



# Aplicación de un sistema de control interno para motores brushless trifásicos

Autor:

Fernando Nicolas Calvet

Director:

Agustín Antonio Rey (pertenencia)

Codirector:

Patricio BOS (FIUBA)

*Esta planificación fue realizada en el curso de Gestión de proyectos entre el 22 de Agosto de 2023 y el 10 de Octubre de 2023.*

## 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 . . . . .	10
9. Desglose del trabajo en tareas . . . . .	10
10. Diagrama de Activity On Node. . . . .	11
11. Diagrama de Gantt . . . . .	11
12. Presupuesto detallado del proyecto . . . . .	14
13. Gestión de riesgos . . . . .	14
14. Gestión de la calidad . . . . .	15
15. Procesos de cierre . . . . .	16

## Registros de cambios

Revisión	Detalles de los cambios realizados	Fecha
0	Creación del documento	22 de Agosto de 2023
1	Se completa hasta el punto 4 inclusive	05 de Septiembre de 2023
2	Se completa hasta el punto 9 inclusive Se cambia el titulo	14 de Septiembre de 2023

## Acta de constitución del proyecto

Buenos Aires, 22 de Agosto de 2023

Por medio de la presente se acuerda con el Ing. Fernando Nicolas Calvet que su Trabajo Final de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos se titulará “Aplicación de un sistema de control interno para motores brushless trifásicos”, consistirá esencialmente en diseñar e implementar un sistema de control para motores trifásicos sin escobillas y sin sensor hall que permita alcanzar una velocidad de rotación de 100.000 rpm. Para ello, se utilizará un algoritmo de control vectorial basado en la estimación del ángulo eléctrico del rotor mediante un observador de estados, y tendrá un presupuesto preliminar estimado de 600 h de trabajo y USD4000, con fecha de inicio 22 de Agosto de 2023 y fecha de presentación pública 10 de Octubre de 2024.

Se adjunta a esta acta la planificación inicial.

Dr. Ing. Ariel Lutenberg  
Director posgrado FIUBA

-  
GA.MA Italy

Agustín Antonio Rey  
Director del Trabajo Final

## 1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar

El propósito de este proyecto es diseñar un sistema de control para motores trifásicos sin escobillas y sin sensor hall aplicando los algoritmos de control necesarios para su correcto funcionamiento y demostrar su performance montándolo dentro de un secador de pelo orientado al mercado profesional. Además se prevé que incorpore el control de potencia de la resistencia calefactora con su correspondiente realimentación y una interfaz de usuario sencilla.

En la actualidad los secadores de pelo se fabrican con básicamente tres tipos de motores:

- Motor DC
- Motor Universal
- Motor sin escobillas

El más implementado de todos es el motor universal al ser, por el momento, el más equilibrado en relación precio/prestaciones. Esto se debe mayormente a su facilidad constructiva y a que no es necesario control externo para su funcionamiento. Sin embargo, la evolución en los procesos de manufactura, caída de precio en imanes permanentes y procesamiento hace cada día más viable la utilización de motores BLDC (brushless DC, motor CC sin escobillas).

En la industria de los secadores de pelo se está produciendo una revolución silenciosa. Los modelos más avanzados, diseñados para uso profesional, cuentan con motores BLDC, que giran a una velocidad de hasta 100.000 rpm, seis veces más rápido que los motores convencionales. Este aumento de velocidad permite secar el cabello más rápido y con mayor precisión, sin dañarlo. A su vez dimensionalmente este cambio se traduce en pasar de 70 mm de diámetro al orden de los 30 mm (la mitad de tamaño).

Ga.Ma Italy es líder mundial en el diseño, desarrollo y fabricación de productos para el cuidado del cabello. Es por esto que la empresa ya comercializa secadores de pelo con esta tecnología para no perder mercado, pero su desarrollo fue adquirido a un tercero. Esto trajo aparejado una serie de problemas, desde la pérdida de agilidad en el lanzamiento de nuevos productos hasta fallas que fueron imposibles de solucionar luego de finalizado el proceso de producción. En este sentido el prototipo desarrollado en este proyecto que se espera que esté listo en 2024, será el punto de partida para futuros proyectos de la empresa.

Este proyecto busca satisfacer a 2 clientes, el externo y el interno. El cliente interno es el directorio que busca un mayor control sobre sus productos y una menor dependencia de los actuales fabricantes. El cliente externo finalmente será el profesional que utiliza el secador en salones de belleza, salones de peluquería y estética, spa, entre otros. Por lo que dicho proyecto deberá contemplar exigencias acordes a este mercado.

En la Figura 1 se presenta el diagrama en bloques del sistema. Se observa que el mismo consta de:

- Un Filtro EMI para suprimir la interferencia electromagnética.
- Un Rectificador para tener 310V para el control del Array MOSFET del motor BLDC.
- Un Step-Down para la alimentación de la electrónica de baja potencia.

- Un circuito de detección de cruce por 0 de la tensión de entrada, principalmente para un manejo más eficiente del controlador de elemento calefactor. Resistencias de Shunt junto con un circuito de acondicionamiento de señal en cada una de las tres ramas del motor BLDC para el control por BEMF (fuerza contra electromotriz (EMF) de realimentación) que permite saber en cada momento la posición del rotor respecto al estator.

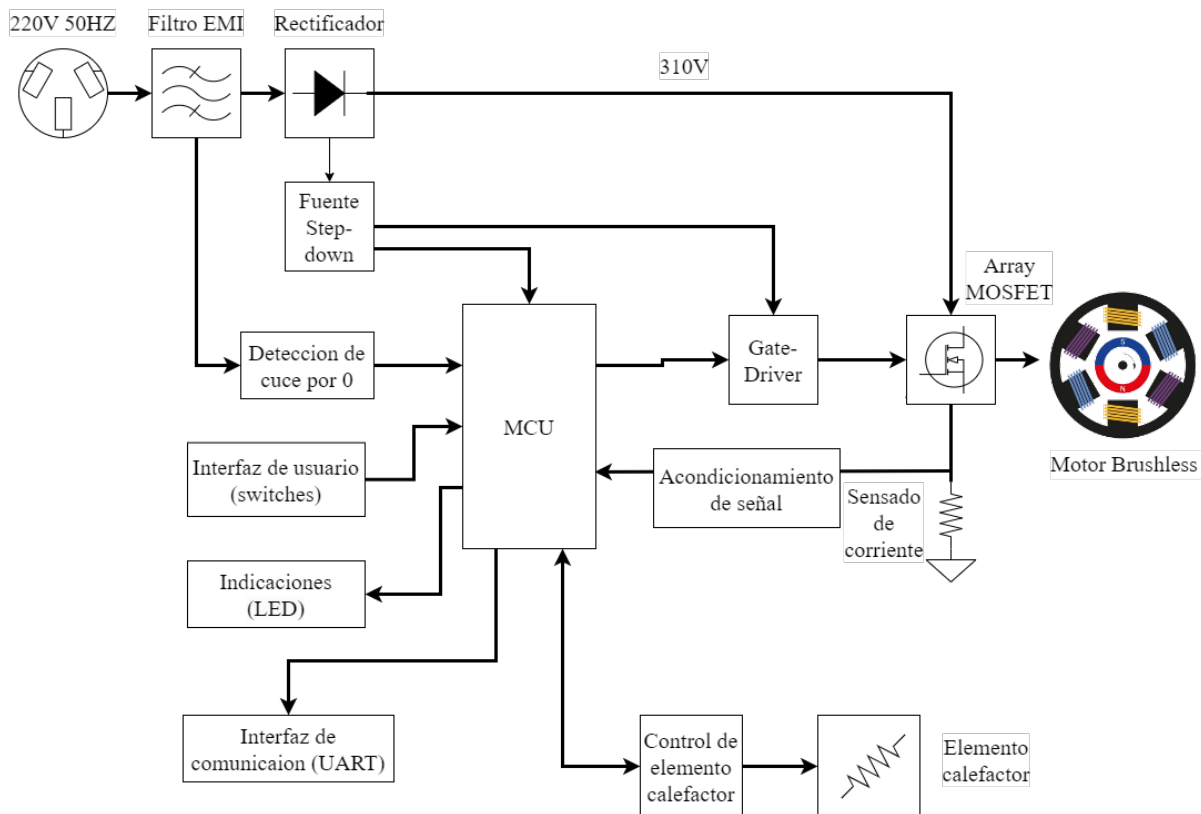


Figura 1. Diagrama en bloques del sistema.

## 2. Identificación y análisis de los interesados

Rol	Nombre y Apellido	Organización	Puesto
Impulsor	Ing. Jose Tantera	GA.MA Italy	Ing. Desarrollo (Italia)
Responsable	Fernando Nicolas Calvet	FIUBA	Alumno
Orientador	Agustín Antonio Rey	FIUBA	Director Trabajo final
Equipo	Ing. Nicolas Berreiro	GA.MA Italy	Diseño mecánico

- Auspiciante: Es riguroso y exigente con los costos, por lo que siempre pide reducirlos.
- Impulsor: Se unió al equipo de Italia recientemente, por lo que es posible que la comunicación se vea comprometida.
- Orientador: Puede aportar desde su conocimiento en control de motores brushless.

### 3. Propósito del proyecto

El propósito de este proyecto es desarrollar un sistema de control interno para motores BLDC trifásicos, que permita a la empresa mejorar la calidad y la competitividad de sus secadores de pelo. El desarrollo de este sistema permitirá a Ga.Ma Italy solucionar los problemas que enfrentó con los secadores de pelo que incorporaron un sistema de control externo, tales como la incompatibilidad con distintos proveedores, la quema de secadores por mal desempeño del motor, la falta de funcionalidad y la ausencia de control por temperatura.

### 4. Alcance del proyecto

El resultado final de este proyecto es fabricar el prototipo de un inverter que contenga todo lo necesario para la excitación y protección del motor BLDC. Incluyendo:

- Un PCB que incluye la etapa de potencia y al microcontrolador. Se debe realizar el diseño, fabricación y montaje.
- Un firmware con los algoritmos de control necesarios para el motor (FOC) que incluya también una simple interfaz de usuario.
- Una demostración con sus pertinentes mediciones de performance, comparando los resultados con la competencia.

Lo que no se incluye en este proyecto es el siguiente trabajo:

- El desarrollo de un motor BLDC trifásicos sin sensor hall.
- La producción en masa del sistema de control.
- La integración del sistema de control en un secador de pelo.
- El desarrollo de nuevas funcionalidades para el secador de pelo, como diferentes niveles de velocidad o ajustes de temperatura. Estas funcionalidades son posibles con el sistema de control propuesto, pero no están incluidas en el alcance del proyecto.

### 5. Supuestos del proyecto

Para el desarrollo del presente proyecto se supone que:

- El financiamiento del proyecto esta asegurado, y que se conseguirán todos los componentes y materiales necesarios.
- El equipo de diseño industrial de la empresa proveerá las dimensiones necesarias para el diseño del PCB.
- Se contara con un estimado de 20 horas semanales para el desarrollo del producto.
- Se contará con recursos humanos calificados para llevar a cabo el proyecto.
- Se obtendrán todos los permisos y licencias necesarios para llevar a cabo el proyecto.

## 6. Requerimientos

### 1. Requerimientos funcionales

- 1.1. Debe controlar el motor a 100.000 rpm dentro y fuera de las carcasas del prototipo dimensional.
- 1.2. El motor debe poder girar en 3 niveles de velocidad distintos. Velocidades a definir empíricamente.
- 1.3. Debe poder controlar el motor en ambos sentidos de giro.
- 1.4. Debe poder controlar 3 niveles de potencia distintos para el elemento calefactor.
- 1.5. Los componentes utilizados para la validación deben ser tales que puedan ser ensamblados en un producto final.
- 1.6. El diseño del prototipo se debe contemplar para futuras pruebas con control vectorial (FOC).
- 1.7. Debe tener una protección contra sobre temperatura con histéresis en la etapa de potencia.
- 1.8. Debe tener una protección contra sobre corriente en el motor, reseteable quitando la alimentación.
- 1.9. El software desarrollado debe estar debidamente documentado (comentado).
- 1.10. El software debe ser concebido de forma modular y por capas (HAL, drivers, aplicación) para que permita su reutilización.
- 1.11. Debe controlar las tres fases del motor por medio de un IPM (Integrated Power Module).
- 1.12. El sistema debe funcionar conectado a una red de 200/240VAC 50/60Hz.
- 1.13. Debe incluir Fusible de entrada.
- 1.14. Un rectificador para tener 310V para el control del Array MOSFET del motor BLDC.
- 1.15. Un circuito step-down para la alimentación de la electrónica de baja potencia.
- 1.16. Un circuito de detección de cruce por 0 de la tensión de entrada para un manejo más eficiente del controlador de elemento calefactor.
- 1.17. Se dispondrá de Resistencias de Shunt junto con un circuito de Acondicionamiento de señal en cada una de las tres ramas del motor BLDC para el control por BEMF (fuerza contraelectromotriz (EMF) de realimentación).

### 2. Requerimiento de firmware

- 2.1. Deberá implementar las transformadas directas e inversas de Park y Clarke.
- 2.2. Deberá conocer la posición del rotor a través de BEMF.
- 2.3. Deberá medir corrientes y tensiones de fase.
- 2.4. Deberá implementar rampas de aceleración y desaceleración.
- 2.5. Deberá apagar el inverter si hay falla del módulo o sobrettemperatura.
- 2.6. Se podrán monitorear variables de estado y parámetros a través de una UART.
- 2.7. Deberá implementar el algoritmo de modulación SVPWM.
- 2.8. Opcional: Detectar la restricción de la entrada de aire. Este método podría basarse en la medición de la temperatura del motor o en la medición de la presión del aire en la entrada del motor. Una vez que el sistema detecta la restricción de la entrada de aire, debe tomar las siguientes medidas:



- 1) Frenar el motor para evitar que se dañe.
  - 2) Generar una alarma para alertar al usuario de la condición.
3. Requerimientos de la interfaz
- 3.1. Tendrá 3 led que indiquen velocidad y otros 3 que indiquen temperatura.
  - 3.2. Tendrá un switch tipo slider a modo de ON/OFF.
4. Requerimientos interoperabilidad
- 4.1. El sistema deberá proporcionar una API sencilla por UART para el intercambio de datos de uso del producto.

## 7. Historias de usuarios (*Product backlog*)

En esta sección se enuncian las historias de usuario, cada una de ellas llevará un puntaje según 3 aspectos:

1. Dificultad: Cantidad de trabajo a realizar.
2. Complejidad: Complejidad de trabajo a realizar.
3. Riesgo: Incertidumbre del trabajo a realizar.

Se utilizará una escala siguiendo la serie de Fibonacci, donde un número mayor implica mayor costo. Si la suma de los 3 componentes no da un número de la serie, se elegirá el próximo más cercano.

1. "Como gerente de calidad quiero que sea capaz de informar horas y funciones de uso"  
 $D = 2; C = 2; R = 1$  Total = 5
2. "Como servicio técnico quiero que los pines de reprogramación sean más accesibles"  
 $D = 4; C = 1; R = 2$  Total = 8
3. "Como servicio técnico quiero informe el tipo de error a través de los LEDs"  
 $D = 3; C = 2; R = 1$  Total = 8
4. "Como gerente de marketing quiero que ofrezca sensado de bloqueo de entrada de aire"  
 $D = 4; C = 4; R = 3$  Total = 13
5. "Como diseñador industrial quiero que el PCB se adapte dimensionalmente a la estética del producto"  
 $D = 2; C = 4; R = 3$  Total = 13
6. "Como usuario quiero que el secador tenga la función de auto-clean"  
 $D = 3; C = 1; R = 1$  Total = 5
7. "Como usuario quiero que me avise si el filtro esta sucio"  
 $D = 3; C = 2; R = 1$  Total = 8

## 8. Entregables principales del proyecto

Los entregables del proyecto son:

- Manual de uso
- Diagrama de circuitos esquemáticos
- Código fuente del firmware
- Informe final
- Video funcional del prototipo

## 9. Desglose del trabajo en tareas

### 1. Investigación y documentación (100 h)

- 1.1. Estudio de técnicas de control de un motor BLDC trifásico (40 h)
- 1.2. Estudio de elementos de hardware necesarios (20 h)
- 1.3. Estudio de funciones y algoritmos (40 h)

### 2. Hardware (190 h)

- 2.1. Análisis de opciones de kits de desarrollo y marcas orientados a la temática (30 h)
- 2.2. Análisis de costos de hardware para asegurar su factibilidad comercial (30 h)
- 2.3. Diseño del circuito (20 h)
- 2.4. Diseño de circuito impreso (PCB) (40 h)
- 2.5. Implementación de circuito impreso (30 h)
- 2.6. Fabricación PCB (20 h)
- 2.7. Armado PCB (10 h)
- 2.8. Verificación PCB (10 h)

### 3. Desarrollo de firmware (190 h)

- 3.1. Manejo básico del hardware (40 h)
- 3.2. Etapas de Arranque del motor (40 h)
- 3.3. Testeo del módulo de potencia (30 h)
- 3.4. Medición de Corrientes y tensiones - Calibración (30 h)
- 3.5. Medición de temperatura (5 h)
- 3.6. Detección de falla del módulo (5 h)
- 3.7. Implementación de los algoritmos de control PMSM (100 h)
  - 1) Park Transform (20 h)
  - 2) Clarke Transform (20 h)
  - 3) PID (20 h)
  - 4) Generador de rampas de velocidad (10 h)

#### 4. Informe Final y Presentación (80 h)

- 4.1. Informe Final (30 h)
- 4.2. Redacción de documentos técnicos principales (20 hs)
- 4.3. Preparación de la presentación (30 h)

El total es de 620 horas.

## 10. Diagrama de Activity On Node

Armar el AoN a partir del WBS definido en la etapa anterior.

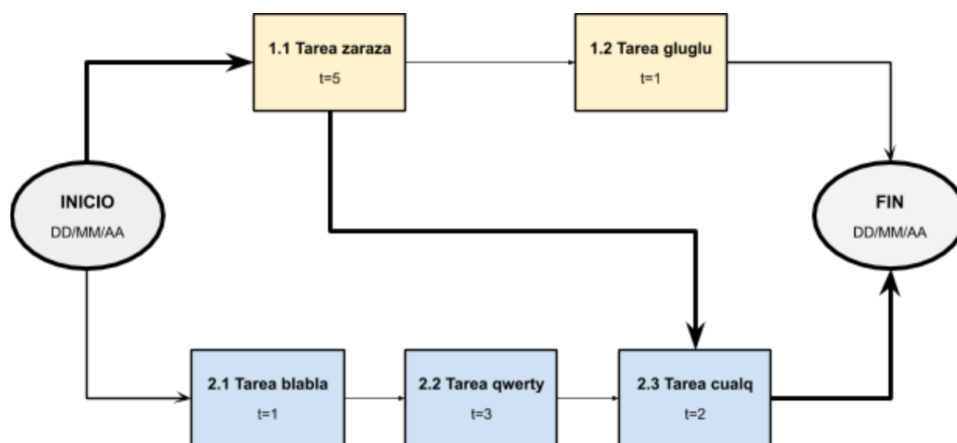


Figura 2. Diagrama de *Activity on Node*.

Indicar claramente en qué unidades están expresados los tiempos. De ser necesario indicar los caminos semicríticos y analizar sus tiempos mediante un cuadro. Es recomendable usar colores y un cuadro indicativo describiendo qué representa cada color, como se muestra en el siguiente ejemplo:

## 11. Diagrama de Gantt

Existen muchos programas y recursos *online* para hacer diagramas de Gantt, entre los cuales destacamos:

- Planner
- GanttProject
- Trello + *plugins*. En el siguiente link hay un tutorial oficial:  
<https://blog.trello.com/es/diagrama-de-gantt-de-un-proyecto>
- Creately, herramienta online colaborativa.  
<https://creately.com/diagram/example/ieb3p3ml/LaTeX>

- Se puede hacer en latex con el paquete *pgfgantt*  
<http://ctan.dcc.uchile.cl/graphics/pgf/contrib/pgfgantt/pgfgantt.pdf>

Pegar acá una captura de pantalla del diagrama de Gantt, cuidando que la letra sea suficientemente grande como para ser legible. Si el diagrama queda demasiado ancho, se puede pegar primero la “tabla” del Gantt y luego pegar la parte del diagrama de barras del diagrama de Gantt.

Configurar el software para que en la parte de la tabla muestre los códigos del EDT (WBS).  
Configurar el software para que al lado de cada barra muestre el nombre de cada tarea.  
Revisar que la fecha de finalización coincida con lo indicado en el Acta Constitutiva.

En la figura 3, se muestra un ejemplo de diagrama de Gantt realizado con el paquete de *pgfgantt*. En la plantilla pueden ver el código que lo genera y usarlo de base para construir el propio.

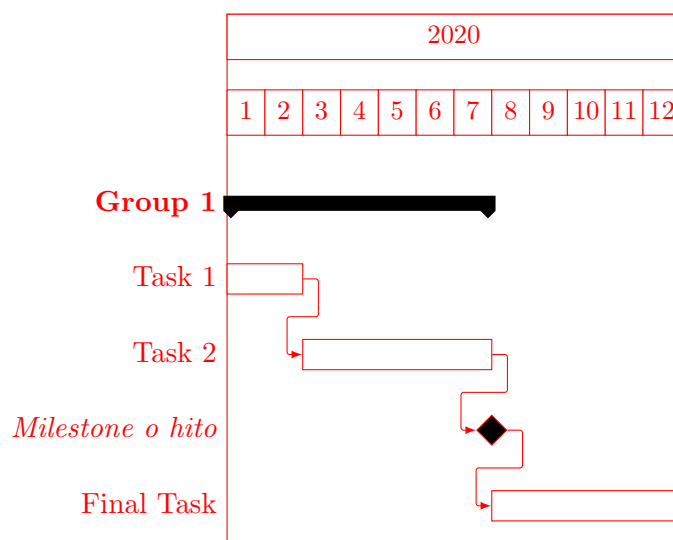


Figura 3. Diagrama de Gantt de ejemplo

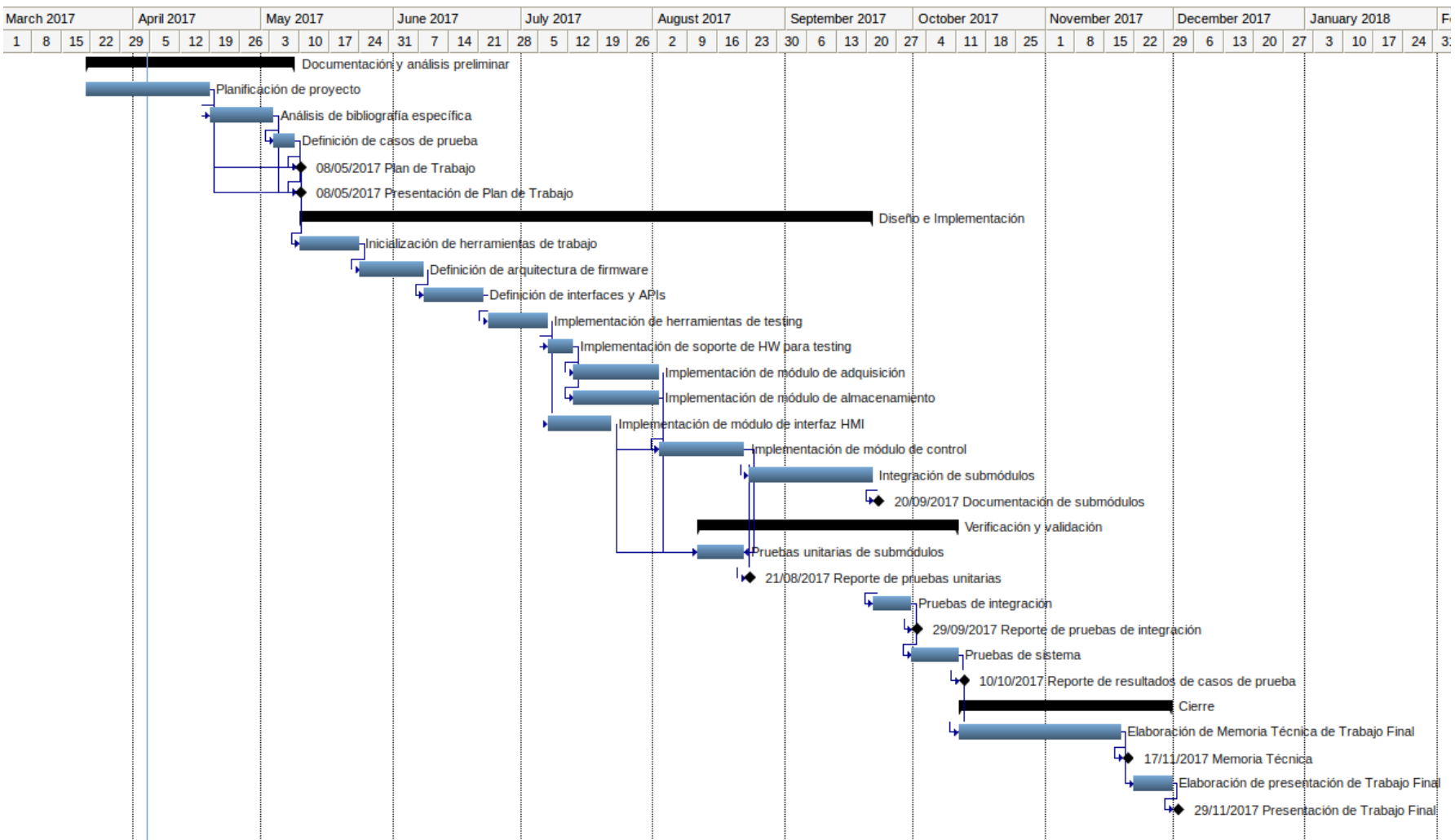


Figura 4. Ejemplo de diagrama de Gantt rotado

## 12. Presupuesto detallado del proyecto

Si el proyecto es complejo entonces separarlo en partes:

- Un total global, indicando el subtotal acumulado por cada una de las áreas.
- El desglose detallado del subtotal de cada una de las áreas.

**IMPORTANTE:** No olvidarse de considerar los **COSTOS INDIRECTOS**.

COSTOS DIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
SUBTOTAL			
COSTOS INDIRECTOS			
Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
SUBTOTAL			
TOTAL			

## 13. Gestión de riesgos

a) Identificación de los riesgos (al menos cinco) y estimación de sus consecuencias:

Riesgo 1: detallar el riesgo (riesgo es algo que si ocurre altera los planes previstos de forma negativa)

- Severidad (S): mientras más severo, más alto es el número (usar números del 1 al 10). Justificar el motivo por el cual se asigna determinado número de severidad (S).
- Probabilidad de ocurrencia (O): mientras más probable, más alto es el número (usar del 1 al 10). Justificar el motivo por el cual se asigna determinado número de (O).

Riesgo 2:

- Severidad (S):
- Ocurrencia (O):

Riesgo 3:

- Severidad (S):

■ Ocurrencia (O):

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

Riesgo	S	O	RPN	S*	O*	RPN*

Criterio adoptado: Se tomarán medidas de mitigación en los riesgos cuyos números de RPN sean mayores a...

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

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

Riesgo 1: plan de mitigación (si por el RPN fuera necesario elaborar un plan de mitigación). Nueva asignación de S y O, con su respectiva justificación: - Severidad (S): mientras más severo, más alto es el número (usar números del 1 al 10). Justificar el motivo por el cual se asigna determinado número de severidad (S). - Probabilidad de ocurrencia (O): mientras más probable, más alto es el número (usar del 1 al 10). Justificar el motivo por el cual se asigna determinado número de (O).

Riesgo 2: plan de mitigación (si por el RPN fuera necesario elaborar un plan de mitigación).

Riesgo 3: plan de mitigación (si por el RPN fuera necesario elaborar un plan de mitigación).

## 14. Gestión de la calidad

Elija al menos diez requerimientos que a su criterio sean los más importantes/críticos/que aportan más valor y para cada uno de ellos indique las acciones de verificación y validación que permitan asegurar su cumplimiento.

- Req #1: copiar acá el requerimiento.
  - Verificación para confirmar si se cumplió con lo requerido antes de mostrar el sistema al cliente. Detallar
  - Validación con el cliente para confirmar que está de acuerdo en que se cumplió con lo requerido. Detallar

Tener en cuenta que en este contexto se pueden mencionar simulaciones, cálculos, revisión de hojas de datos, consulta con expertos, mediciones, etc. Las acciones de verificación suelen considerar al entregable como “caja blanca”, es decir se conoce en profundidad su funcionamiento interno. En cambio, las acciones de validación suelen considerar al entregable como “caja negra”, es decir, que no se conocen los detalles de su funcionamiento interno.

## 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:  
- Indicar quién se ocupará de hacer esto y cuál será el procedimiento a aplicar.
- Identificación de las técnicas y procedimientos útiles e inútiles que se emplearon, y los problemas que surgieron y cómo se solucionaron: - Indicar quién se ocupará de hacer esto y cuál será el procedimiento para dejar registro.
- Indicar quién organizará el acto de agradecimiento a todos los interesados, y en especial al equipo de trabajo y colaboradores: - Indicar esto y quién financiará los gastos correspondientes.