Puerto Rico. Este equipo se dedica al desarrollo de la industria aeroespacial. En este trabajo se desarrolla un módulo de hardware y software dedicado al control de la orientación de un satélite, que irá dentro de un satélite denominado CubeSat.

Un CubeSat es un satélite que posee una estructura de 10x10x10 cm y que posee un peso máximo de 1,33 kg. Los satélites CubeSat permiten que distintos investigadores y entusiastas del espacio envíen satélites al espacio con un costo relativamente bajo respecto a otro tipo de soluciones. La construcción de un CubeSat se realiza mediante módulos electrónicos ensamblados entre sí usando el bus conector denominado PC104.

Un módulo electrónico que es parte de un CubeSat se denomina ADCS (*Attitude determination control system*), este es responsable de controlar y mantener la orientación del CubeSat en el espacio. Este tipo de control permite que los instrumentos que se encuentren dentro del satélite se orienten en direcciones específicas. Por ejemplo puede orientar su antena hacia la tierra para que la comunicación con tierra tenga mayor fluidez.

Los sistemas ADCS tienen dos tipos de sensores: de posicionamiento o inerciales. Los primeros se relacionan con el conocimiento de la posición absoluta, es decir, requiere un conocimiento del entorno. Los sensores inerciales no requieren este tipo de conocimiento, sino que utilizan parámetros como velocidad angular o aceleración.

Estos sistemas no solamente deben realizar la lectura de los sensores, sino que actúan sobre el sistema para orientar el satélite en la posición deseada y mantenerla estable. Esta actuación se realiza mediante ruedas de reacción o torques magnéticos para realizar ajustes angulares cuando el satélite se encuentra orbitando la tierra.

Para generar el ajuste angular con el uso de ruedas de reacción o torques magnéticos, se debe conocer la posición y orientación en el espacio del CubeSat. Una vez conocidos ambos parámetros, mediante un proceso denominado “algoritmo de fusión” produce la actuación sobre las ruedas de reacción o magnetorques para orientar al CubeSat en la posición deseada.

Los sistemas ADCS se encuentran de forma comercial y existen empresas que proveen este tipo de soluciones para los CubeSats. El presente proyecto consiste en el desarrollo de un sistema ADCS. El desarrollo propio contiene las siguientes ventajas frente a las soluciones comerciales:

- Selección de torques magnéticos, ruedas de reacción o innovar en mecanismos de orientación.
- Realizar distintos algoritmos y probar la eficiencia de consumo eléctrico.
- Posibilidad de generar un producto comercial.

El diagrama en bloques del sistema ADCS se muestra en la figura 1. El proyecto se divide en dos etapas: fase de prototipo y versión final. Una vez finalizada la fase de prototipado se realizan las pruebas de validación del sistema. Una vez superada la etapa de validación se procede al desarrollo en su versión final y comienza la segunda fase del proyecto. Cabe destacar que como subproducto puede generarse una placa comercial, siendo esto último deseable pero no exigible por parte del cliente.

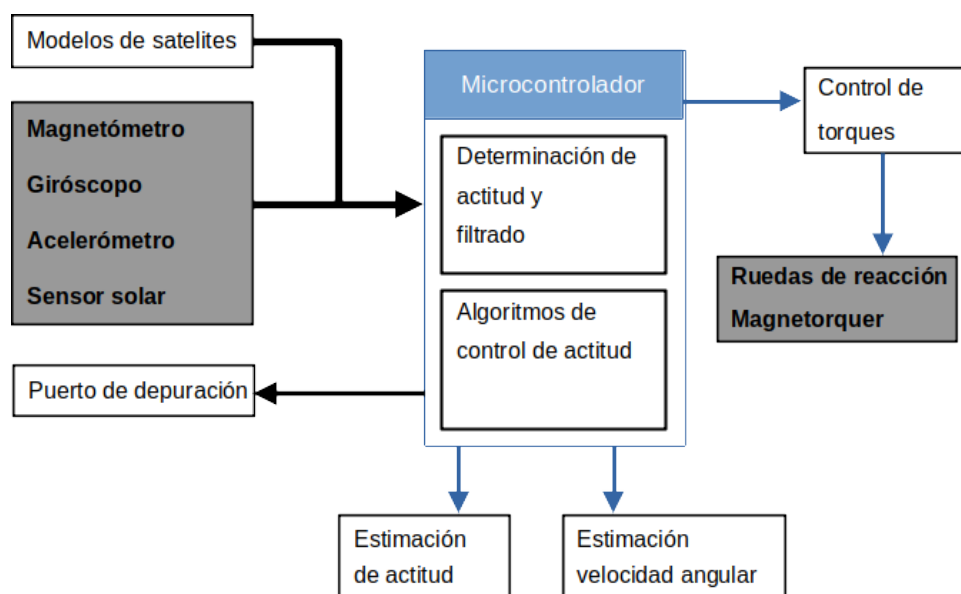


Figura 1. Diagrama en bloques del sistema a implementar.

2. Identificación y análisis de los interesados

El Dr. Amilcar Rincón Charris ocupa la posición de cliente y director. En la tabla se le ha asignado el rol de mayor importancia.

Rol	Nombre y Apellido	Organización	Puesto
Auspiciante	Gerardo Morell	NASA Epscor	Investigador principal
Responsable	Ing. Valdez Gastón	FIUBA	Alumno
Colaboradores	Sebastián Medina	Aerospace Laboratory	Asistente de laboratorio
Orientador	Dr. Amilcar Rincón Charris	Aerospace Laboratory	Director Trabajo final
Usuario final	Dueño de un CubeSat	NanoRack	-

3. Propósito del proyecto

El propósito del proyecto es generar el módulo electrónico del sistema ADCS para un CubeSat.

4. Alcance del proyecto

- Desarrollo del algoritmo ADCS.
- Desarrollo de software en C/C++ para el sistema embebido.
- Diseño y desarrollo del protocolo de comunicación utilizando el conector PC104.
- Diseño y simulación del hardware asociado al microcontrolador.
- Validación del producto.
- Generación de documentación.

- Integración a un CubeSat funcional (TBD).

El alcance del proyecto contempla el diseño y fabricación del PCB y los ensayos para realizar la validación del producto se deben acordar con el cliente.

5. Supuestos del proyecto

- El proyecto posee financiamiento para la adquisición de productos electrónicos.
- El sistema embebido posee disponibilidad en el mercado.
- Se tienen las licencias correspondientes para los programas de simulación electrónica y diseño de PCB.
- Se posee acceso a pc con sistema Linux/Windows.
- El personal abocado al diseño mecánico realizará el trabajo en tiempo y forma.
- Hay recursos económicos disponibles para enviar a fabricar la placa de circuito impreso.
- Se define previamente un flujo de trabajo con el cliente.

6. Requerimientos

En los ítems que se enumeran a continuación se utiliza la sigla TBD (*to be defined*) y significa que el requerimiento aún no se terminó de acordar con el cliente.

1. Requerimientos funcionales.

- 1.1. La orientación espacial de los sensores y actuadores del CubeSat deben alinearse a los ejes principales del CubeSat.
- 1.2. Estimar la altitud y proporcionar control en un tiempo suficientemente corto (TBD) para que el sistema pueda controlarse exitosamente.
- 1.3. El control de posición se realiza en los ejes x, y, z solidarios al CubeSat.
- 1.4. El error máximo en la actuación del satélite será de un 10 % respecto a la referencia elegida.
- 1.5. El algoritmo de control se plantea sobre CubeSat de 1 U (10x10x10 cm).
- 1.6. La comunicación entre el ADCS y la computadora central será utilizando el protocolo SPI (opcional).
- 1.7. La comunicación con la OBC será mediante bus CAN (opcional).
- 1.8. Se debe utilizar un microcontrolador de bajo consumo.

2. El software debe realizarse sobre un sistema operativo de tiempo real.

3. El software debe gestionarse mediante un sistema de control de versiones.

4. Requerimientos de Test.

- 4.1. El algoritmo de control en C/C++ debe contrastarse contra matlab u octave, scilab, etc.
- 4.2. Los drivers de software deben pasar tests unitarios.
- 4.3. El prototipo y su versión final debe superar el ensayo en una bobina de Helmholtz de al menos dos ejes.
5. Requerimientos de hardware.
 - 5.1. La placa de circuito impreso tendrá un tamaño máximo de 10x10 cm.
 - 5.2. El conector a utilizar es el PC104 con el estándar para CubeSats.
 - 5.3. El PCB tendrá unívocamente identificado el eje x positivo y negativo, y positivo y negativo y z positivo y negativo.
6. Requerimientos de documentación.
 - 6.1. Descripción del algoritmo implementado.
 - 6.2. Resultados del algoritmo.
 - 6.3. Archivos de simulación y archivos de PCB.
 - 6.4. Memoria técnica.
 - 6.5. Código fuente del sistema.

7. Historias de usuarios (*Product backlog*)

Las historias de usuario se han escrito desde la perspectiva un ingeniero de control de misión, operador de misión espacial y científico de la misión espacial. La evaluación de las historias de usuario se evalúan en base a la complejidad de realización mediante el siguiente criterio:

- Muy bajo: 1 punto.
- Bajo: 2 punto.
- Medio : 3 punto.
- Alto: 4 punto.
- Muy alto: 5 punto.

- Como ingeniero de control de misión, quiero que el sistema de ADCS tenga la capacidad de realizar una calibración automática de los sensores de actitud a bordo para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos de orientación.
 - Muy alto: 5 puntos.
- Como operador de una misión espacial, necesito que el sistema de ADCS tenga la capacidad de realizar ajustes dinámicos en la orientación de la nave espacial en tiempo real. .
 - Muy alto: 5 puntos.

- Como científico de la misión espacial, necesito que el sistema de ADCS sea capaz de proporcionar una estabilización precisa y estable de la nave espacial durante las observaciones científicas. Durante estas observaciones, es crucial evitar cualquier tipo de movimiento o vibración que pueda afectar la calidad de los datos recopilados.
 - Muy alto: 5 puntos.

8. Entregables principales del proyecto

- Archivos de simulación.
- Scripts de simulación.
- Archivos de esquemáticos en PDF y archivo original.
- Código fuente del software.

9. Desglose del trabajo en tareas

A continuación se enumeran las tareas con su código WBS (*Work Breakdown Structure*) correspondiente.

1. Inicio de planificación del proyecto
 - 1.1. Elaboración del plan de proyecto (60 h).
 - 1.2. Revisión del plan de proyecto (10 h).
 - 1.3. Presentación del plan de proyecto (10 h).
2. Investigación preliminar.
 - 2.1. Búsqueda bibliográfica sobre sistemas de coordenadas en sistemas ADCS (4 h).
 - 2.2. Investigación de sistemas de coordenadas y algoritmos ADCS (40 h).
 - 2.3. Simulaciones con algoritmos ADCS y sistemas coordinados (40 h).
 - 2.4. Selección de sensores, actuadores y microcontrolador para el desarrollo (40 h).
3. Diseño de software y hardware ADCS.
 - 3.1. Simulación de datos de sensores en C (20 h).
 - 3.2. Codificación del algoritmo ADCS en C (40 h).
 - 3.3. Contraste de algoritmo contra simulaciones (10 h).
 - 3.4. Diseño de arquitectura de software (25 h).
 - 3.5. Codificación de drivers de sensores y actuadores (40 h).
 - 3.6. Integración del software (30 h).
 - 3.7. Diseño y simulación electrónica (esquemático) (30 h).
 - 3.8. Diseño de PCB (40 h).
 - 3.9. Fabricación de PCB (5 h).

3.10. Verificar la importación y trámites aduaneros para el envío del producto a Argentina (8 h).

4. Etapa de testing

4.1. Ensayo del bus de comunicación (16 h).

4.2. Búsqueda de lugares que tengan sala de ensayos con bobina de Helmholtz de al menos dos ejes para medir microsátélites (20 h).

4.3. Medición de parámetros eléctricos y de software de la placa prototipado (20 h).

4.4. Informe con resultados y propuestas de mejoras (8 h).

5. Desarrollo final del producto.

5.1. Realizar correcciones de software (25 h).

5.2. Realizar correcciones en el diseño del PCB (25 h).

5.3. Fabricación del PCB (3 h).

5.4. Ensayo con bobina de Helmholtz (10 h).

5.5. Medición de parámetros eléctricos y de software de la placa en su versión final (10 h).

5.6. Redacción de informe y memoria técnica (60 h).

5.7. Presentación y defensa del trabajo ante el jurado (30 h).

Cantidad total de horas: 679.

10. Diagrama de Activity On Node

En la figura 2 se muestra el diagrama *Activity on node*. Se omiten las tareas de escritura y presentación del plan de proyecto. Los códigos WBS utilizados son los utilizados en la sección 9. Las siglas utilizadas en este diagrama son:

- SC: sistema de coordenadas.
- SW: software.
- HW: Hardware.

La línea roja de la figura 2 se encuentra marcado el camino crítico del proyecto y tiene 541 horas de trabajo.

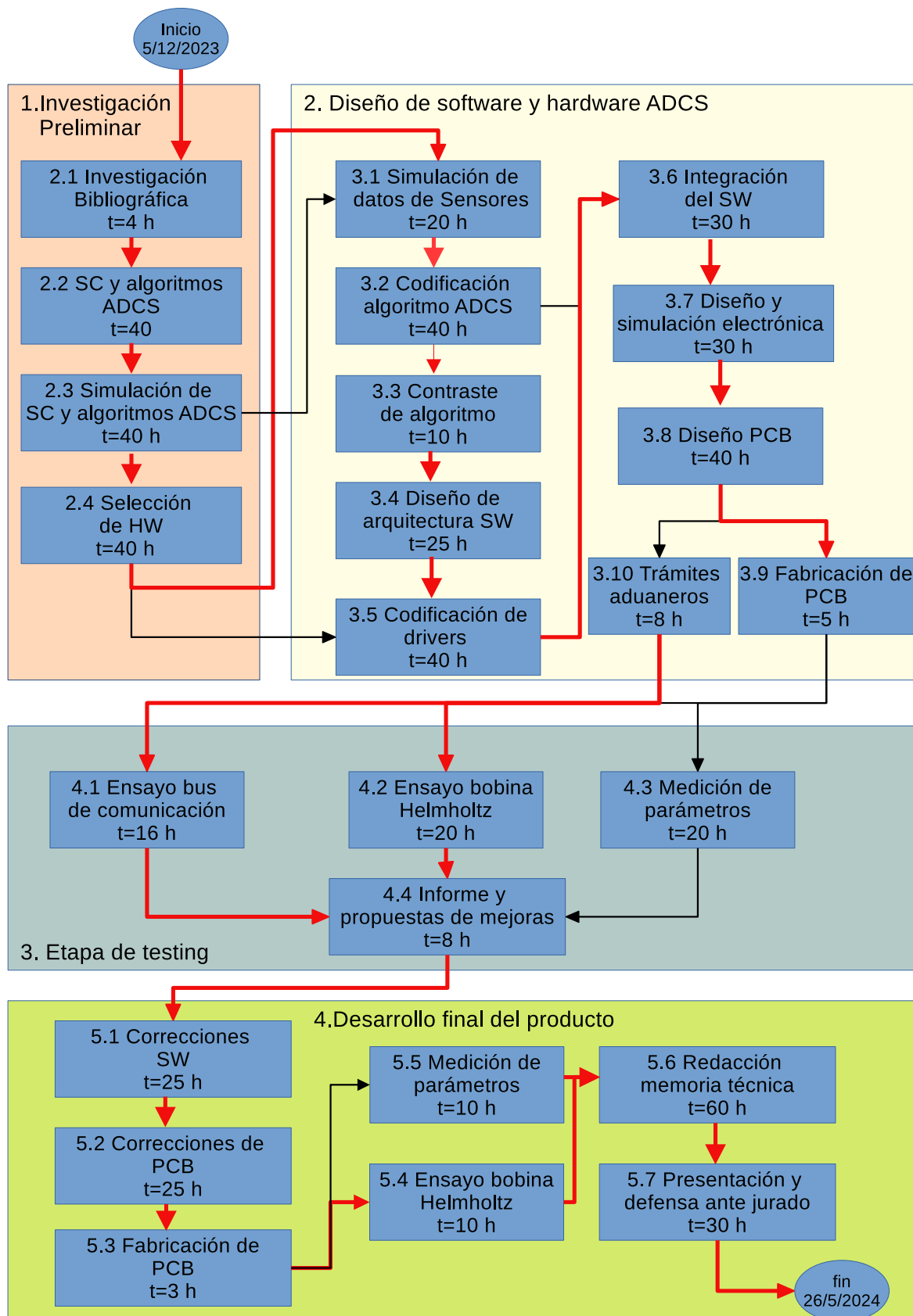


Figura 2. Diagrama de *Activity on node*.

11. Diagrama de Gantt

El diagrama de Gantt se ha realizado con 24 horas semanales de trabajo, con inicio el día 5 de diciembre del año 2023. Los códigos WBS son los presentados en la sección 9.

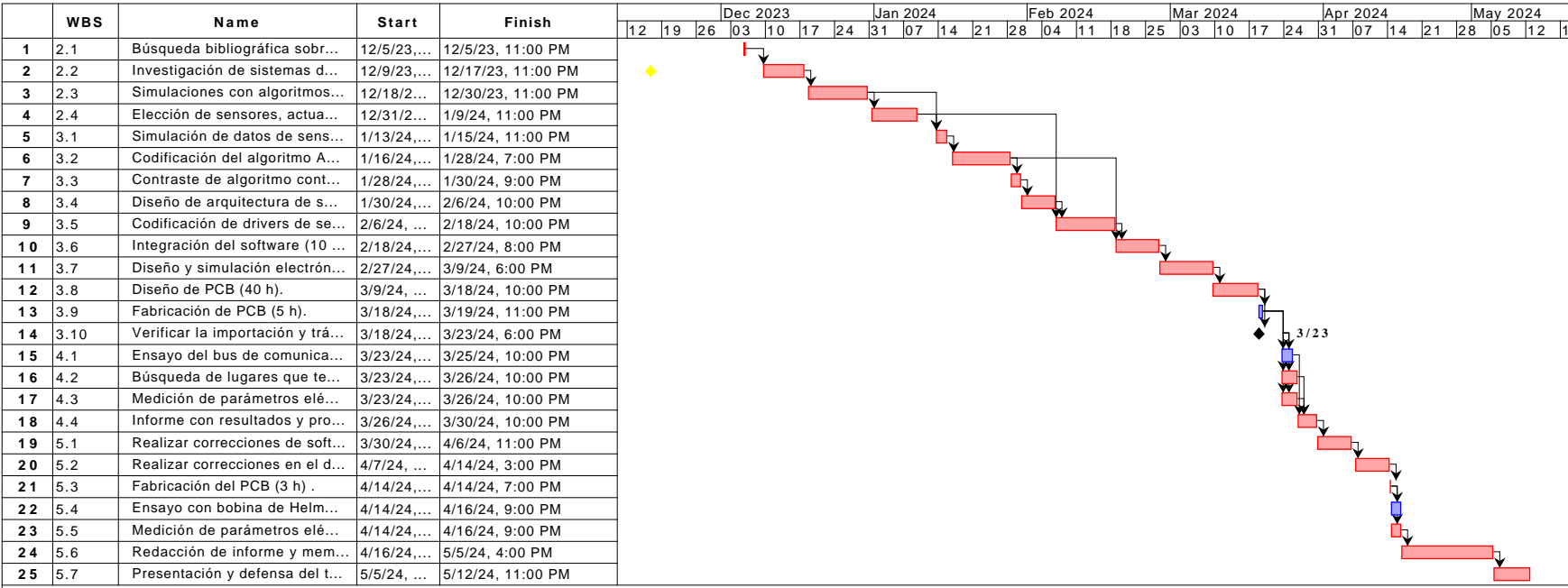


Figura 3. Diagrama de Gantt.

12. Presupuesto detallado del proyecto

La tabla de costos directos e indirectos es estimativa y puede variar según las necesidades del proyecto. La cotización se encuentra en dólares estadounidenses. La cotización al 16 de noviembre del año 2023 respecto al peso argentino (ARS) es de \$ 369,00 utilizando como referencia el Banco de la Nación.

COSTOS DIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Acelerómetro/giróscopo BOSCH BMI270	1	15 USD	15 USD
Placa de desarrollo STM32 o simil de bajo consumo	1	50 USD	50 USD
Conector PC104	1	20 USD	20 USD
Sensor solar	3	4 USD	12 USD
Horas de ingeniería	600	4 USD	2400 USD
SUBTOTAL			2497 USD
COSTOS INDIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Fabricación PCB con envío	10	-	50 USD
Componentes electrónicos varios	40	-	50 USD
SUBTOTAL			100 USD
TOTAL			2597 USD

13. Gestión de riesgos

Riesgo 1: selección incorrecta del microcontrolador.

- Severidad (S): 8.
Si el microcontrolador se selecciona de forma inadecuada pueden existir problemas sobre otras partes del sistema.
- Ocurrencia (O): 4.
Se va a seleccionar un microcontrolador que este probado en ámbitos aeroespaciales y tenga soporte del fabricante.

Riesgo 2: imposibilidad de importar el PCB poblado a Argentina.

- Severidad (S): 10.
Si no fuera posible por razones normativas generar la importación del PCB poblado a Argentina se deben reorganizar las tareas con código WBS 3 y 4.
- Ocurrencia (O): 9.
Ocurrió en proyectos anteriores donde el producto importado quedó retenido en la aduana, con aranceles prohibitivos para su liberación.

Riesgo 3: diseño y simulación electrónica.

- Severidad (S): 8.
Los componentes seleccionados para el diseño del PCB no los posee el fabricante. En este

caso se requiere realizar cambios en el diseño del PCB consumiendo una mayor cantidad de tiempo de la pautaada.

- Ocurrencia (O): 5.
En general cuando no existen ciertos componentes el fabricante te sugiere reemplazos que deben ser evaluados en el diseño.

Riesgo 4: inexistencia de lugares con bobina de Helmholtz.

- Severidad (S): 10.
El sistema ADCS debe probarse en este tipo de dispositivos porque emula la situación del espacio exterior.
- Ocurrencia (O): 4.
Actualmente estas instalaciones se encuentran disponibles en formato comercial o servicio. Además existen diseños y esquemáticos de su fabricación y diseño en internet que se pueden utilizar de consulta.

Riesgo 5: mal diseño de arquitectura de software.

- Severidad (S): 7.
Un mal diseño de la arquitectura de software impacta en los tiempos de la tarea 2.6, extendiendo el plazo de ejecución de la tarea.
- Ocurrencia (O): 3.
El equipo de desarrollo tiene experiencia realizando el diseño de arquitectura de software e integración de las diferentes partes de sistemas complejos.

Riesgo 6: subestimar el tiempo de simulación y algoritmos.

- Severidad (S): 9.
Una mala estimación en estos tiempos genera retrasos en todas las etapas siguientes.
- Ocurrencia (O): 5.
Dado que el personal posee experiencia en sistemas de coordenadas la probabilidad es baja.

Riesgo	S	O	RPN	S*	O*	RPN*
1. Selección incorrecta del microcontrolador.	8	4	32			
2. Imposibilidad de importar el PCB poblado a Argentina.	10	9	90	5	3	15
3. Diseño y simulación electrónica.	8	5	40	5	5	25
4. Inexistencia de lugares con bobina de Helmholtz.	10	4	40	5	4	20
5. Mal diseño de arquitectutara de software.	7.	3	21			
6. Subestimar el tiempo de simulación y algoritmos.	9	5	45	6	3	18

Se tomarán medidas de mitigación en los riesgos cuyos números de RPN sean mayores a 35.

Nota: los valores marcados con (*) en la tabla corresponden luego de haber aplicado la mitigación.

Plan de mitigación de los riesgos que originalmente excedían el RPN máximo establecido:

Riesgo 2: imposibilidad de importar el PCB poblado a Argentina.

- Severidad (S): 5.
Se acordará como país de destino Estados Unidos. Se realizarán las mediciones del PCB en el laboratorio del cliente. Esta acción implica la extensión de plazos de las tareas con código 3 y 4.
- Ocurrencia (O): 3.
El cliente posee instrumental y experiencia realizando PCB, mediciones, y uso de instrumental de laboratorio.

Riesgo 3: diseño y simulación electrónica

- Severidad (S): 5.
Se deben buscar al menos tres fabricantes de PCB y verificar cual de todos presenten la mayor cantidad de componentes posibles para realizar el poblado.
- Ocurrencia (O): 3.
En experiencias pasadas, el fabricante en general posee casi todos los componentes, salvo aquellos que son específicos de ciertas áreas de la electrónica (por ejemplo componentes de RF).

Riesgo 4: inexistencia de lugares con bobina de Helmholtz

- Severidad (S): 5.
En caso de no encontrar lugares con este tipo de facilidad, se puede desarrollar o generar una orden de compra (sujeta a restricciones de presupuesto).
- Ocurrencia (O): 4.
Los sistemas ADCS son una parte crítica de los satélites, las instalaciones con este tipo de dispositivos se encuentran fácilmente.

Riesgo 6: subestimar el tiempo de simulación y algoritmos.

- Severidad (S): 6.
Se utilizarán bibliotecas implementadas o precompiladas. La desventaja es el desconocimiento de esta y se requiere un esfuerzo adicional por comprender el funcionamiento. También se debe verificar la licencia de uso del software.
- Ocurrencia (O): 3.
En general los algoritmos son conocidos y la documentación de las bibliotecas para este tipo de sistemas suele tener información clara sobre el funcionamiento interno.

14. Gestión de la calidad

Los requerimientos 1.6 y 1.7 se utiliza el mismo método de verificación y validación.

1. Requerimientos funcionales.

1.3. El control de posición se realiza en los ejes x, y, z solidarios al CubeSat.

- Verificación: se definen diferentes posiciones para cada uno de los ejes. Luego se procede a medir la posición final de cada eje. Luego se realiza la validación midiendo la posición final de cada eje y realizando la comparación contra la seleccionada inicialmente en cada uno de los ejes.
- Validación: se acordará un conjunto de puntos en el espacio y se miden las posiciones respecto a las preacordadas. El dispositivo debe orientarse según la referencia dada por el cliente.

1.4. El error máximo en la actuación del satélite será de un 10 % respecto a la referencia elegida.

- Verificación: se elige una referencia para cada eje. Una vez finalizado el control, se procede a medir su posición final. Con ambos datos se calcula el error relativo y debe ser menor a un 10 %.
- Validación: se acuerdan con el cliente 25 referencias distintas. El dispositivo en todos los casos debe presentar un error relativo menor al 10 %.

1.6. La comunicación entre el ADCS y la computadora central será utilizando el protocolo SPI (opcional).

1.7. La comunicación con la OBC será mediante bus CAN (opcional).

- Verificación: se creará un dispositivo *mock* (dispositivo que simula la comunicación de la OBC) que tendrá la capacidad de comunicarse con el sistema y se leer valores de respuesta. Las peticiones y respuestas se guardan en un archivo para su análisis.
- Validación: se acuerda con el cliente los comandos del dispositivo y sus respuestas. Se utiliza un *mock* para generar las peticiones y guardar las respuestas. Las peticiones y respuestas se almacenan en un archivo para el cliente.

1.8. Se debe utilizar un microcontrolador de bajo consumo.

- Verificación: se medirá la potencia del dispositivo con el software final cargado. Se contrastan la potencia medida contra la potencia de la hoja de datos. Si existieran diferencias significativas (mayor a un 20 %) se procede buscar el origen de esta diferencia.
- Validación: el consumo debe ser menor a 1 W. Se mide utilizando osciloscopio y tomando muestras de la tensión y corriente de entrada.

2. Requerimientos de Test.

2.1. El algoritmo de control en C/C++ debe contrastarse contra matlab u octave, scilab, etc.

- Verificación: se generan scripts en matlab, octave o scilab. Estos scripts se contrastan contra el algoritmo desarrollado en C. El algoritmo en matlab, octave o scilab tendrá los mismos estímulos del algoritmo en lenguaje C.
- Validación: se entrega el reporte del contraste contra el algoritmo en C al cliente final en un reporte para su aprobación.

2.3. El prototipo y su versión final debe superar el ensayo en una bobina de Helmholtz de al menos dos ejes.

- Verificación: se lleva el dispositivo a ensayar a un lugar donde se realicen ensayos con bobina de Helmholtz de dos o tres ejes. Durante el ensayo se realizan mediciones sobre el dispositivo. Estas medidas se validan contra los resultados teóricos.

- Validación: se entregan los valores del dispositivo bajo ensayo al cliente para que se realicen las correcciones sobre aquellos parámetros que son necesarios.

3. Requerimientos de hardware.

3.1. La placa de circuito impreso tendrá un tamaño máximo de 10x10 cm.

- Validación: se realiza la medición del PCB con un calibre.
- Verificación: se envía el PCB al cliente para que realice la verificación del tamaño del PCB.

3.2. El conector a utilizar es el PC104 con el estándar para CubeSats.

- Verificación: se realiza la medición sobre el conector estandarizado y se contrasta contra la norma correspondiente al conector. Además se verificará que su ubicación en el PCB sea correcta.
- Validación: se envía el PCB con el conector para verificar su integración a un CubeSat.

3.3. El PCB tendrá unívocamente identificado el eje x positivo y negativo, y positivo y negativo y z positivo y negativo.

- Verificación: se contrasta contra los ejes del CubeSat con el PCB fabricado.
- Validación: se envía el PCB fabricado al cliente para que realice la inspección de los ejes.

15. Procesos de cierre

1. Análisis de seguimiento del plan original:

- Responsable: Valdez Gastón.
- Se evaluará el nivel de cumplimiento de las tareas.
- Se realizará una comparación de fechas en conjunto con el diagrama de Gantt.

2. Se dará agradecimiento a todos los interesados, en especial al equipo de trabajo, colaboradores y consultores mencionándolos en la memoria técnica.

3. Identificación de procesos útiles e inútiles:

- Responsable: Dr. Amilcar Rincón Charris.
- Detectar de los procesos, cuál de ellos puede repetirse o no en futuros desarrollos.

4. Se realizará la presentación pública del proyecto, dando paso a la defensa del mismo ante jurados.

5. Se enviarán los informes al director y a los interesados dando aviso de la finalización del proyecto.