



Sistema de control para un robot tetrápodo

Autor:

Ing. Pablo Daniel Folino

Director:

Ing. Juan Carlos Gómez (INTI,UTN.BA)

Codirector:

*Esta planificación fue realizada en el curso de Gestión de la Tecnología y la Innovación
entre el 21 de junio de 2021 y el 20 de agosto de 2021.*

Índice

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar	5
2. Identificación y análisis de los interesados	6
3. Propósito del proyecto	7
4. Alcance del proyecto	7
5. Supuestos del proyecto.	7
6. Requerimientos	8
7. Historias de usuarios (<i>Product backlog</i>).	9
8. Entregables principales del proyecto	9
9. Desglose del trabajo en tareas	10
10. Diagrama de Activity On Node.	12
11. Diagrama de Gantt	13
12. Presupuesto detallado del proyecto	15
13. Gestión de riesgos	16
14. Gestión de la calidad	18
15. Procesos de cierre	23

Registros de cambios

Revisión	Detalles de los cambios realizados	Fecha
0	Creación del documento	21 de junio de 2021
1	Se completa hasta el punto 2 inclusive	25 de junio de 2021
2	Se completa hasta el punto 7 inclusive	02 de julio de 2021
3	Se completa hasta el punto 10 inclusive	06 de julio de 2021
4	Se corrige hasta el punto 10 inclusive	29 de julio de 2021
5	Se completa hasta el punto 11 inclusive	02 de agosto de 2021
6	Se completa hasta el punto 15 inclusive	04 de agosto de 2021

Acta de constitución del proyecto

Buenos Aires, 21 de junio de 2021

Por medio de la presente se acuerda con el Ing. Ing. Pablo Daniel Folino que su Trabajo Final de la Maestría en Sistemas Embebidos se titulará “Sistema de control para un robot tetrápodo”, consistirá esencialmente en la implementación de un prototipo de un sistema de control de movimientos para un robot tetrápodo de tres grados de libertad en cada extremo, y tendrá un presupuesto preliminar estimado de 600 hs de trabajo y \$285.472, con fecha de inicio 21 de junio de 2021 y fecha de presentación pública 22 de agosto de 2022.

Se adjunta a esta acta la planificación inicial.

Ariel Lutenberg
Director posgrado FIUBA

Ing. Claudio Verrastro
UTN-FRBA-GIAR

Ing. Juan Carlos Gómez
Director del Trabajo Final

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar

El objetivo es diseñar el hardware y firmware para controlar los movimientos de un robot tetrápodo de tres grados de libertad por cada extremo. El cerebro del sistema será una placa de desarrollo a definir, que recibirá la información de los distintos sensores y controlará los actuadores. La placa recibirá información de comunicación por un módulo Wi-Fi (del tipo ESP8266). Esta placa de desarrollo, tendrá la suficiente potencia de procesamiento como para manejar la comunicación, todos los sensores y actuadores para el normal funcionamiento del robot.

En las articulaciones se utilizarán servomotores controlados por modulación de ancho de pulso(PWM-*Pulse-width modulation*).

El sistema (hardware-software) tiene que ser robusto para que permita realizar las distintas pruebas a las que se va a someter.

Uno de los principales problemas de los robots caminantes es su estabilidad, para ello se utilizara un módulo acelerómetro. Otro de los problemas es el consumo de los servomotores, por lo qué el sistema medirá la corriente de cada articulación.

La generación y control de la locomoción en robots caminantes requiere de un esfuerzo computacional alto, tanto en el diseño como en la implementación. Es necesario coordinar los movimientos y trayectorias de todas las articulaciones de las extremidades del robot; lo cual resulta especialmente complicado cuando el número de extremidades aumenta, para ello se aplicarán algoritmos de Aprendizaje por Refuerzo (AR).

Antes de realizar la construcción física del prototipo se procederá a la simulación en un equipo informático, para tratar de evitar posibles problemas tanto en la construcción, como en el algoritmo de control empleado. El robot estará diseñado para moverse en espacios interiores (*indoor*), en condiciones de temperaturas estándares entre 5 °C y 40 °C, y humedad relativa normales(entre 40 % y 70 %). También se minimizará la cantidad de piezas par que el sistema sea de bajo costo.

El formato del robot será aproximadamente como lo muestra la Figura 1.

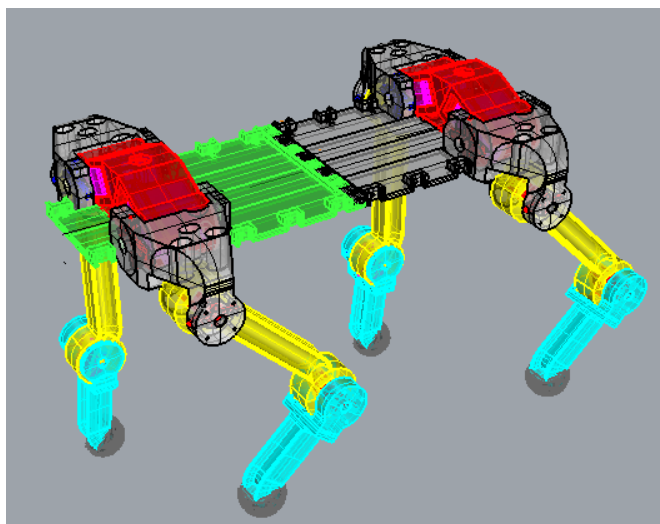


Figura 1. Formato del robot propuesto.

En la Figura 2 se observan las relaciones entre los distintos componentes del sistema.

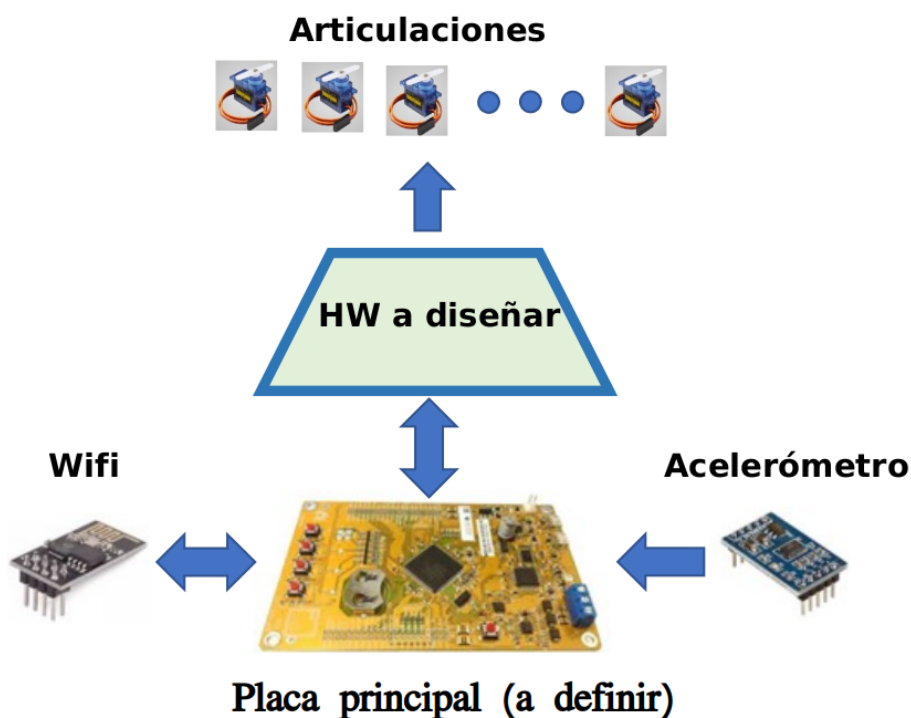


Figura 2. Módulos de hardware del robot propuesto.

2. Identificación y análisis de los interesados

En esta plataforma se aplicarán algoritmos de Aprendizaje por Refuerzo (AR), se utilizara para formar recursos humanos dentro del Grupo de Inteligencia Artificial y Robótica (GIAR). Una vez afianzada la técnica, se realizará la transferencia de lo aprendido a los distintos clientes que posee el grupo de investigación, como materias afines de las distintas carreras de grado de la Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Buenos Aires.

Rol	Nombre y Apellido	Organización	Puesto
Cliente	Ing. Claudio Verrastro	UTN-FRBA-GIAR	-
Impulsor	Lic. Patricia Cibeira	UTN-FRBA-GIAR	Secretario de SeCyT
Responsable	Ing. Pablo Daniel Folino	FIUBA	Alumno
Colaboradores	Miembros del GIAR	UTN-FRBA	-
Orientador	Ing. Juan Carlos Gómez	INTI,UTN.BA	Director trabajo final
Opositores	Otros Grupos Invest.	UTN-FRBA	-
Usuario final	Alumnos de materia -IA	UTN-FRBA-GIAR	-

- Orientador: Ing. Juan Carlos Gómez, posee mucha experiencia en el tema debido a su trabajo, y formación profesional, pero no posee mucho tiempo.
- Cliente: posee muchas restricciones con respecto a los costos.

3. Propósito del proyecto

El propósito del proyecto es diseñar el hardware y el firmware de un controlador de movimientos para un robot tetrápodo de tres grados de libertad en cada extremo, y aplicar los conocimientos en materias de inteligencia artificial dictadas en la UTN-FRBA.

4. Alcance del proyecto

El objetivo del proyecto comprende:

- Diseñar y armar el prototipo del hardware del robot tetrápodo.
- Diseñar e implementar en la placa principal el software embebido de A.R.
- Diseñar comandos para cambiar el modo de funcionamiento desde línea de comandos, desde una PC.
- Realizar el proyecto dentro del tiempo destinado al mismo.

El proyecto no incluye:

- Realizar pruebas de estructuras de hardware, para saber la vida útil del sistema.
- Diseñar una interface gráfica amigable para cambiar los distintos modos de funcionamiento.
- Diseñar y/o armar el cargador de baterías.
- El diseño del módulo de alimentación se lo dejará para un estado posterior a este proyecto, como así también las pruebas de autonomía.

El objetivo del proyecto comprende:

5. Supuestos del proyecto

Se supone para el siguiente proyecto que:

- se posee el presupuesto para comprar todo lo relacionado con el hardware necesario para construir el robot.
- se contará con acceso a todo el equipamiento para la construcción y testeo de los distintos elementos electrónicos.
- la complejidad de la programación se restringirá en función de las horas de trabajo propuestas para hacer este proyecto.
- se podrá conseguir los distintos elementos electrónicos en este contexto de pandemia.

6. Requerimientos

1. Requerimientos de funcionamiento general

- 1.1. El robot debe alimentarse mediante un sistema que le permita tener la posibilidad de desplazarse sin problemas.
- 1.2. Se debe comunicar en forma inalámbrica y mediante el puerto USB de la placa principal.
- 1.3. El robot debe ser lo suficiente ligero para que los servomotores puedan mover las articulaciones.

2. Grupo de requerimientos asociados con el hardware

- 2.1. El hardware debe ser fácilmente replicable utilizando una impresora 3D.
- 2.2. Debe poseer la menor cantidad de piezas posibles, no mayor a cuarenta.
- 2.3. El cuerpo del robot debe albergar todo el hardware (motores, placa principal, drivers de motores, , etc.) necesario para el funcionamiento normal.
- 2.4. Debe poseer un botón de parada de emergencia de fácil acceso, para interrumpir el funcionamiento del robot en caso de urgencia.

3. Grupo de requerimientos asociados con el software

- 3.1. Se programará usando Lenguaje C, utilizando el modelo de capas.
- 3.2. La herramienta de programación en Lenguaje C deberá poseer un modo DEBUG.
- 3.3. El uso de memoria no debe exceder a la placa principal.

4. Requerimientos no funcionales

- 4.1. La estructura del robot no debe tener bordes filosos ni punzantes, que puedan ocasionar lesiones.
- 4.2. La velocidad que desarrolla el robot debe ser inferior a 1 m/seg.

5. Requerimientos documentación

- 5.1. Redactar el manual de uso.
- 5.2. Redactar un documento en donde se registre el código fuente.
- 5.3. Redactar un documento técnico que figuren los circuitos esquemáticos, y el armado de la plataforma.

7. Historias de usuarios (*Product backlog*)

Criterio: a mayor valor de prioridad, la historia de usuario es más importante. Para el grado de ponderación se toma el criterio horas-hombre (valor de esfuerzo) que supone la implementación de la historia de usuario.

- Historia de usuario 1: Como docente quiero que el robot se pueda conectar a una red local, para poder controlarlo desde una posición remota.
 - Prioridad : 1
 - Ponderación : 5
- Historia de usuario 2: Como alumno quiero poder cambiar los distintos algoritmos de control, para poder sintonizar los movimientos de la plataforma móvil.
 - Prioridad : 2
 - Ponderación : 5
- Historia de usuario 3: Como alumno quiero tener una aplicación gráfica en un dispositivo móvil, para poder manejar los movimientos del robot mediante *Wi-Fi* o el puerto USB.
 - Prioridad : 3
 - Ponderación : 7
- Historia de usuario 4: Como ayudante de laboratorio encargado del robot quiero que se pueda reparar rápidamente, para no perder tiempo.
 - Prioridad : 4
 - Ponderación : 3
- Historia de usuario 5: Como docente quiero tener la posibilidad de contar con una fuente de energía a baterías para poder usar el robot en cualquier ambiente.
 - Prioridad : 5
 - Ponderación : 1

8. Entregables principales del proyecto

Al final del proyecto se entregará:

- Prototipo del robot.
- Manual de uso.
- Diagrama esquemático.
- Código fuente.
- Diagrama de instalación.
- Informe final..

9. Desglose del trabajo en tareas

1. Planificación de tareas. (40 hs)
 - 1.1. Generación del documento de planificación del proyecto. (30 hs)
 - 1.2. Aprobación y revisión del documento de planificación del proyecto. (10 hs)
2. Investigación preliminar del hardware a utilizar. (38 hs)
 - 2.1. Fabricación del robot. (20 hs)
 - 2.2. Placas electrónicas(placa principal, microcontrolador, drivers, etc). (10 hs)
 - 2.3. Características de los motores. (4 hs)
 - 2.4. Características de las fuente de alimentación. (4 hs)
3. Selección y compra de los materiales del hardware. (8 hs)
 - 3.1. Selección de los componentes. (5 hs)
 - 3.2. Compra y adquisición.(3 hs)
4. Armado y verificación de la estructura del robot. (43 hs)
 - 4.1. Construcción de las piezas. (30 hs)
 - 4.2. Ensamblaje de piezas. (3 hs)
 - 4.3. Verificación de la estructura. (10 hs)
5. Armado y verificación de la electrónica del robot. (10 hs)
 - 5.1. Armado de la placa adaptadora entre la placa principal y los distintos módulos. (5 hs)
 - 5.2. Cableado del robot. (2 hs)
 - 5.3. Verificación de la electrónica. (3 hs)
6. Integración del hardware. (6 hs)
7. Desarrollo del software (189hs)
 - 7.1. Módulo PWM. (25 hs)
 - 7.2. Módulo Wi-Fi y protocolo de comunicaciones. (44 hs)
 - 7.3. Módulo acelerómetro. (25 hs)
 - 7.4. Módulo de aprendizaje por refuerzo. (40 hs)
 - 7.5. Módulo manual. (25 hs)
 - 7.6. Integración de los distintos módulos. (30 hs)
8. Verificación del software(*Testing*). (75 hs)
 - 8.1. Diseño de pruebas de ensayo de los distintos módulos. (25 hs)
 - 8.2. Diseño de las distintas pruebas de navegación. (30 hs)
 - 8.3. Comparación de las distintas estrategias de navegación. (20 hs)
9. Validación del sistema completo. (40 hs)
 - 9.1. Ensayos de verificación del cliente en forma parcial. (20 hs)

9.2. Ensayos de validación final. (20 hs)

10. Presentación del trabajo. (151 hs)

10.1. Redacción de informes de avance. (10 hs)

10.2. Redacción de manual de uso. (20 hs)

10.3. Elaboración de circuitos esquemáticos. (20 hs)

10.4. Redacción de memoria del proyecto. (80 hs)

10.5. Preparación de la presentación pública del trabajo final. (20 hs)

10.6. Presentación pública del trabajo final. (1 h)

Cantidad total de horas: (600 hs)

10. Diagrama de Activity On Node

En la figura 3, se observa el camino crítico en color rojo. La unidad de tiempo definida en cada tarea es en hora.

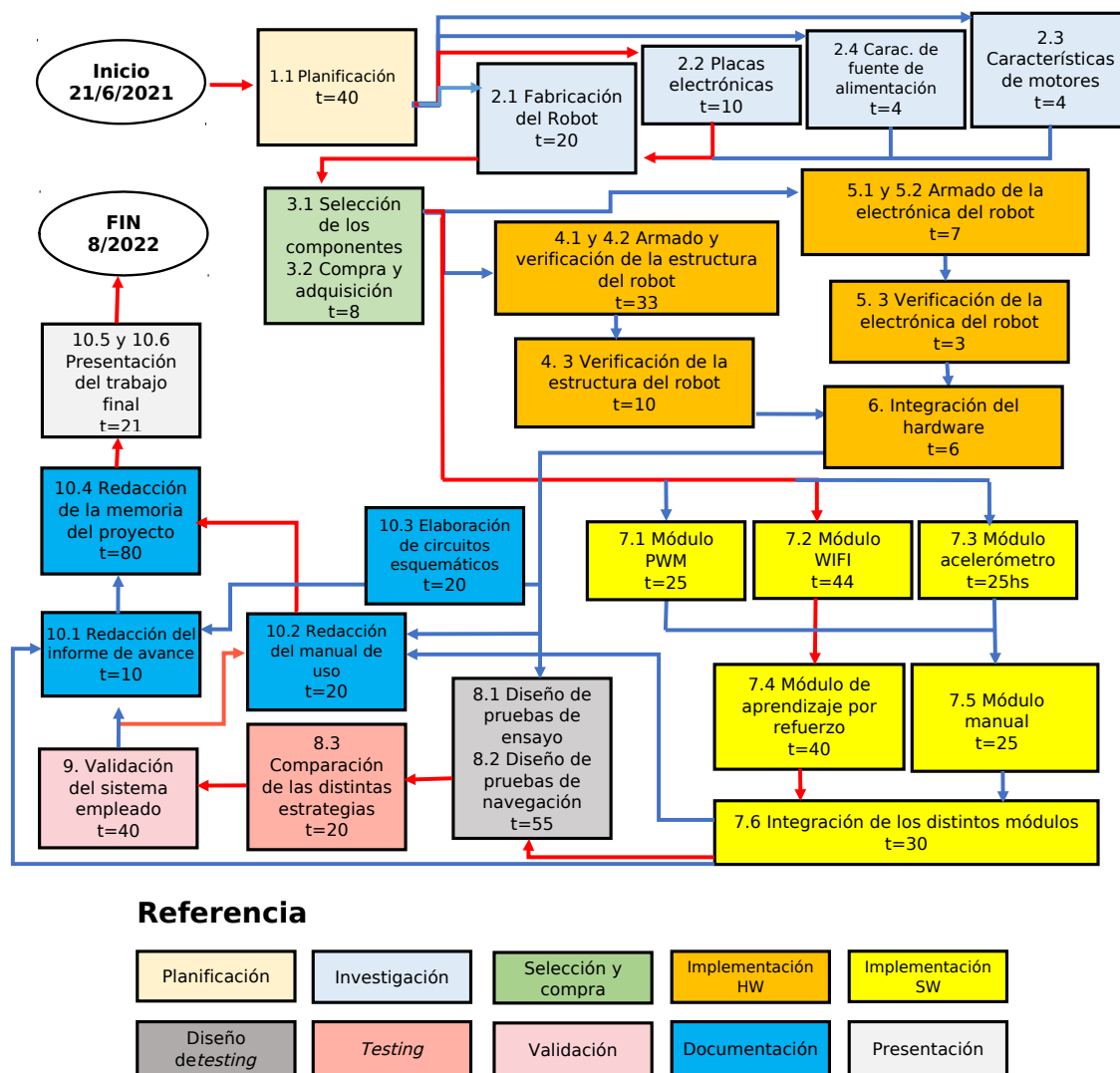


Figura 3. Diagrama de *Activity on Node*

11. Diagrama de Gantt

Los datos de la tabla 1 y de la figura 4 se obtuvieron de un software de gestión de proyectos teniendo en cuenta los días no laborables (feriados y vacaciones), y con una dedicación semanal de 10 horas reloj.

Tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Anterior
1	Inicio	0 días	21/06/21	21/06/21	
2	1. Planificación de tareas	20 días	21/06/21	16/07/21	
3	1.1 Generación de documento	30 horas	21/06/21	09/07/21	1
4	1.2 Aprobación y revisión	10 horas	12/07/21	16/07/21	3
5	2. Investigación preliminar del hardware	19 días	26/07/21	27/08/21	
6	2.1 Fabricación del Robot	20 horas	13/08/21	27/08/21	4,9,8,7
7	2.2 Placas electrónicas	10 horas	26/07/21	06/08/21	4
8	2.3 Características de motores	4 horas	09/08/21	10/08/21	7
9	2.4 Características de baterías	4 horas	11/08/21	12/08/21	8
10	3. Selección y compra de los materiales	4 días	30/08/21	02/09/21	
11	3.1 Selección de los componentes	5 horas	30/8/21	01/09/21	5
12	3.2 Compra y adquisición	3 horas	01/09/21	02/09/21	11
13	4. Armado y verificación de la estructura del robot	14 días	03/09/21	22/09/21	
14	4.1 Construcción de las piezas	15 horas	03/09/21	14/09/21	10
15	4.2 Ensamblaje de las piezas	3 horas	14/09/21	15/09/21	14
16	4.3 Verificación de la estructura	10 horas	16/09/21	mié 22/09/21	15
17	5. Armado y verificación de la electrónica del robot	5 días	03/09/21	09/09/21	
18	5.1 Armado de la placa principal	5 horas	03/9/21	07/09/21	10
19	5.2 Cableado del robot	2 horas	07/09/21	08/09/21	18
20	5.3 Verificación de la electrónica	3 horas	08/09/21	09/09/21	19
21	6. Integración del hardware	2 horas	23/09/21	23/09/21	13,17
22	7. Desarrollo del software	55 días	03/09/21	23/09/21	
23	7.1 Módulo PWM	25 horas	03/09/21	21/09/21	10
24	7.2 Módulo Wi-Fi	40 horas	03/09/21	30/09/21	10
25	7.3 Módulo acelerómetro	25 horas	03/09/21	21/09/21	10
26	7.4 Módulo de aprendizaje por refuerzo	40 horas	01/10/21	01/11/21	23,24,25
27	7.5 Módulo manual	25 horas	01/10/21	jue 21/10/21	23,24,25
28	7.6 Integración de los distintos módulos	30 horas	02/11/21	23/11/21	26,27
29	8. Verificación del software	37,5 días	24/11/21	16/02/22	
30	8.1 Diseño de pruebas de ensayo	25 horas	24/11/21	10/12/21	21,28
31	8.2 Diseño de pruebas de navegación	30 horas	mar 10/12/22	01/02/22	30
32	8.3 Comparación de las distintas estrategias.	20 horas	01/02/22	16/02/22	31
33	9. Validación del sistema empleado	20 días	16/02/22	18/03/22	
34	9.1 Ensayos de verificación del cliente parcial	20 horas	16/2/22	04/03/22	32
35	9.2 Ensayos de validación final	20 horas	04/03/22	18/03/22	34
36	10. Presentación del trabajo final	158 días	24/09/21	16/06/22	
37	10.1 Redacción del informe de avance	10 horas	18/03/22	28/03/22	28,33,39
38	10.2 Redacción del manual de uso	20 horas	18/03/22	04/04/22	21,28,35
39	10.3 Elaboración de los circuitos esquemáticos	20 horas	24/09/22	07/10/21	21
40	10.4 Redacción de la memoria del proyecto	80 horas	04/04/22	02/06/22	37,38
41	10.5 Preparación de la presentación pública	20 horas	02/06/22	16/06/22	40
42	10.6 Presentación pública	1 hora	16/06/22	16/06/22	41
43	Fin	0 días	16/06/22	16/06/22	

Cuadro 1. Inicio y fin de cada tarea

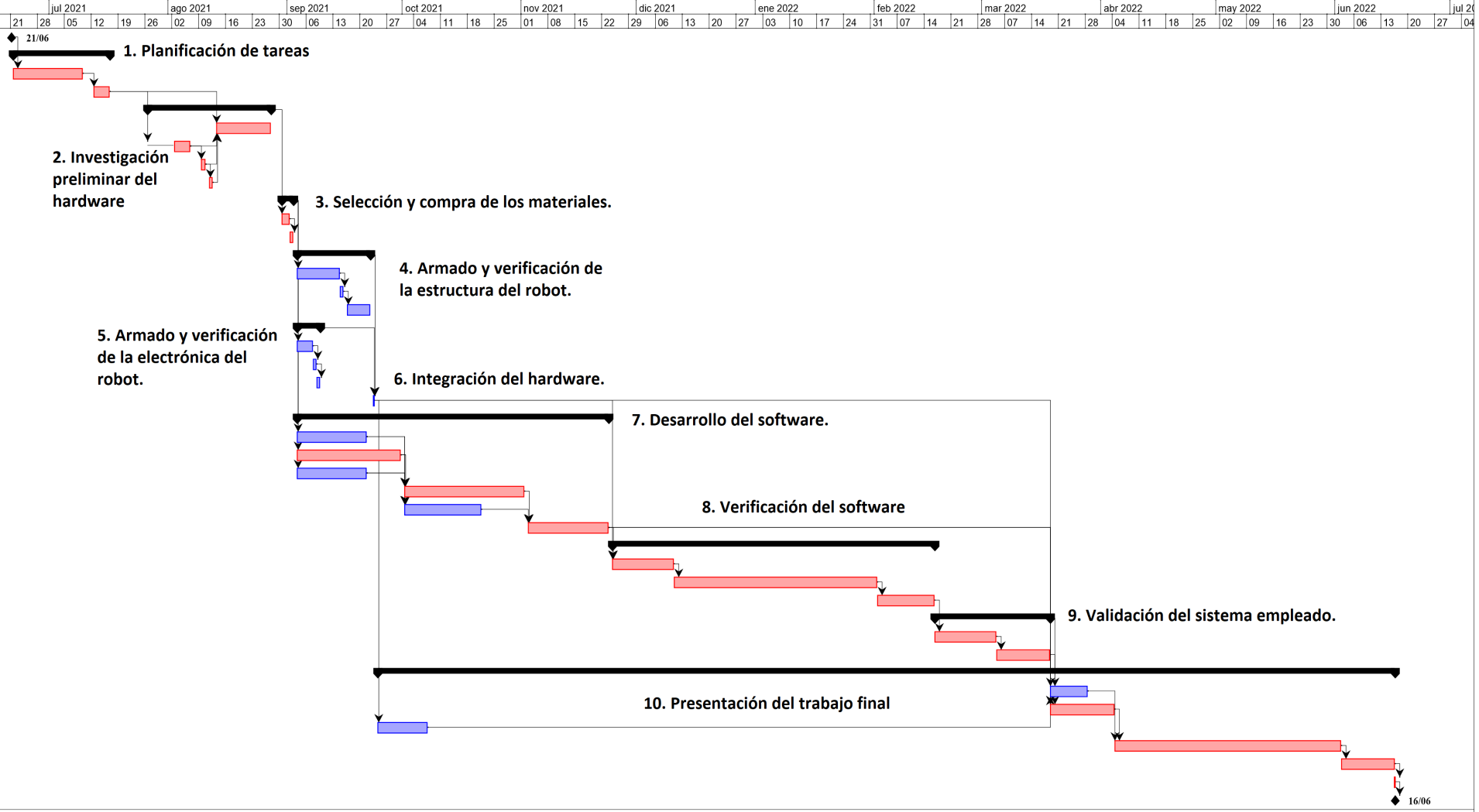


Figura 4. Diagrama de *Gantt*

12. Presupuesto detallado del proyecto

COSTOS DIRECTOS [\$]				
Descripción		Cantidad	Valor unitario	Valor total
Materiales	Driver doble puente H (L298)	6	550	3.300
	Sermomotores de 5v tipo Futaba S3003	4	700	2.800
	Sermomotores de 5v tipo Sg90	8	310	2.480
	Placa principal(Beaglebone o similar)	1	12.000	12.000
	Porta baterías (4 pilas AA)	1	1	290
	Baterias de Li-ion 3,7v 7800 mah	4	400	1.600
	Pulsador NA	1	100	100
	Placa Wi-Fi(ESP1 8266)	1	800	800
	Placa acelerómetro (Mpu-9250)	1	1.500	1.500
	Cables varios	1	1	500
	Conectores varios	1	1	800
	Placa experimental 20x20 cm	1	400	400
	Estaño 60/40 0,8mm 3m	1	250	250
	Filamento 1,75 mm (PLA)	1	1.600	1.600
Mano de obra				150.000
SUBTOTAL				178.420
COSTOS INDIRECTOS [\$]				
Descripción				Valor total
30 % de los costos directos				53.526
SUBTOTAL [\$]				53.526
TOTAL [\$]				285.472

Cuadro 2. Presupuesto

Aclaración: el presupuesto de la tabla 2 se realizó con fecha 03/08/2021 en pesos argentinos (\$). La cotización es de \$175 por dólar estadounidense (u\$s). El costo total es \$285.472 o su equivalente en u\$s1.632.

13. Gestión de riesgos

a) Identificación de los riesgos:

Nro.	Descripción del riesgo	Severidad Ocurrencia	Valor	Justificación
1	Pérdida/Destrucción del kit de desarrollo	Severidad	10	El daño en el kit de desarrollo modifica en numerosas etapas del desarrollo de este proyecto. Como por ejemplo no poder probar el software, no terminar de construir el prototipo, etc.
		Ocurrencia	5	La posibilidad de que suceda es moderada, ya que el kit se montará en una plataforma móvil.
2	Destrucción del driver de motor (L298)	Severidad	7	El daño en el driver atrasaría algunas tareas, pero otras podrían continuar.
		Ocurrencia	6	Si el motor se bloquea, por el driver puede circular mucha corriente y se puede quemar.
3	Falta de tiempo para adquirir los conocimientos para implementar el software de AR.	Severidad	6	El algoritmo se está probando en otra plataforma pero de características muy distintas.
		Ocurrencia	3	La probabilidad es baja, ya que se puede adaptar distintos niveles de complejidad.
4	Daños en la impresora 3D.	Severidad	6	Se usa para fabricar las piezas del robot en un etapa temprana el proyecto.
		Ocurrencia	7	La probabilidad es alta, ya que su funcionamiento depende de muchos factores (que los inyectores no se tapen, que las tensiones de las correas sean las correctas, que no se quemen los drivers de los motores, que el firmware no se dañe, etc).
5	Capacidad o potencia del pack de batería insuficiente para cumplir con los requerimientos planteados	Severidad	6	Se usan baterías Li-ion, algunos consumos pueden ser vitales para el éxito del proyecto.
		Ocurrencia	7	La probabilidad es alta, no se tiene experiencia en el manejo de este tipo de batería.
6	Daño en la computadora que se usa para programar y documentar el proyecto.	Severidad	7	Se usa para el diseño de las piezas del robot, programar los algoritmos en la placa principal, y la documentación del proyecto.
		Ocurrencia	5	No es una computadora moderna, su probabilidad de falla es moderada.

Cuadro 3. Gestión de riesgos

La “severidad” y la “probabilidad de ocurrencia” se califican de 1 a 10, siendo el número más alto correspondiente a la mayor severidad o la mayor probabilidad.

b) Tabla de gestión de riesgos: (El RPN se calcula como $\%RPN = S \times O$)

Nº de Riesgo	S	O	RPN	S*	O*	RPN*
1	10	5	50	5	5	25
2	7	6	42	3	5	15
3	6	3	18			
4	6	7	42	6	3	18
5	6	7	42	3	5	15
6	7	5	35			

Cuadro 4. RPN

Criterio adoptado: se tomarán medidas de mitigación de los riesgos cuyos RPN sean mayores a 40.

Aclaración: en la tabla 4 los valores marcados con (*) corresponden luego de haber aplicado el plan de mitigación de riesgos.

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

- Riesgo 1: Pérdida/Destrucción del kit de desarrollo. Medidas de mitigación: Para minimizar este riesgo se prevee una partida presupuestaria para comprar otra placa en caso de que sea necesario. Se habla con el proveedor y asegura tener *stock* para los próximos meses y un plazo de entrega no mayor a 24 horas.
 - Severidad(S): 5 Disminuye la severidad, algunas tareas pueden tener un retraso no significativo.
 - Probabilidad de ocurrencia(O): 5 La probabilidad de ocurrencia no cambia debido al escaso conocimiento de la placa principal.
- Riesgo 2: Falta de tiempo para adquirir los conocimientos para implementar el software de AR. Medidas de mitigación: El firmware de la placa en un primer prototipo puede salir con una versión acotada, al proyecto estaría aprobado por el cliente con el módulo del PID clásico y una de las técnicas de aprendizaje por refuerzo. Se puede recurrir al asesoramiento de expertos en el tema.
 - Severidad(S): 3 La severidad disminuye considerablemente, se tiene la posibilidad de tener otras fuentes de información.
 - Probabilidad de ocurrencia(O): 5 Probabilidad de ocurrencia media, hay que ver la disponibilidad de los horarios de los expertos en el tema para ver si pueden atender nuestras consultas.
- Riesgo 4: Daños en la impresora 3D. Medidas de mitigación: Se debe tener en *stock* los repuestos necesarios para reemplazar en caso de ser necesarios. Los repuestos como la boquilla fusora, y las correas dentadas no son caras y se consiguen en el mercado.
 - Severidad(S): 6 La severidad no cambia, la impresión de las piezas es un punto crítico.
 - Probabilidad de ocurrencia(O): 3 Disminuye considerablemente, ya que al tener los repuestos se puede prevenir que no deje de funcionar. Hay algunos repuestos como la placa de control que son difíciles de conseguir, en tal caso hay que recurrir a otro tipo de estrategia de mitigación

- Riesgo 5: Capacidad o potencia del pack de batería insuficiente para cumplir con los requerimientos planteados. Medidas de mitigación: Se debe diseñar el pack de batería para tener la posibilidad o de ampliar la capacidad de *mAh* de las baterías de *Li-ion*, o cambiarlas por otra tecnología como de *NiCd* o *NiMH*. Por tal motivo en el diseño se adoptó el uso de baterías de formato AA o tipo 14500.
 - Severidad(S): 3 Disminuye considerablemente al tener varias alternativas.
 - Probabilidad de ocurrencia(O): 5 La probabilidad de ocurrencia es media, ya que de algunas baterías se carece del conocimiento de funcionamiento detallado.

14. Gestión de la calidad

1. Requerimientos de funcionamiento general.

- Req #1.1: El robot debe alimentarse mediante un sistema que le permita tener la posibilidad de desplazarse sin problemas.
 - Verificación y validación:
 - Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Se verifican los consumos de todas las placas del sistema mediante las hojas de datos y mediciones empíricas. Se hacen los cálculos de consumos y se registra la autonomía del robot en condiciones normales de funcionamiento. Con la batería al 100 % de carga, se hace mover al robot en por lo menos en dos direcciones en una circunferencia de 1 metro de diámetro.
 - Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
Con la batería completa se hará mover al robot en tres distancias sugeridas por el cliente de no más de 1 metro de largo, para validar este requerimiento.
- Req #1.2: Se debe comunicar en forma inalámbrica.
 - Verificación y validación:
 - Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Se verificarán las hojas de datos del módulo inalámbrico, distancia de comunicación, velocidad de comunicación, potencia de transmisión, etc. Se verificará con el depurador de programa (*debugger*) que al mandar tramas no válidas o con errores de secuencia, el robot no las ejecute.
 - Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
Mediante una prueba empírica se le envía comandos de movimiento al robot (hacia adelante, hacia atrás, giro a la derecha e izquierda), para demostrar que la plataforma móvil responde.

- Req #1.3: El robot debe ser lo suficiente ligero para que los servomotores puedan mover las articulaciones.
 - Verificación y validación:
 - Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Se realiza los cálculos de torque de cada servomotor, con las peores condiciones de peso.
 - Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
Se hacen mover cada articulación en un ángulo de más o menos 45° de su posición de reposo, verificando mediante mediciones el cumplimiento de cada una de ellas.

2. Grupo de requerimientos asociados con el hardware.

- Req #2.1: El hardware debe ser fácilmente replicable utilizando una impresora 3D.
 - Verificación y validación:
 - Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Se verifican que todos los elementos estructurales del robot puedan realizarse por una impresora 3D con un solo extrusor, eso significa que no se necesite por ejemplo de material de soporte especiales, que las dimensiones sean menores que una cama de impresión estándar (20x20 cm), que el filamento sea fácil de conseguir (PLA o ABS), etc.
 - Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
Se muestran los planos de donde se obtuvieron las impresiones de los componentes que conforman la plataforma.
- Req #2.2: Debe poseer la menor cantidad de piezas posibles, no mayor a cuarenta. utilizando una impresora 3D.
 - Verificación y validación:
 - Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Se hace un listado detallado de todos los componentes estructurales del hardware y se verifican que la cantidad sea menor a la del requerimiento.
 - Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
Se muestra al cliente el listado detallado elaborado en la prueba de verificación.
- Req #2.3: El cuerpo del robot debe albergar todo el hardware (motores, placa EDU-CIAA, drivers de motores, baterías, etc.) necesario para el funcionamiento normal.
 - Verificación y validación:
 - Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Mediante planos se verifica que todos los elementos estructurales del robot, las distintas placas, los motores, y sensores se encuentran autocontenidos.

- Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
Se demuestra al cliente empíricamente se cumple este requisito.
- Req #2.4: Debe poseer un botón de parada de emergencia de fácil acceso, para interrumpir el funcionamiento del robot en caso de urgencia.
 - Verificación y validación:
 - Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Se depura el programa y verifica que sin importar en que secuencia de programa se encuentre el software, al pulsar el botón se invoca la rutina de parada.
 - Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
Se hace funcionar al robot en una trayectoria circular, y se verifica que cuando se presiona el botón de parada cumple este requerimiento.

3. Grupo de requerimientos asociados con el software.

- Req #3.1: Se programará usando Lenguaje C, utilizando el modelo de capas.
 - Verificación y validación:
 - Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Se analizarán las hojas de datos de la placa principal y se verificará que usando un ambiente de programación en Lenguaje C se pueda programar la placa. Se controlará que todo el código fuente utilizado para programar al producto final esté escrito en Lenguaje C y con llamadas a las sAPI. Se generará un documento en donde se registren todas las rutinas que conforman el proyecto.
 - Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
Se presentará el informe del listado del código fuente con las rutinas que conforman el proyecto.
- Req #3.2: La herramienta de programación en Lenguaje C deberá poseer un modo DEBUG.
 - Verificación y validación:
 - Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Se verificará de las hojas de datos de la placa de desarrollo que posea un puerto serie extra, o algún otro método que permita tener información de depuración.
 - Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
Se configurará el prototipo para que envíe información de depuración a través de algún medio de comunicación con el cliente.
- Req #3.3: El uso de memoria no debe exceder a la placa principal.

- Verificación y validación:

- Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Se analizará las hojas de datos de la placa de control y de su microprocesador para que con el código generado en el proyecto cumpla con este requerimiento.
- Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
Se compilará y un programa de prueba en la placa de desarrollo para validar el requerimiento.

4. Requerimientos no funcionales

- Req #4.1: La estructura del robot no debe tener bordes filosos ni punzantes, que puedan ocasionar lesiones.

- Verificación y validación:

- Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Se verificará con los planos estructurales de las piezas del robot, que todos los bordes externos si terminan en una arista, no sean ángulos inferiores a 90 grados, o que sean redondeados con un diámetro mayor a 0,5 mm. Se generará un informe detallando.
- Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
Se presentará el informe generado en la validación, constatando físicamente las terminaciones de los bordes externos del robot.

- Req #4.2: La velocidad que desarrolla el robot debe ser inferior a 1 m/seg.

- Verificación y validación:

- Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Con las hojas de datos de los servomotores, calculando la máxima elongación de cada articulación y el tiempo de respuesta, se calcula la velocidad máxima. La velocidad debe ser menor a la del requerimiento.
- Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
Se medirá la velocidad que alcanza el robot a máxima carga de batería con un método indirecto. Se pondrán a 5 metros de distancia en línea recta dos marcas en un piso plano y liso. El robot se pondrá en posición de reposo a un metro atrás de la primera marca y se acelerará logrando tener la mayor zancada de paso en cada extremidad en el menor tiempo posible. Se medirá el tiempo en que tarda en cruzar las dos marcas, calculando así su velocidad máxima.

5. Requerimientos de documentación

- Req #5.1: Redactar manual de uso.
 - Verificación y validación:
 - Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Se irá controlando la generación parcial de este documento técnico.
 - Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
El director del proyecto validará este documento.
- Req #5.2: Redactar un documento en donde se registre el código fuente.
 - Verificación y validación:
 - Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Se irá controlando la generación parcial de documentación técnica, para que sirva de referencia para la posterior escritura de la memoria.
 - Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
El director y los jurados leerán esta información en la memoria técnica y la validarán.
- Req #5.3: Redactar un documento técnico que figuren los circuitos esquemáticos, y el armado de la plataforma.
 - Verificación y validación:
 - Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente:
Se irá controlando la generación parcial de documentación técnica, para que sirva de referencia para la posterior escritura de la memoria.
 - Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido:
El director y los jurados leerán esta información en la memoria técnica y la validarán.

15. Procesos de cierre

Establecer las pautas de trabajo para realizar una reunión final de evaluación del proyecto, tal que contemple las siguientes actividades:

- Pautas de trabajo que se seguirán para analizar si se respetó el plan de proyecto original:
Encargado: Pablo Daniel Folino
 - Se evaluarán los requerimientos y los objetivos alcanzados frente a los planteados en el plan original.
 - Se pondrá especial interés en si se cumplieron los lineamientos en cuanto a tiempos de entrega y ejecución.
- Identificación de las técnicas y procedimientos útiles e inútiles que se utilizaron, y los problemas que surgieron y cómo se solucionaron:
Encargado: Pablo Daniel Folino
 - Se establecerá cual fue la mejor combinación de algoritmos de aprendizaje por refuerzo que llevaron mejor la tarea.
 - Se identificarán el uso de nuevas herramientas o procedimientos en caso de corresponder.
- Indicar quién organizará el acto de agradecimiento a todos los interesados, y en especial al equipo de trabajo y colaboradores:
Encargado: Pablo Daniel Folino
 - Luego de la presentación del proyecto mediante la defensa pública, se procederá a agradecer a todas las personas que participaron del desarrollo del proyecto, al director del proyecto, a los compañeros y a las autoridades de la MSE.