



# Análisis termo-acustico para la detección automática del Primer Crack en el tueste de café

Autor:

Ing. Roberto Enrique Castro Beltran

Director:

Título y Nombre del director (pertenencia)

*Esta planificación fue realizada en el curso de Gestión de proyectos  
entre el 04 de marzo de 2025 y el 22 de abril de 2025.*

## Índice

1. Descripción técnica-conceptual del proyecto a realizar . . . . .	5
2. Identificación y análisis de los interesados . . . . .	7
3. Propósito del proyecto . . . . .	7
4. Alcance del proyecto . . . . .	8
5. Supuestos del proyecto. . . . .	9
6. Requerimientos . . . . .	9
7. Historias de usuarios ( <i>Product backlog</i> ). . . . .	10
8. Entregables principales del proyecto . . . . .	10
9. Desglose del trabajo en tareas . . . . .	11
10. Diagrama de Activity On Node. . . . .	11
11. Diagrama de Gantt . . . . .	12
12. Presupuesto detallado del proyecto . . . . .	15
13. Gestión de riesgos . . . . .	15
14. Gestión de la calidad . . . . .	16
15. Procesos de cierre . . . . .	17

## Registros de cambios

Revisión	Detalles de los cambios realizados	Fecha
0	Creación del documento	04 de marzo de 2025
1	Se completa hasta el punto 5 inclusive	20 de marzo de 2025

## Acta de constitución del proyecto

Buenos Aires, 04 de marzo de 2025

Por medio de la presente se acuerda con el Ing. Roberto Enrique Castro Beltran que su Trabajo Final de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos se titulará “Análisis termo-acústico para la detección automática del Primer Crack en el tueste de café” y consistirá en la implementación de un dispositivo que analice continuamente los datos de temperatura del grano, la acústica del tambor y el tiempo de tostado del café, con el fin de detectar un evento acústico causado por la acumulación de vapor dentro del grano de café. El trabajo tendrá un presupuesto preliminar estimado de 600 horas y un costo estimado de \$ XXX, con fecha de inicio el 04 de marzo de 2025 y fecha de presentación pública el 15 de mayo de 2025.

Se adjunta a esta acta la planificación inicial.

Dr. Ing. Ariel Lutenberg  
Director posgrado FIUBA

Prisma EMC  
Prisma Coffee Tech

Título y Nombre del director  
Director del Trabajo Final

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

El tostado del café es un proceso fundamental que define su sabor y aroma. Durante este, ocurre el primer crack (FC, por sus siglas en inglés), un evento acústico generado por la fractura del grano debido a la presión interna causada por la evaporación de la humedad. Detectar este momento con precisión es crucial para garantizar la repetibilidad del proceso y obtener un café con características consistentes.

Tradicionalmente, los maestros tostadores identifican el primer crack mediante el oído, lo que puede generar variaciones en el resultado final. La integración de sistemas de detección acústica y térmica permite automatizar este proceso, mejorando la precisión en la identificación del FC y asegurando un control más fiable del tueste. Esto facilita la producción de cafés de alta calidad.

El proceso de tostado de café se divide en varias etapas clave, cada una con un impacto en el sabor, aroma y cuerpo del café final. Estos son los pasos principales:

### ■ Secado:

- El grano de café verde tiene entre un 8 % y 12 % de humedad.
- Durante los primeros minutos en el tostador, se calienta gradualmente para evaporar esta humedad.
- La temperatura suele alcanzar unos 150°C (300°F).

### ■ Reacción de Maillard:

- A medida que la temperatura sigue subiendo, los azúcares y aminoácidos reaccionan, creando compuestos responsables del color y aroma del café tostado.
- Se empiezan a desarrollar notas dulces y caramelizadas.
- Ocurre entre 150°C y 200°C (300-392°F).

### ■ Primer Crack - FC:

- El grano comienza a expandirse y emite un sonido similar a una palomita de maíz explotando.
- Es causado por la acumulación de vapor y gases internos.
- Indica que el café ha alcanzado un nivel de tueste ligero a medio.
- Temperatura aproximada: 195-205°C (383-401°F).

### ■ Desarrollo: Aquí se decide el perfil del café.

- Si se detiene pronto, el café tendrá una acidez más pronunciada.
- Si se deja más tiempo, se desarrollan sabores más dulces y equilibrados.
- La temperatura puede llegar a 210-220°C (410-428°F).

### ■ Segundo Crack - SC (Opcional):

- Otro sonido de estallidos más suaves indica que la estructura celular del grano se está rompiendo más.
- Se desarrollan notas más oscuras y amargas, con un cuerpo más pesado.
- Ocurre alrededor de 225-230°C (437-446°F).

#### ■ Enfriamiento rápido:

- El café debe enfriarse rápidamente para evitar que siga tostándose con el calor residual.
- Se usa aire frío o una superficie metálica para detener el proceso.

Este proyecto nace como una necesidad de Prisma Coffee Tech: dotar a sus máquinas tostadoras, ver figura 1, de una nueva funcionalidad para la detección automática del primer crack, permitiendo un control más preciso del proceso de tostado. Aunque sus equipos ya gestionan todas las etapas del tueste, actualmente dependen de la percepción auditiva del operador para identificar este evento clave. Dado el valor estratégico de esta innovación, Prisma Coffee Tech busca manejar cláusulas de confidencialidad y acuerdos de propiedad intelectual para proteger el desarrollo y la implementación de esta tecnología.



Figura 1. Tostadora de café.

La solución propuesta consiste en la integración de un sistema de detección automática del primer crack utilizando un ESP32-S3 como unidad de procesamiento central. Este dispositivo se comunicará con un micrófono MEMS (Sistema Micro-Electro Mecánico) a intervalos regulares para capturar la señal acústica del tambor de tostado. Además, recibirá datos en tiempo real sobre la temperatura del grano, el tiempo de tostado y la configuración de operación a través de comunicación WiFi o, como respaldo, mediante RS-485, estableciendo una conexión con la tarjeta principal de la máquina tostadora.

A partir de esta información, el ESP32-S3 ejecutará técnicas de procesamiento digital de señales (DSP) para identificar el primer crack con precisión. Una vez detectado el evento, el sistema realizará las siguientes acciones:

1. Registro de Datos: Guardará el evento en una tarjeta SD, junto con las señales utilizadas para su predicción.

2. Comunicación con la tarjeta principal: Enviará la información detectada para su uso en el control automático de las siguientes etapas del tostado.
3. Actualización de estados locales: Modificará los estados de los leds indicadores.

El sistema contará con un conjunto de indicadores LED para señalar:

- Estado activo del dispositivo.
- Fallas detectadas.
- Recepción de mensajes.
- Transmisión de datos.

Asimismo, se integrará una unidad de potencia encargada de acondicionar la energía necesaria para el correcto funcionamiento del micrófono y los demás componentes electrónicos.

Para brindar una idea más clara del trabajo propuesto, en la figura 2 mostrada a continuación se detalla lo expuesto.

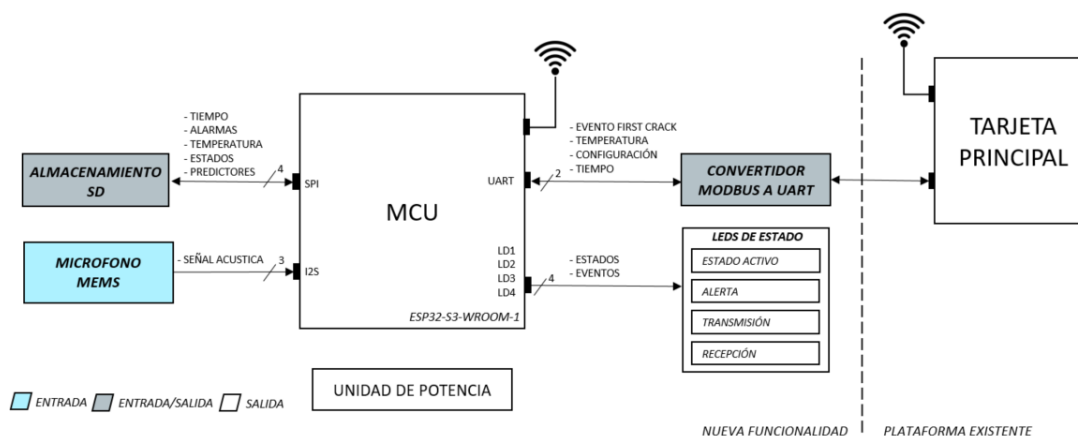


Figura 2. Diagrama en bloques del sistema.

## 2. Identificación y análisis de los interesados

Rol	Nombre y Apellido	Organización	Puesto
Cliente	Prisma EMC	Prisma Coffee Tech	-
Responsable	Ing. Roberto Enrique Castro Beltran	FIUBA	Alumno
Orientador	Título y Nombre del director	pertenencia	Director del Trabajo Final

## 3. Propósito del proyecto

El propósito de este proyecto es desarrollar e integrar un sistema de detección automática del primer crack en las máquinas tostadoras de Prisma Coffee Tech, permitiendo mejorar la precisión

y repetibilidad del proceso de tostado. Con esta innovación, se busca reducir la dependencia de la percepción auditiva del operador, garantizar un control más preciso del perfil del café y optimizar la calidad del producto final.

#### 4. Alcance del proyecto

El proyecto incluye:

- Desarrollo de hardware:
  - Diseño e implementación de una tarjeta electrónica para la integración de sensores, procesamiento y comunicaciones.
  - Selección y configuración de componentes electrónicos (ESP32, micrófono MEMS, unidad de potencia, almacenamiento, LEDs).
- Creación de datasets:
  - Captura de datos de temperatura, acústica y tiempo durante el tostado.
  - Generación de un conjunto de datos etiquetados para el entrenamiento y validación del sistema de detección.
- Desarrollo de firmware.
  - Adquisición de señales: Captura y sincronización de datos acústicos y térmicos en tiempo real.
  - Procesamiento de señales: Implementación de técnicas DSP para la detección automática del primer crack.
  - Comunicaciones: Envío y recepción de datos mediante WiFi y RS-485 a la tarjeta principal.
  - Almacenamiento: Registro de eventos y señales en una tarjeta SD.
  - Gestión operativa del sistema: Control de los distintos estados de funcionamiento, garantizando la correcta ejecución de las tareas en cada etapa del proceso.
- Integración y pruebas.

El presente proyecto no incluye:

- Control automático de la máquina tostadora más allá de la detección del primer crack.
- Desarrollo de hardware externo a la unidad de detección (excepto la interfaz de comunicación).
- Análisis detallado del segundo crack o de otras variables sensoriales del café.

El sistema se desarrollará como un prototipo funcional, que permitirá evaluar su desempeño en un entorno real, con la posibilidad de futuras mejoras y optimización en versiones posteriores.



## 5. Supuestos del proyecto

Para el desarrollo del presente proyecto se supone que:

- Condiciones del entorno de operación:
  - Se asume que el sistema operará en un entorno de tostado con niveles de ruido controlados, donde el micrófono podrá capturar el sonido del primer crack sin interferencias excesivas.
  - Se considera que las variaciones en la temperatura y humedad ambiente no afectarán significativamente la precisión de los sensores utilizados.
- Disponibilidad de infraestructura y hardware:
  - Se cuenta con acceso a máquinas tostadoras de Prisma Coffee Tech para la integración y validación del sistema.
  - El ESP32 y los demás componentes electrónicos serán suficientes en términos de capacidad de procesamiento y almacenamiento para ejecutar los algoritmos de detección.
- Disponibilidad de materiales: Prisma Coffee Tech proporcionará los materiales y equipos necesarios, incluyendo sensores, tarjetas electrónicas y componentes auxiliares
- Fiabilidad de la comunicación:
  - Se asume que la comunicación WiFi estará disponible en la mayoría de los entornos de operación, y que RS-485 servirá como respaldo en caso de fallos.
  - La tarjeta principal de la tostadora procesará correctamente los eventos enviados por el sistema de detección.
- Precisión del modelo de detección: Se asume que la combinación de señales acústicas y térmicas permitirá detectar el primer crack con una precisión suficiente para la automatización del proceso.
- Factores externos:
  - Prisma Coffee Tech y las demás partes involucradas proporcionarán acceso a la información técnica necesaria para la integración del sistema.
  - Se respetarán los acuerdos de confidencialidad y propiedad intelectual establecidos con la empresa.

## 6. Requerimientos

Los requerimientos deben enumerarse y de ser posible estar agrupados por afinidad, por ejemplo:

### 1. Requerimientos funcionales:

- 1.1. El sistema debe...
- 1.2. Tal componente debe...
- 1.3. El usuario debe poder...

## 2. Requerimientos de documentación:

2.1. Requerimiento 1.

2.2. Requerimiento 2 (prioridad menor)

3. Requerimiento de testing...

4. Requerimientos de la interfaz...

5. Requerimientos interoperabilidad...

6. etc...

Leyendo los requerimientos se debe poder interpretar cómo será el proyecto y su funcionalidad.

Indicar claramente cuál es la prioridad entre los distintos requerimientos y si hay requerimientos opcionales.

**!!!No olvidarse de que los requerimientos incluyen a las regulaciones y normas vigentes!!!**

Y al escribirlos seguir las siguientes reglas:

- Ser breve y conciso (nadie lee cosas largas).
- Ser específico: no dejar lugar a confusiones.
- Expresar los requerimientos en términos que sean cuantificables y medibles.

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

Descripción: en esta sección se deben incluir las historias de usuarios y su ponderación (*history points*). Recordar que las historias de usuarios son descripciones cortas y simples de una característica contada desde la perspectiva de la persona que desea la nueva capacidad, generalmente un usuario o cliente del sistema. La ponderación es un número entero que representa el tamaño de la historia comparada con otras historias de similar tipo.

Se debe indicar explícitamente el criterio para calcular los *story points* de cada historia.

El formato propuesto es:

1. “Como [rol] quiero [tal cosa] para [tal otra cosa].”

*Story points*: 8 (complejidad: 3, dificultad: 2, incertidumbre: 3)

## 8. Entregables principales del proyecto

Los entregables del proyecto son (ejemplo):

- Manual de usuario.
- Diagrama de circuitos esquemáticos.
- Código fuente del firmware.
- Diagrama de instalación.
- Memoria del trabajo final.
- etc...

## 9. Desglose del trabajo en tareas

El WBS debe tener relación directa o indirecta con los requerimientos. Son todas las actividades que se harán en el proyecto para dar cumplimiento a los requerimientos. Se recomienda mostrar el WBS mediante una lista indexada:

### 1. Grupo de tareas 1 (suma h)

- 1.1. Tarea 1 (tantas h)
- 1.2. Tarea 2 (tantas h)
- 1.3. Tarea 3 (tantas h)

### 2. Grupo de tareas 2 (suma h)

- 2.1. Tarea 1 (tantas h)
- 2.2. Tarea 2 (tantas h)
- 2.3. Tarea 3 (tantas h)

### 3. Grupo de tareas 3 (suma h)

- 3.1. Tarea 1 (tantas h)
- 3.2. Tarea 2 (tantas h)
- 3.3. Tarea 3 (tantas h)
- 3.4. Tarea 4 (tantas h)
- 3.5. Tarea 5 (tantas h)

Cantidad total de horas: tantas.

**¡Importante!:** la unidad de horas es h y va separada por espacio del número. Es incorrecto escribir “23hs”.

**Se recomienda que no haya ninguna tarea que lleve más de 40 h.** De ser así se recomienda dividirla en tareas de menor duración.

## 10. Diagrama de Activity On Node

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

Una herramienta simple para desarrollar los diagramas es el Draw.io (<https://app.diagrams.net/>). Draw.io

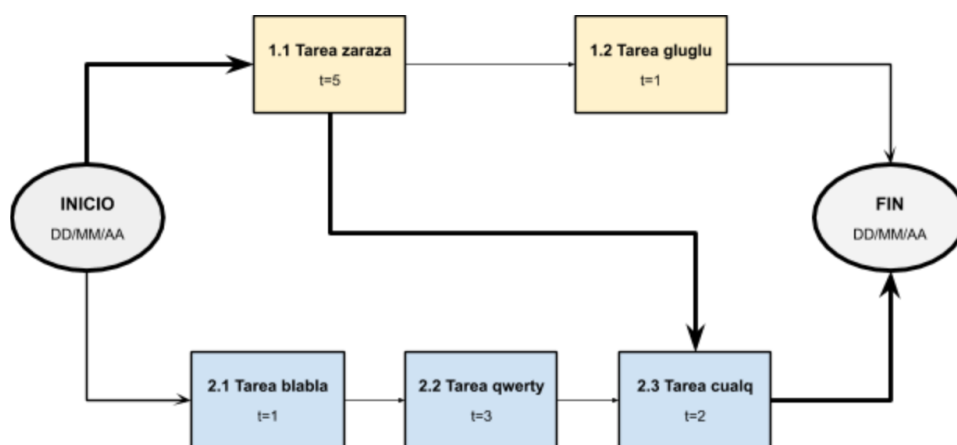


Figura 3. Diagrama de *Activity on Node*.

Indicar claramente en qué unidades están expresados los tiempos. De ser necesario indicar los caminos semi críticos y analizar sus tiempos mediante un cuadro. Es recomendable usar colores y un cuadro indicativo describiendo qué representa cada color.

## 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 4, 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.

Las fechas pueden ser calculadas utilizando alguna de las herramientas antes citadas. Sin embargo, el siguiente ejemplo fue elaborado utilizando esta hoja de cálculo.

Es importante destacar que el ancho del diagrama estará dado por la longitud del texto utilizado para las tareas (Ejemplo: tarea 1, tarea 2, etcétera) y el valor *x unit*. Para mejorar la apariencia del diagrama, es necesario ajustar este valor y, quizás, acortar los nombres de las tareas.

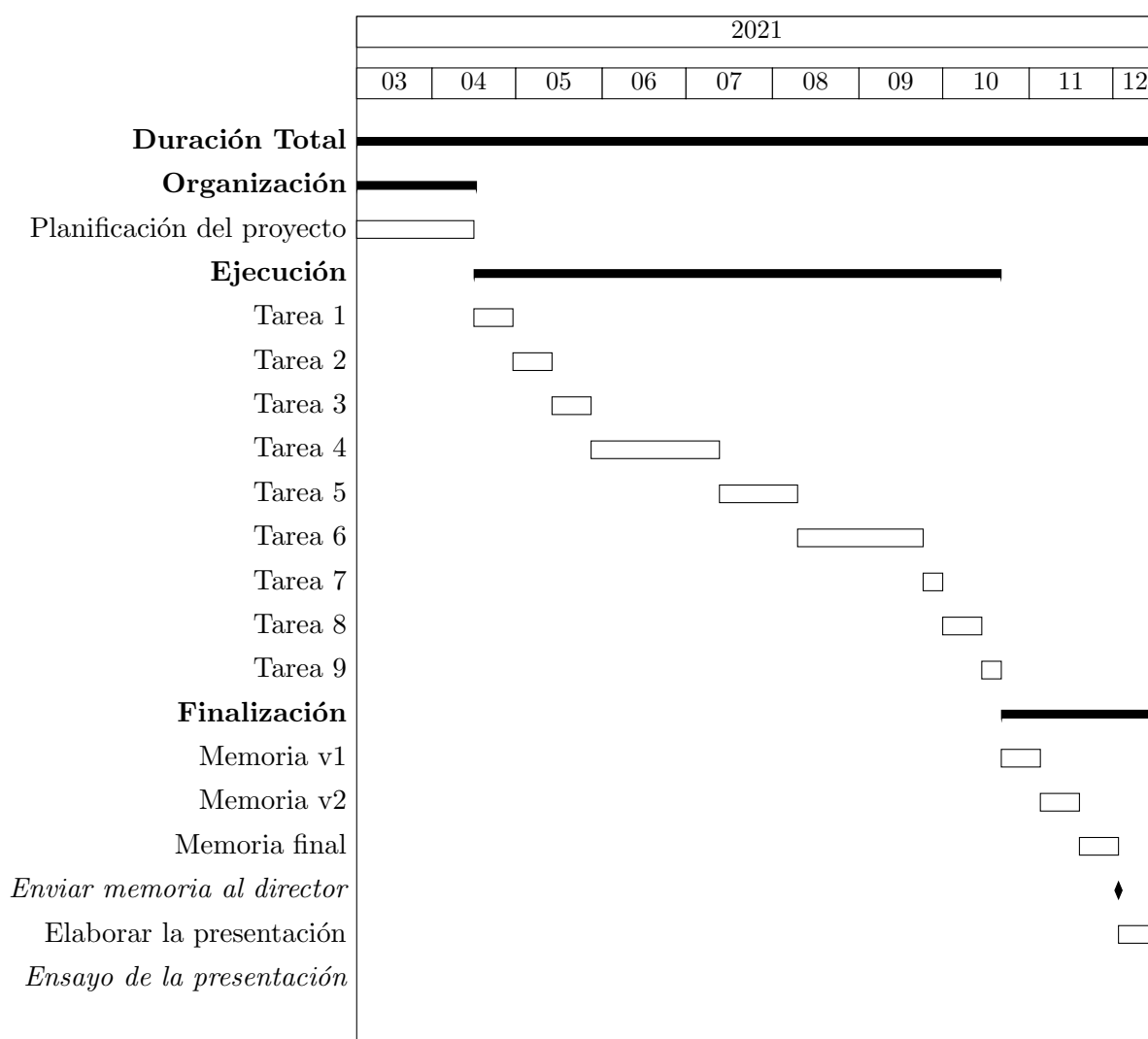


Figura 4. Diagrama de gantt de ejemplo



Figura 5. Ejemplo de diagrama de Gantt (apaisado).

## 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**.

Incluir la aclaración de si se emplea como moneda el peso argentino (ARS) o si se usa moneda extranjera (USD, EUR, etc). Si es en moneda extranjera se debe indicar la tasa de conversión respecto a la moneda local en una fecha dada.

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): X.  
Justificación...

- Ocurriencia (O): Y.  
Justificación...

Riesgo 3:

- Severidad (S): X.  
Justificación...
- Ocurriencia (O): Y.  
Justificación...

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 con su correspondiente número.



- 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, 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.