



# MAESTRÍA EN INTERNET DE LAS COSAS

## MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

### **Evaluador de microcontroladores para misiones espaciales**

#### **Autor:**

**Esp. Ing. Gonzalo Nahuel Vaca**

#### Director:

Ing. Roberto Cibils (INVAP)

#### Codirector:

Ing. Damian Rosetani (INVAP)

#### Jurados:

Mg. Ing. Iván Andrés León Vásquez (INVAP)

??? Rodrigo Cardenas (???)

Esp. Ing. Pablo Almada (FIUBA-UTN)

*Este trabajo fue realizado en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires,  
entre marzo de 2021 y junio de 2022.*



## *Resumen*

Esta memoria explica el trabajo realizado para INVAP SE en el área de la tecnología aeroespacial. Se realizó una herramienta que simula los efectos de la radiación cósmica en un microcontrolador.

La herramienta sirve para abaratar el costo de la producción de satélites y aumentar su confiabilidad. Las simulaciones permiten evaluar técnicas de mitigación de errores y componentes no calificados para uso espacial. Para realizar este trabajo se valió de la teoría de arquitecturas de microcontroladores y sus protocolos de depuración.



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>1. Introducción general</b>	<b>1</b>
1.1. INVAP SE . . . . .	1
1.2. Radiación cósmica y sus efectos . . . . .	3
1.3. Calificación espacial e iniciativa <i>new space</i> . . . . .	3
1.4. Estado del arte . . . . .	3
1.5. Alcance del trabajo . . . . .	3
<b>2. Introducción específica</b>	<b>7</b>
2.1. Estilo y convenciones . . . . .	7
2.1.1. Uso de mayúscula inicial para los título de secciones . . . . .	7
2.1.2. Este es el título de una subsección . . . . .	7
2.1.3. Figuras . . . . .	8
2.1.4. Tablas . . . . .	9
2.1.5. Ecuaciones . . . . .	10
<b>3. Diseño e implementación</b>	<b>13</b>
3.1. Análisis del software . . . . .	13
<b>4. Ensayos y resultados</b>	<b>15</b>
4.1. Pruebas funcionales del hardware . . . . .	15
<b>5. Conclusiones</b>	<b>17</b>
5.1. Conclusiones generales . . . . .	17
5.2. Próximos pasos . . . . .	17
<b>Bibliografía</b>	<b>19</b>



# Índice de figuras

1.1. Reactor nuclear OPAL[1]. . . . .	1
1.2. Radar primario RPA[1]. . . . .	1
1.3. Satélite SAOCOM[1]. . . . .	2
1.4. Capas magnéticas de la tierra y viento solar[2]. . . . .	2
1.5. Ejemplo simplificado de <i>bit flip</i> en un bloque SDRAM[3]. . . . .	3
1.6. Gráfico Weibull de expectativa de vida <i>Starlink</i> [4]. . . . .	4
1.7. Proyección de la constelación <i>Starlink</i> [4]. . . . .	4
1.8. Cámara de pruebas de iones pesados[5]. . . . .	5
2.1. Ilustración del cuadrado azul que se eligió para el diseño del logo. . . . .	8
2.2. Imagen tomada de la página oficial del procesador <sup>1</sup> . . . . .	9
2.3. ¿Por qué de pronto aparece esta figura? . . . . .	9
2.4. Tres gráficos simples . . . . .	9





# Índice de tablas

1.1. Efectos de la radiación cósmica . . . . .	3
1.2. Cinturón de Van Allen . . . . .	5
1.3. Proyección de <i>debris</i> . . . . .	5
1.4. Comparación de métodos de simulación . . . . .	5
2.1. caption corto . . . . .	10



*Dedicado a mi hija Helena*



# Capítulo 1

## Introducción general

### 1.1. INVAP SE



FIGURA 1.1. Reactor nuclear OPAL[1].

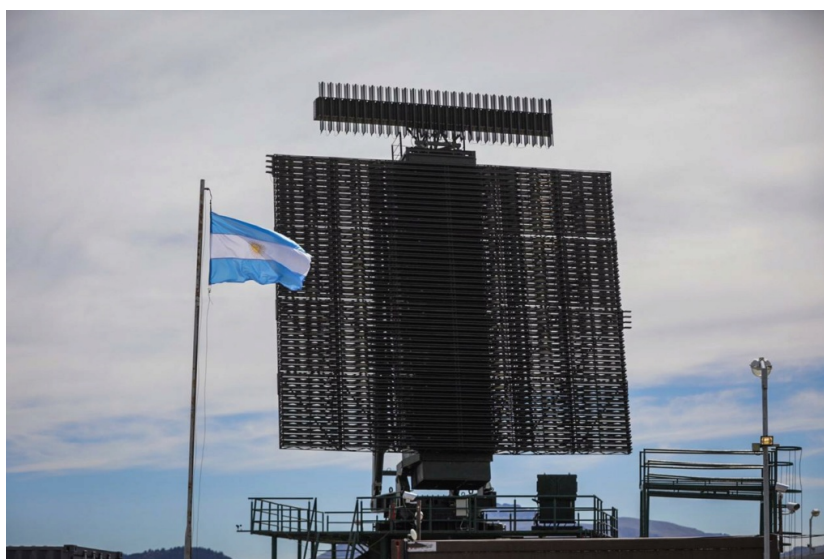


FIGURA 1.2. Radar primario RPA[1].



FIGURA 1.3. Satélite SAOCOM[1].

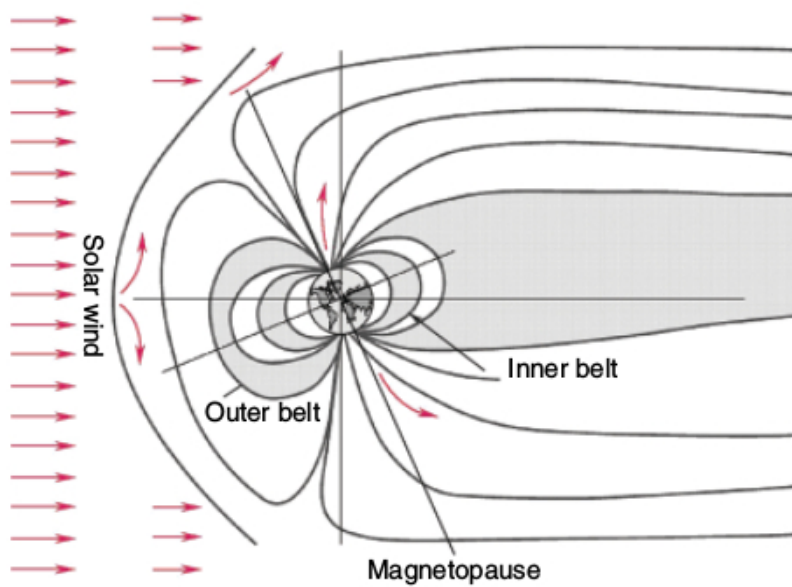
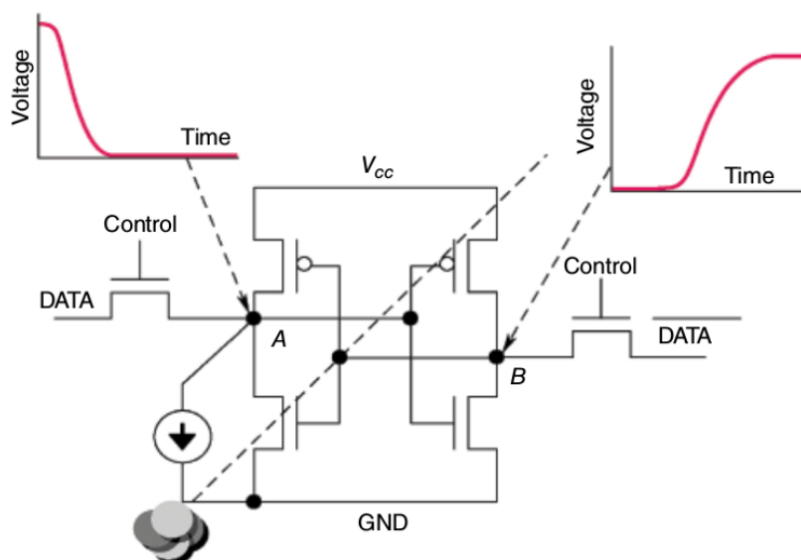


FIGURA 1.4. Capas magnéticas de la tierra y viento solar[2].

TABLA 1.1. Efectos producidos por la radiación cósmica[2]

Evento	Acrónimo	Efecto
Latch-up	SEL	Pico de corriente
Upset	SEU	Alteración de datos
Functional Interrupt	SEFI	Cambios en la configuración
Transient	SET	Pico de tensión
Burnout	SEB	Activación de transistores parásitos
Gate Rapture	SEGR	Generación de plasma de alta densidad

FIGURA 1.5. Ejemplo simplificado de *bit flip* en un bloque SDRAM[3].

## 1.2. Radiación cósmica y sus efectos

## 1.3. Calificación espacial e iniciativa *new space*

## 1.4. Estado del arte

## 1.5. Alcance del trabajo

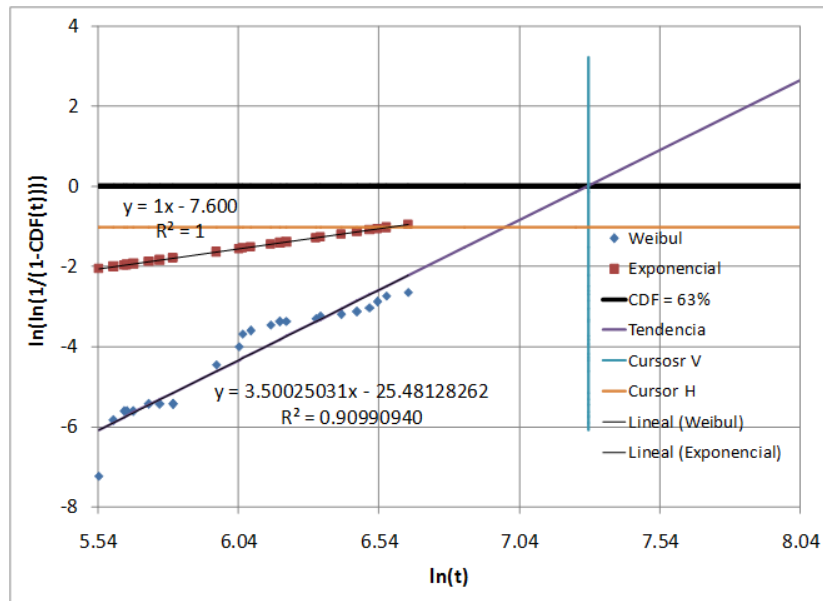
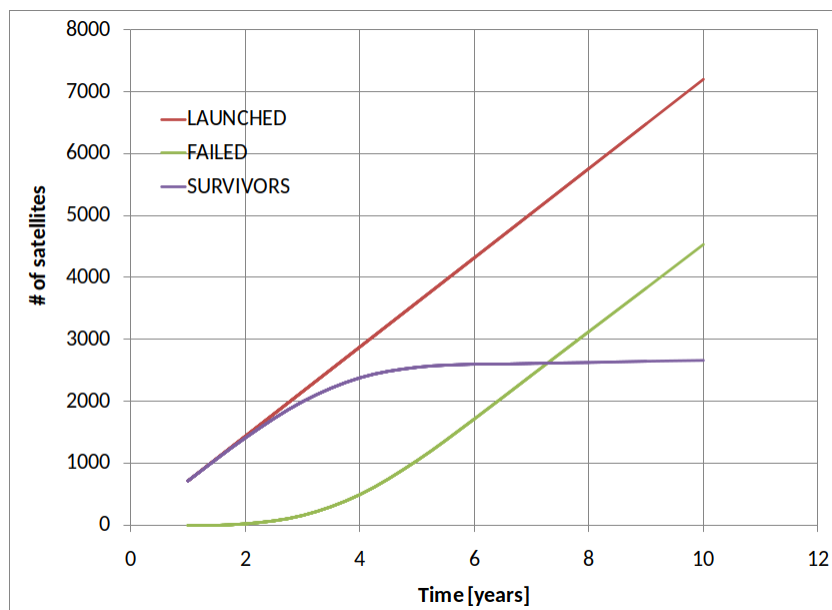
FIGURA 1.6. Gráfico Weibull de expectativa de vida *Starlink*[4].FIGURA 1.7. Proyección de la constelación *Starlink*[4].



TABLA 1.2. Cinturón de Van Allen[2]

Cinturon	Frontera	Partícula dominante
Interior	1.2 - 2.5 radios terrestres	Protones de alta energía
Exterior	2.8 - 12 radios terrestres	Electrones de alta energía

TABLA 1.3. Proyección de *debris* de *Starlink*[4]

Lanzamientos	Satélites	Total lanzados	Población	Debris
12	60	7200	2704	4046
12	180	21600	8105	12146
12	400	48000	18007	26994
180	60	108000	40000	61200
60	180	108000	40000	61200
27	400	108000	40000	61200

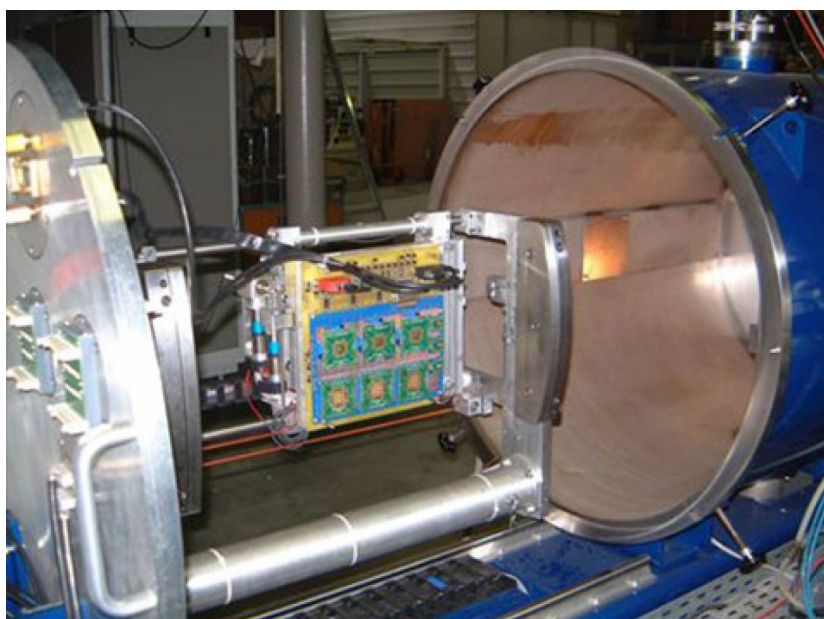


FIGURA 1.8. Cámara de pruebas de iones pesados[5].

TABLA 1.4. Comparación de métodos de simulación[6]

Método	Eficiencia	Costo	Limitación
Software	Baja	Bajo	Ciclos de CPU
Hardware	Media	Medio	Acceso al integrado
Radiación	Alta	Alto	Control del ensayo



## Capítulo 2

# Introducción específica

Todos los capítulos deben comenzar con un breve párrafo introductorio que indique cuál es el contenido que se encontrará al leerlo. La redacción sobre el contenido de la memoria debe hacerse en presente y todo lo referido al proyecto en pasado, siempre de modo impersonal.

### 2.1. Estilo y convenciones

#### 2.1.1. Uso de mayúscula inicial para los título de secciones

Si en el texto se hace alusión a diferentes partes del trabajo referirse a ellas como capítulo, sección o subsección según corresponda. Por ejemplo: “En el capítulo 1 se explica tal cosa”, o “En la sección 2.1 se presenta lo que sea”, o “En la subsección 2.1.2 se discute otra cosa”.

Cuando se quiere poner una lista tabulada, se hace así:

- Este es el primer elemento de la lista.
- Este es el segundo elemento de la lista.

Notar el uso de las mayúsculas y el punto al final de cada elemento.

Si se desea poner una lista numerada el formato es este:

1. Este es el primer elemento de la lista.
2. Este es el segundo elemento de la lista.

Notar el uso de las mayúsculas y el punto al final de cada elemento.

#### 2.1.2. Este es el título de una subsección

Se recomienda no utilizar **texto en negritas** en ningún párrafo, ni tampoco texto subrayado. En cambio sí se debe utilizar *texto en itálicas* para palabras en un idioma extranjero, al menos la primera vez que aparecen en el texto. En el caso de palabras que estamos inventando se deben utilizar “comillas”, así como también para citas textuales. Por ejemplo, un *digital filter* es una especie de “selector” que permite separar ciertos componentes armónicos en particular.

La escritura debe ser impersonal. Por ejemplo, no utilizar “el diseño del firmware lo hice de acuerdo con tal principio”, sino “el firmware fue diseñado utilizando tal principio”.

El trabajo es algo que al momento de escribir la memoria se supone que ya está concluido, entonces todo lo que se refiera a hacer el trabajo se narra en tiempo pasado, porque es algo que ya ocurrió. Por ejemplo, "se diseñó el firmware empleando la técnica de test driven development".

En cambio, la memoria es algo que está vivo cada vez que el lector la lee. Por eso transcurre siempre en tiempo presente, como por ejemplo:

"En el presente capítulo se da una visión global sobre las distintas pruebas realizadas y los resultados obtenidos. Se explica el modo en que fueron llevados a cabo los test unitarios y las pruebas del sistema".

Se recomienda no utilizar una sección de glosario sino colocar la descripción de las abreviaturas como parte del mismo cuerpo del texto. Por ejemplo, RTOS (*Real Time Operating System*, Sistema Operativo de Tiempo Real) o en caso de considerarlo apropiado mediante notas a pie de página.

Si se desea indicar alguna página web utilizar el siguiente formato de referencias bibliográficas, dónde las referencias se detallan en la sección de bibliografía de la memoria, utilizando el formato establecido por IEEE en [7]. Por ejemplo, "el presente trabajo se basa en la plataforma EDU-CIAA-NXP [8], la cual...".

### 2.1.3. Figuras

Al insertar figuras en la memoria se deben considerar determinadas pautas. Para empezar, usar siempre tipografía claramente legible. Luego, tener claro que **es incorrecto** escribir por ejemplo esto: "El diseño elegido es un cuadrado, como se ve en la siguiente figura:"



La forma correcta de utilizar una figura es con referencias cruzadas, por ejemplo: "Se eligió utilizar un cuadrado azul para el logo, como puede observarse en la figura 2.1".



FIGURA 2.1. Ilustración del cuadrado azul que se eligió para el diseño del logo.

El texto de las figuras debe estar siempre en español, excepto que se decida reproducir una figura original tomada de alguna referencia. En ese caso la referencia de la cual se tomó la figura debe ser indicada en el epígrafe de la figura e incluida como una nota al pie, como se ilustra en la figura 2.2.

FIGURA 2.2. Imagen tomada de la página oficial del procesador<sup>1</sup>.

La figura y el epígrafe deben conformar una unidad cuyo significado principal pueda ser comprendido por el lector sin necesidad de leer el cuerpo central de la memoria. Para eso es necesario que el epígrafe sea todo lo detallado que corresponda y si en la figura se utilizan abreviaturas entonces aclarar su significado en el epígrafe o en la misma figura.



FIGURA 2.3. ¿Por qué de pronto aparece esta figura?

Nunca colocar una figura en el documento antes de hacer la primera referencia a ella, como se ilustra con la figura 2.3, porque sino el lector no comprenderá por qué de pronto aparece la figura en el documento, lo que distraerá su atención.

Otra posibilidad es utilizar el entorno *subfigure* para incluir más de una figura, como se puede ver en la figura 2.4. Notar que se pueden referenciar también las figuras internas individualmente de esta manera: 2.4a, 2.4b y 2.4c.



(A) Un caption.



(B) Otro.



(C) Y otro más.

FIGURA 2.4. Tres gráficos simples

El código para generar las imágenes se encuentra disponible para su reutilización en el archivo **Chapter2.tex**.

#### 2.1.4. Tablas

Para las tablas utilizar el mismo formato que para las figuras, sólo que el epígrafe se debe colocar arriba de la tabla, como se ilustra en la tabla 2.1. Observar que sólo algunas filas van con líneas visibles y notar el uso de las negritas para los encabezados. La referencia se logra utilizando el comando `\ref{<label>}` donde label debe estar definida dentro del entorno de la tabla.

<sup>1</sup>Imagen tomada de <https://goo.gl/images/i7C70w>

```

\begin{table}[h]
\centering
\caption[caption corto]{caption largo más descriptivo}
\begin{tabular}{l c c}
\toprule
\textbf{Especie} & \textbf{Tamaño} & \textbf{Valor}\\
\midrule
Amphiprion Ocellaris & 10 cm & \$ 6.000 \\
Hepatus Blue Tang & 15 cm & \$ 7.000 \\
Zebrasoma Xanthurus & 12 cm & \$ 6.800 \\
\bottomrule
\hline
\end{tabular}
\label{tab:peces}
\end{table}

```

TABLA 2.1. caption largo más descriptivo

Especie	Tamaño	Valor
Amphiprion Ocellaris	10 cm	\$ 6.000
Hepatus Blue Tang	15 cm	\$ 7.000
Zebrasoma Xanthurus	12 cm	\$ 6.800

En cada capítulo se debe reiniciar el número de conteo de las figuras y las tablas, por ejemplo, figura 2.1 o tabla 2.1, pero no se debe reiniciar el conteo en cada sección. Por suerte la plantilla se encarga de esto por nosotros.

### 2.1.5. Ecuaciones

Al insertar ecuaciones en la memoria dentro de un entorno *equation*, éstas se numeran en forma automática y se pueden referir al igual que como se hace con las figuras y tablas, por ejemplo ver la ecuación 2.1.

$$ds^2 = c^2 dt^2 \left( \frac{d\sigma^2}{1 - k\sigma^2} + \sigma^2 [d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2] \right) \quad (2.1)$$

Es importante tener presente que si bien las ecuaciones pueden ser referidas por su número, también es correcto utilizar los dos puntos, como por ejemplo “la expresión matemática que describe este comportamiento es la siguiente:”

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V(\mathbf{r})\Psi = -i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (2.2)$$

Para generar la ecuación 2.1 se utilizó el siguiente código:

```

\begin{equation}
\label{eq:metric}
ds^2 = c^2 dt^2 \left( \frac{d\sigma^2}{1-k\sigma^2} + \right.
\sigma^2 \left[ d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2 \right] \left. \right)
\end{equation}

```

Y para la ecuación 2.2:

```
\begin{equation}
\label{eq:schrodinger}
\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\Psi + V(\mathbf{r})\Psi =
-i\hbar \frac{\partial\Psi}{\partial t}
\end{equation}
```





## Capítulo 3

# Diseño e implementación

### 3.1. Análisis del software

La idea de esta sección es resaltar los problemas encontrados, los criterios utilizados y la justificación de las decisiones que se hayan tomado.

Se puede agregar código o pseudocódigo dentro de un entorno `lstlisting` con el siguiente código:

```
\begin{lstlisting}[caption= "un epígrafe descriptivo"]
las líneas de código irían aquí...
\end{lstlisting}
```

A modo de ejemplo:

```
1 #define MAX_SENSOR_NUMBER 3
2 #define MAX_ALARM_NUMBER 6
3 #define MAX_ACTUATOR_NUMBER 6
4
5 uint32_t sensorValue[MAX_SENSOR_NUMBER];
6 FunctionalState alarmControl[MAX_ALARM_NUMBER]; //ENABLE or DISABLE
7 state_t alarmState[MAX_ALARM_NUMBER]; //ON or OFF
8 state_t actuatorState[MAX_ACTUATOR_NUMBER]; //ON or OFF
9
10 void vControl() {
11
12     initGlobalVariables();
13
14     period = 500 ms;
15
16     while(1) {
17
18         ticks = xTaskGetTickCount();
19
20         updateSensors();
21
22         updateAlarms();
23
24         controlActuators();
25
26         vTaskDelayUntil(&ticks, period);
27     }
28 }
```

CÓDIGO 3.1. Pseudocódigo del lazo principal de control.



## Capítulo 4

# Ensayos y resultados

### 4.1. Pruebas funcionales del hardware

La idea de esta sección es explicar cómo se hicieron los ensayos, qué resultados se obtuvieron y analizarlos.



## Capítulo 5

# Conclusiones

### 5.1. Conclusiones generales

La idea de esta sección es resaltar cuáles son los principales aportes del trabajo realizado y cómo se podría continuar. Debe ser especialmente breve y concisa. Es buena idea usar un listado para enumerar los logros obtenidos.

Algunas preguntas que pueden servir para completar este capítulo:

- ¿Cuál es el grado de cumplimiento de los requerimientos?
- ¿Cuán fielmente se pudo seguir la planificación original (cronograma incluido)?
- ¿Se manifestó algunos de los riesgos identificados en la planificación? ¿Fue efectivo el plan de mitigación? ¿Se debió aplicar alguna otra acción no contemplada previamente?
- Si se debieron hacer modificaciones a lo planificado ¿Cuáles fueron las causas y los efectos?
- ¿Qué técnicas resultaron útiles para el desarrollo del proyecto y cuáles no tanto?

### 5.2. Próximos pasos

Acá se indica cómo se podría continuar el trabajo más adelante.



# Bibliografía

- [1] INVAP. *INVAP SE*. <https://www.invap.com.ar/>. Mayo de 2022. (Visitado 01-05-2022).
- [2] spaceradiation.eu. *Structure of space radiation*. <https://spaceradiation.eu/structure-of-space-radiation/>. Mayo de 2022. (Visitado 01-05-2022).
- [3] spaceradiation.eu. *Effects of space radiation on electronic devices*. <https://spaceradiation.eu/effects-of-space-radiation-on-electronic-devices/>. Mayo de 2022. (Visitado 01-05-2022).
- [4] Roberto Cibils. «Don't look up. Starlink project: bold venture or economic bubble?» En: *Mission Project Workshop 24/25 feb 2022* (2022).
- [5] ucl.ac.uk. *Heavy ion latchup tests in louvain la neuve*. [https://www.ucl.ac.uk/mssl/sites/mssl/files/styles/owl\\_carousel/public/heavy\\_ion\\_latchup\\_tests\\_in\\_louvain\\_la\\_neuve.jpg?itok=1dDe-TEo](https://www.ucl.ac.uk/mssl/sites/mssl/files/styles/owl_carousel/public/heavy_ion_latchup_tests_in_louvain_la_neuve.jpg?itok=1dDe-TEo). Mayo de 2022. (Visitado 01-05-2022).
- [6] Raoul Velazco. «Inyección de fallos para el análisis de la sensibilidad a los errores transitorios, "soft errors", provocados por las radiaciones en circuitos integrados». En: *Architectures Robustes of Integrated circuit and systems, Grenoble - France* (2014).
- [7] IEEE. *IEEE Citation Reference*. 1.<sup>a</sup> ed. IEEE Publications, 2016. URL: <http://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf> (visitado 26-09-2016).
- [8] Proyecto CIAA. *Computadora Industrial Abierta Argentina*. Visitado el 2016-06-25. 2014. URL: <http://proyecto-ciaa.com.ar/devwiki/doku.php?id=start>.