



**FACULTAD  
DE INGENIERIA**

Universidad de Buenos Aires

# **Detección de lesiones óseas por medio de bioimpedancia: pruebas clínicas y portabilidad**

Autor:

Antonio H. Dell'Osa

Director:

Antonio H. Dell'Osa (IDEI/UNTDF)

Jurados:

Evaluador anónimo (Determinado por la SCyT-UNTDF)

Evaluador anónimo (Determinado por la SCyT-UNTDF)

Evaluador anónimo (Determinado por la SCyT-UNTDF)

*Este trabajo fue realizado en el curso de Gestión de proyectos  
entre el 22 de junio de 2020 y el 22 de Agosto de 2020.*

## Índice

Registros de cambios . . . . .	3
Acta de Constitución del Proyecto . . . . .	4
Descripción técnica-conceptual del Proyecto a realizar . . . . .	5
Identificación y análisis de los interesados . . . . .	7
1. Propósito del proyecto . . . . .	8
2. Alcance del proyecto . . . . .	9
3. Supuestos del proyecto . . . . .	10
4. Requerimientos . . . . .	11
Historias de usuarios ( <i>Product backlog</i> ) . . . . .	12
5. Entregables principales del proyecto . . . . .	13
6. Desglose del trabajo en tareas . . . . .	14
7. Diagrama de Activity On Node . . . . .	16
8. Diagrama de Gantt . . . . .	16
9. Matriz de uso de recursos de materiales . . . . .	17
10. Presupuesto detallado del proyecto . . . . .	17
11. Matriz de asignación de responsabilidades . . . . .	18
12. Gestión de riesgos . . . . .	18
13. Gestión de la calidad . . . . .	19
14. Comunicación del proyecto . . . . .	20
15. Gestión de Compras . . . . .	20
16. Seguimiento y control . . . . .	20
17. Procesos de cierre . . . . .	20

## Registros de cambios

Revisión	Detalles de los cambios realizados	Fecha
1.0	Creación del documento	22/06/2020
1.1.1	Primera entrega (2 → 3) para ser revisada (Faltantes: Requerimientos y WBS)	10/07/2020
1.1.2	Segunda entrega (2 → 3) completa para ser revisada	17/07/2020

## Acta de Constitución del Proyecto

Buenos Aires, 22 de junio de 2020

Por medio de la presente se acuerda con el Ing. Antonio H. Dell'Osa que su Trabajo Final de la Carrera de Especialización en Sistemas Embebidos se titulará "Detección de lesiones óseas por medio de bioimpedancia: pruebas clínicas y portabilidad", consistirá esencialmente en el prototipo preliminar de un analizador multifrecuencia de bioimpedancia portátil para mediciones no invasivas en seres humanos que permita cuantificar la integración ósea de huesos largos en una escala interpretable por el usuario-médico en seres humanos, y tendrá un presupuesto preliminar estimado de 600 hs de trabajo y 90.000,00 pesos argentinos, con fecha de inicio 22 de junio de 2020 y fecha de presentación pública 21 de junio de 2021.

Se adjunta a esta acta la planificación inicial.

Ariel Lutenberg  
Director posgrado FIUBA

Dr. Fernando Santiago  
Universidad Nacional de Tierra del Fuego

Antonio H. Dell'Osa  
Director del Trabajo Final

## Descripción técnica-conceptual del Proyecto a realizar

A partir del descubrimiento de la radiología por emisión de rayos X para la generación de imágenes diagnósticas este campo de la medicina no ha dejado de crecer: ecografía por ultrasonido, tomografía axial computada, angiografía, resonancia magnética, entre otras. No obstante, con ninguna de estas técnicas se ha podido proyectar un equipamiento portátil que permita detectar fracturas de lesiones óseas. En este proyecto se propone el desarrollo de un dispositivo portátil para la detección de fracturas de huesos largos por medio del análisis de propiedades eléctricas, es decir, medidas de bioimpedancia. Este tipo de tecnología brinda la posibilidad de ser aplicada en equipos electrónicos portátiles como solución a la atención de emergencias médicas en tres escenarios: lugares de geografías extremas aisladas (zonas de montaña o continente antártico), lugares aislados (lejos de centros de salud) y zonas urbanas (generando un diagnóstico temprano que evite el traslado de un paciente a un centro hospitalario). Esto proveería diagnósticos in-situ, in-vivo, inocuos y no invasivos, lo que constituye a este proyecto en un desarrollo sin antecedentes a nivel mundial.

El Ing. Dell'Osa con colegas externos a este proyecto ha realizado modelos físicos y computacionales para estudiar la variación de las mediciones de bioimpedancia sobre estructuras biológicas con hueso roto y entero y la dispersión de las corrientes eléctricas aplicadas en el tejido humano in-vivo. A su vez, en colaboración con investigadores del Policlínico Universitario de Cagliari (Italia) se elaboró un protocolo para mediciones clínicas sobre pacientes y voluntarios que fue implementado sobre un dispositivo no-portátil basado en el AD5933EB (Analog Devices©, USA) con una interfaz altamente técnica para el usuario-médico.

En el presente proyecto consta del desarrollo de un prototipo preliminar de un analizador multifrecuencia de bioimpedancia portátil para mediciones no invasivas en seres humanos que permita cuantificar la integración ósea de huesos largos en una escala y una interfaz interpretable por el usuario-médico.

En la Figura 1 se muestra en un diagrama en bloques las partes principales del sistema a desarrollar. El sistema de control, comunicación y grabado de mediciones está implementado por medio de Raspberry Pi 4 que se comunica por medio de I2C con un sistema basado en el AD5933 que es el encargado de tomar las mediciones en configuración bipolar. La interfaz con el usuario-médico se brindará por medio de una aplicación para Smartphone, tablet y PC, la comunicación entre este dispositivo y la Raspberry Pi 4 será inalámbrica (WiFi o Bluetooth).

El circuito integrado AD5933 (Analog Devices, USA) tiene en sí mismo implementadas las soluciones necesarias al análisis espectroscópico de impedancia. El sistema basado en este integrado es una de las tareas de este proyecto.

El presente proyecto enmarca la tesis doctoral del Ing. Dell'Osa.

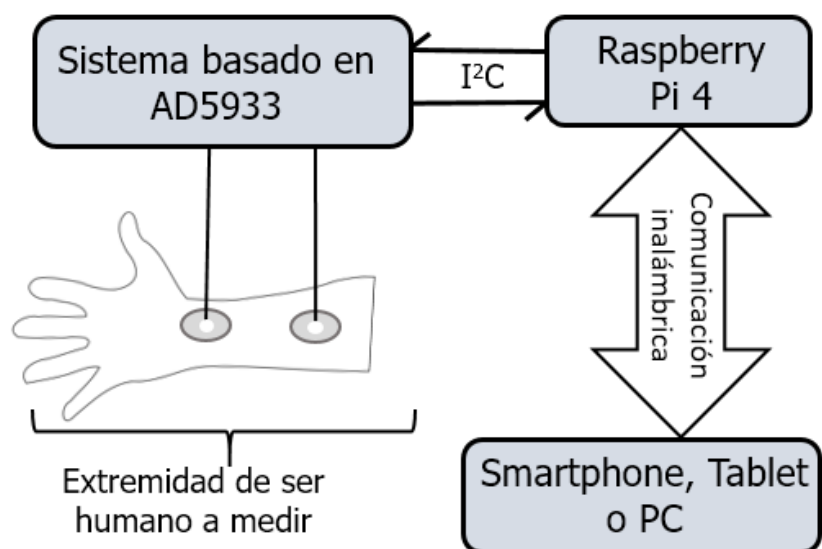


Figura 1: Diagrama en bloques del sistema

## Identificación y análisis de los interesados

Rol	Nombre y Apellido	Organización	Puesto
Auspiciante y cliente	Dr. Fernando Santiago	Universidad Nacional de Tierra del Fuego	Secretario de Ciencia y Tecnología
Responsable	Antonio H. Dell'Osa	Universidad Nacional de Tierra del Fuego	Alumno
Colaboradores	Ing. Agustín Mailing Lic. Fernando Silva Dr. Alejandro Masner	Independiente-FIUBA Independiente Universidad de la República (Uruguay)	- Ref: Clínico -
Equipo	Dr. Diego Dondo Lic. Guillermo Prisching	FRC-UTN Universidad Nacional de Tierra del Fuego	Ref: Electrónica Ref: Software

- Auspiciante y cliente: está condicionado por la situación presupuestaria de la Universidad a causa de la actual pandemia que condiciona la economía Nacional. La rendición de gastos se rige por la Ordenanza 5 del Consejo Superior de la Universidad Nacional de Tierra del Fuego. Se cuenta con él y el trabajo de la directora de Ciencia y Tecnología y encargo de la Unidad de Vinculación Tecnológica. La rendición final del proyecto será evaluada sólo por el informe final que se debe presentar y la consecuente rendición de gastos.
- Equipo: Diego Dondo tiene actividad docente durante los dos cuatrimestres y su disponibilidad puede condicionarse temporalmente por sus laborales en su universidad de origen. Guillermo Prisching es su primera interacción con un proyecto con el equipo y colaboradores, a priori, sus referencias hablan de compromiso y responsabilidad.
- Colaboradores: Agustín Mailing tiene mucho compromiso y disponibilidad pero se encuentra condicionado con su condición de trabajador independiente/autónomo. Fernando Silva es kinesiólogo y el aporte clínico del proyecto, puede condicionarse su aporte por el actual contexto de Pandemia y Emergencia Sanitaria.

## 1. Propósito del proyecto

El propósito de este proyecto es el desarrollo de un prototipo calibrado y funcional de un bioimpedanciómetro para el uso específico de detección de fracturas de huesos largos en extremidades; brindando la posibilidad de un diagnóstico in-situ, no invasivo e inocuo para el paciente. A su vez, permite continuar con expansión de aplicaciones biomédicas basadas en mediciones bioimpedancia en pos de reemplazar (parcial o totalmente) métodos de diagnósticos de fisiopatologías en seres humanos que requieren de tecnologías médica con un alto grado de complejidad tecnológica, adecuación del medio ambiente hospitalario para su utilización y suministro de energía eléctrica de redes de media y/o alta tensión. Fundándose las razones del desarrollo de este proyecto tanto en la implementación de una nueva técnica diagnóstica con ventajas parciales sobre las existentes y una tecnología médica con un menor impacto al medio ambiente que las actuales.



## 2. Alcance del proyecto

El presente proyecto incluye el desarrollo de un dispositivo de medición de bioimpedancia en configuración bipolar basado en el integrado AD5933 (Analog Devices, USA) para ser aplicado de modo no invasivo sobre seres humanos. El dispositivo debe ser alimentado a baterías, garantizando su autonomía y portabilidad durante -al menos- 2 horas de uso continuo.

El dispositivo deberá realizar mediciones en un rango de frecuencias de 5k Hz a 100 kHz brindando la información de dicha espectroscopía en un gráfico X-Y (dominio de la frecuencia) y en un tabla con los valores de módulo de bioimpedancia correspondiente a cada frecuencia, con la posibilidad de exportar esta tabla a un archivo extraíble.

La interfaz con el usuario se dará por una aplicación ejecutable en SmartPhone, Table o PC y la comunicación entre dispositivos será de modo inalámbrico (WiFi o Bluetooth).

El presente proyecto no incluye la construcción de electrodos aplicables al ser humano a examinar y de cables intermediarios entre dispositivo y el paciente. Se utilizarán electrodos adhesivos descartables y cables intermediarios de electrocardiografía (con aprobación de la Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica). Tampoco incluye el desarrollo de un software que permita el análisis de datos de bioimpedancia adquiridos.

### 3. Supuestos del proyecto

Para el desarrollo del presente proyecto se supone que:

- Se cuenta con la aprobación de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de Universidad Nacional de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur (UNTDF) de la propuesta presentada a la convocatoria Proyectos de Investigación y Desarrollo de la UNTDF 2019 (PIDUNTDF2019) denominada “Detección de lesiones óseas por medio de Bioimpedancia: Pruebas clínicas, portabilidad y comercialización” y el consecuente financiamiento que la adjudicación de dicha convocatoria conlleva;
- La legislación actualmente vigente en la República Argentina relacionada a las compras de componentes electrónicos en el extranjero no sufrirá cambios;
- El valor del dolar americano no será superior a los 85 pesos argentinos, como también que los gastos realizados desde proyectos de investigación que se desarrollan en universidades nacionales argentinas no perciben el impuesto PAIS;
- Ninguno de los referentes de cada una de las áreas desertará del presente proyecto sin un previo reemplazo;
- Ningún factor externo a la realidad del presente desarrollo condicione el funcionamiento de los Comités de Bioética Hospitalaria de las instituciones sanitarias de la República Argentina, como podrían ser pandemias, catástrofes, entre otras.

## 4. Requerimientos

1. Grupo de requerimientos asociados con la normativa vigente
  - 1.1. Se debe cumplir con la normativa IRAM 4220-1 (Seguridad eléctrica de equipamiento médico)
  - 1.2. Se debe cumplir con la normativa de principios éticos para las investigaciones médicas en seres humanos
2. Grupo de requerimientos asociados con adquisición de datos
  - 2.1. Se debe contar con tres pares de electrodos aplicables de forma no invasiva para configuración de electrodos bipolar y selección por interruptor manual.
  - 2.2. Se debe poseer una resolución de la medición en orden de los 10 ohmios.
  - 2.3. No se debe configurar el rango de frecuencias de señales aplicables (será fijo entre 5kHz y 100kHz).
3. Grupo de requerimientos asociados con la interfaz con el usuario
  - 3.1. Se debe contar con la visualización del módulo de la bioimpedancia en el dominio de la frecuencia en gráfico XY.
  - 3.2. Se debe contar con la visualización de los valores numéricos de módulo de bioimpedancia para cada frecuencia.
  - 3.3. Se debe poder descargar de los datos medidos en un archivo formato .CSV (o similar) en una memoria extraíble (tipo microSD).
4. Grupo de requerimientos asociados con portabilidad
  - 4.1. Se debe contar con una autonomía a baterías de al menos 2 horas y conector USB para la carga de la batería.
  - 4.2. No se deben exceder las dimensiones físicas externas de 15 centímetros de largo, 8 centímetros de ancho y 3 centímetros de espesor.
  - 4.3. Se debe contar con la disipación térmica conveniente para que la carcasa externa no genere una temperatura perceptible por el usuario.
  - 4.4. Se debe contar con conectividad inalámbrica (wifi y/o Bluetooth) a un dispositivo smartphone, tablet o PC-notebook.

## Historias de usuarios (*Product backlog*)

## 5. Entregables principales del proyecto

Una vez finalizado el presente proyecto se entregará:

- Dispositivo funcionando
- Manual de uso
- Certificado de aprobación de Comité de Bioética Hospitalaria
- Informe final

## 6. Desglose del trabajo en tareas

1. Gestión general de proyecto (167 hs)
  - 1.1. Fase de Inicio del proyecto (12 hs)
  - 1.2. Definición de Alcance (20 hs)
  - 1.3. Estudio de la normativa IRAM 4220-1 (40 hrs)
  - 1.4. Compras y adquisiciones (40 hs)
  - 1.5. Elaboración del manual de uso (20 hs)
  - 1.6. Rendición de compras y adquisiciones (20 hs)
  - 1.7. Escritura del informe final (15 hs)
2. Sistema autonomía energética (48 hs)
  - 2.1. Análisis y elección de batería (8 hs)
  - 2.2. Diseño de circuito de carga (8 hs)
  - 2.3. Implementación de circuito de carga (12 hs)
  - 2.4. Diseño de circuito de regulación (8 hs)
  - 2.5. Implementación de circuito de regulación (12 hs)
3. Sistema basado en AD5933 (85 hrs)
  - 3.1. Diseño del sistema (40 hs)
  - 3.2. Elaboración de la placa del circuito impreso (30 hs)
  - 3.3. Ensamble y soldado de la placa del sistema y electrodos aplicables (15 hs)
4. Software de control y comunicación basado en Raspberry Pi 4 (125 hs)
  - 4.1. Diagramación de la arquitectura (30 hs)
  - 4.2. Desarrollo del firmware de comunicación inalámbrica con dispositivo móvil (25 hs)
  - 4.3. Desarrollo del firmware de comunicación con sistema AD5933 (20 hs)
  - 4.4. Desarrollo del firmware de control (30 hs)
  - 4.5. Pruebas de funcionamiento (20 hs)
5. Software de interfaz con el usuario (52 hs)
  - 5.1. Diagramación de la interfaz (diseño y estructura) (12 hs)
  - 5.2. Desarrollo de software (25 hs)
  - 5.3. Pruebas de funcionamiento (15 hs)
6. Protocolo de medición y Consentimiento informado (CI) (96 hrs)
  - 6.1. Escritura del Protocolo de Medición (4 hs)
  - 6.2. Escritura del CI (4 hs)
  - 6.3. Primer Envío del protocolo y el CI a comité de bioética externos (CBE) para su revisión (40 hs)

- 6.4. Corrección del protocolo y CI a partir de la devolución del CBE (8 hs)
- 6.5. Segundo Envío del protocolo y el CI a CBE para su aprobación definitiva (40 hs)
- 7. Ensayo integral de funcionamiento del dispositivo (95 hs)
  - 7.1. Implementación integral del dispositivo (20 hs)
  - 7.2. Mediciones sobre circuitos de componentes pasivos R-C (2 hs)
  - 7.3. Análisis de mediciones en circuito R-C (2 hs)
  - 7.4. Mediciones sobre sistemas biológicos ex-vivo (3 hs)
  - 7.5. Análisis de mediciones en sistemas biológicos ex-vivo (3 hs)
  - 7.6. Mediciones sobre voluntarios humanos (40 hs)
  - 7.7. Análisis de mediciones sobre seres humanos (25 hs)

Cantidad total de horas: 668.

## 7. Diagrama de Activity On Node

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

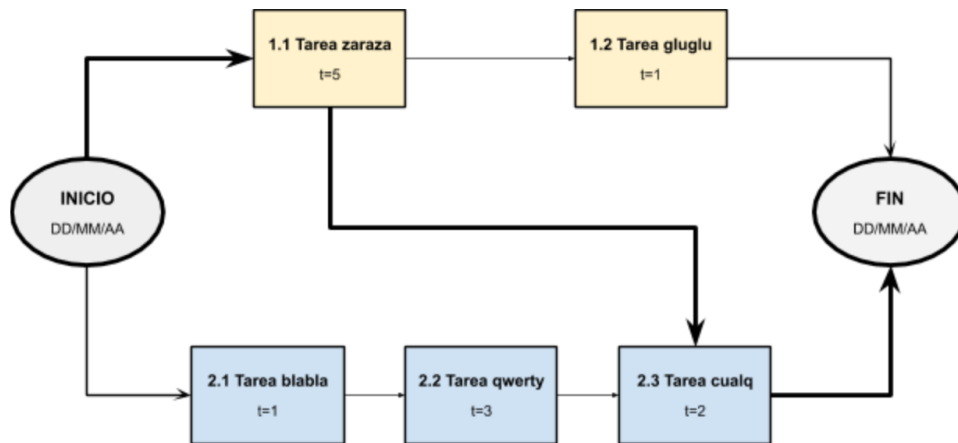


Figura 2: Diagrama en *Activity on Node*

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:

## 8. Diagrama de Gantt

ANTONIO: Aclarar porque hay un bache de 3 meses (entre fase de inicio y fase de ejecución). Utilizar el software Ganttter for Google Drive o alguno similar para dibujar el diagrama de Gantt.

Existen muchos programas y recursos *online* para hacer diagramas de gantt, entre las 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.

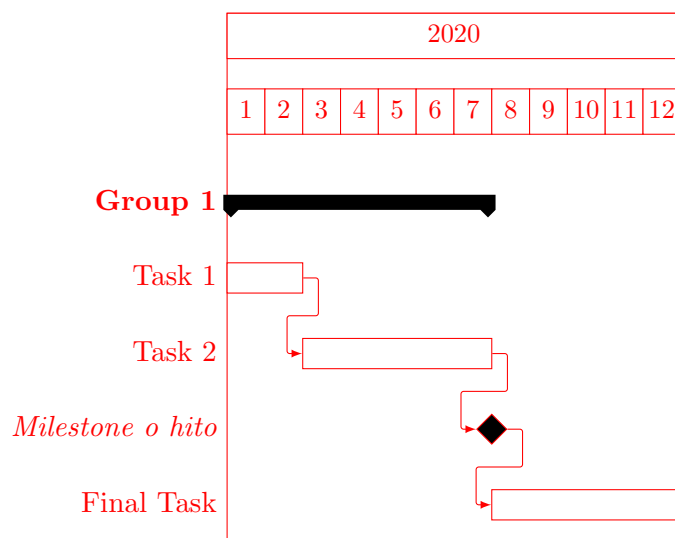


Figura 3: Diagrama de gantt de ejemplo

## 9. Matriz de uso de recursos de materiales

Código WBS	Nombre tarea	Recursos requeridos (horas)			
		Material 1	Material 2	Material 3	Material 4

## 10. 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			

## 11. Matriz de asignación de responsabilidades

Establecer la matriz de asignación de responsabilidades y el manejo de la autoridad completando la siguiente tabla:

Código WBS	Nombre de la tarea	Listar todos los nombres y roles del proyecto			
		Responsable	Orientador	Equipo	Cliente
		Antonio H. Dell'Osa	Antonio H. Dell'Osa	Nombre de alguien	Dr. Fernando Santiago

Referencias:

- P = Responsabilidad Primaria
- S = Responsabilidad Secundaria
- A = Aprobación
- I = Informado
- C = Consultado

Una de las columnas debe ser para el Director, ya que se supone que participará en el proyecto. A su vez se debe cuidar que no queden muchas tareas seguidas sin "A" o "I".

Importante: es redundante poner "I/A" o "I/C", porque para aprobarlo o responder consultas primero la persona debe ser informada.

## 12. 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)

- 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)

### 13. Gestión de la calidad

Para cada uno de los requerimientos del proyecto indique:

- Req #1: Copiar acá el requerimiento.  
Verificación y validación:

- 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, etc.

## 14. Comunicación del proyecto

El plan de comunicación del proyecto es el siguiente:

PLAN DE COMUNICACIÓN DEL PROYECTO					
¿Qué comunicar?	Audiencia	Propósito	Frecuencia	Método de comunicac.	Responsable

## 15. Gestión de Compras

En caso de tener que comprar elementos o contratar servicios: a) Explique con qué criterios elegiría a un proveedor. b) Redacte el Statement of Work correspondiente.

## 16. Seguimiento y control

Para cada tarea del proyecto establecer la frecuencia y los indicadores con los se seguirá su avance y quién será el responsable de hacer dicho seguimiento y a quién debe comunicarse la situación (en concordancia con el Plan de Comunicación del proyecto).

El indicador de avance tiene que ser algo medible, mejor incluso si se puede medir en % de avance. Por ejemplo, se pueden indicar en esta columna cosas como “cantidad de conexiones ruteadas” o “cantidad de funciones implementadas”, pero no algo genérico y ambiguo como “%”, porque el lector no sabe porcentaje de qué cosa.

## 17. 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.

SEGUIMIENTO DE AVANCE					
Tarea del WBS	Indicador de avance	Frecuencia de reporte	Resp. de seguimiento	Persona a ser informada	Método de comunic.

- Identificación de las técnicas y procedimientos útiles e inútiles que se utilizaron, 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.