



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 S.E.)

Codirector:

Ing. Damian Rosetani (INVAP S.E.)

Jurados:

Mg. Ing. Iván Andrés León Vásquez (INVAP S.E.)

Mg. Ing. Rodrigo Cardenas (FIUBA)

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 S.E. 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

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. El espacio como recurso estratégico	1
1.2. Radiación cósmica y sus efectos	2
1.3. Calificación espacial e iniciativa <i>new space</i>	4
1.4. Estado del arte	6
1.5. Alcance del trabajo	7
2. Introducción específica	9
2.1. Arquitectura del dispositivo bajo prueba	9
2.2. Servidores y sondas de depuración	10
2.3. Periféricos de interés	12
2.4. Requerimientos del cliente	12
3. Diseño e implementación	15
3.1. Autovalidación del dispositivo bajo prueba	15
3.2. Interfaz de programación de aplicaciones	19
3.3. Sistema de inyección de soft-errors	19
3.4. Biblioteca para el desarrollo de ensayos	19
4. Ensayos y resultados	23
4.1. Laboratorio remoto	23
4.2. Ensayos de inyector	23
4.3. Validación con el cliente	23
5. Conclusiones	25
5.1. Resultados obtenidos	25
5.2. Trabajo futuro	25
Bibliografía	27

Índice de figuras

1.1. Satélite SAOCOM ¹	2
1.2. Capas magnéticas de la tierra y viento solar ²	3
1.3. Ejemplo simplificado de <i>bit flip</i> en un bloque <i>SDRAM</i> ³	3
1.4. Estadísticas de la constelación <i>Starlink</i> ⁴	5
1.5. Cámara de pruebas de iones pesados ⁵	6
1.6. Diagrama simplificado del dispositivo bajo prueba.	7
1.7. Diagrama simplificado del sistema de inyección de errores.	7
2.1. Diagrama de la arquitectura <i>Cortex M4</i> ⁶	9
2.2. Diagrama del módulo <i>CoreSight</i> ⁷	10
2.3. Conexión de una sesión de depuración.	11
2.4. Sonda de depuración <i>Segger J-32</i> ⁸	11
3.1. Diagrama en bloques del firmware de autovalidación.	15
3.2. Flujo del firmware de autovalidación.	16
3.3. Diagrama de <i>loopback</i> del periférico CAN[9].	16
3.4. Fotografía del dispositivo bajo prueba.	17
3.5. Flujo de una sesión de depuración.	18
3.6. Diagrama en bloques del sistema de inyección de soft-errors.	20
3.7. Flujo de tareas concurrentes.	21
3.8. Gráfico de distribución Poisson[10].	22
4.1. Diagrama en bloques del laboratorio remoto.	23
4.2. Dispositivo alternativo <i>NUCLEO-F429ZI</i>	24

Índice de tablas

1.1. Cinturón de Van Allen	2
1.2. Efectos de la radiación cósmica	4
1.3. Proyección de <i>debris</i>	4
1.4. Comparación de métodos de simulación	6
2.1. Servidores de depuración	12
2.2. Resumen de periféricos	12
3.1. Estrategias de depuración	15
3.2. Funcionalidades abstraídas	19
4.2. Resumen de ensayos	24
4.3. Resumen de la validación con el cliente	24

Dedicado a mi hija Helena

Capítulo 1

Introducción general

Este capítulo presenta de forma breve el contexto del trabajo realizado. Se explica la problemática solucionada y los conceptos necesarios para la lectura de la memoria.

1.1. El espacio como recurso estratégico

El espacio exterior es un recurso estratégico para el bienestar de la humanidad. Dado que, su explotación permite mejorar la producción de bienes y servicios. Además, provee datos de valor científico que incrementan la calidad de vida de las personas.

El marco jurídico que regula la explotación del recurso es el Tratado sobre el espacio exterior de 1967. Del cual, la República Argentina es miembro desde el 27 de enero de ese año. Los países pueden reclamar cualquiera de las órbitas disponibles pero tienen la obligación de hacer uso dentro de un margen de tiempo determinado. Luego, si el país no ocupó la órbita pierde el derecho a usarla.

El mercado de la explotación espacial está compuesto de estados y empresas. Siendo las últimas quienes adquirieron el protagonismo en el siglo XXI. El marco jurídico y la competencia en este rubro empuja a las compañías a innovar de forma permanente. En particular, con nuevas técnicas y tecnologías que permitan abaratar el costo de las misiones.

El cliente de este trabajo es INVAP S.E. y es una empresa de la provincia de Río Negro. La compañía es modelo en su tipo y realiza proyectos tecnológicos complejos en áreas como: reactores nucleares, satélites y radares. En la figura 1.1 se puede observar un satélite realizado por la empresa.

FIGURA 1.1. Satélite SAOCOM¹.

1.2. Radiación cósmica y sus efectos

El sol produce partículas de luz e iones pesados que de forma conjunta se denominan viento solar. Este fenómeno es atenuado antes de llegar a la superficie del planeta gracias al campo magnético terrestre. Como se puede ver en la figura 1.2, las partículas son desviadas por el campo. Luego, este queda deformado por el viento solar y se genera una magnetosfera asimétrica. En la tabla 1.1 se puede observar las características de la asimetría.

TABLA 1.1. Cinturón de Van Allen [2].

Cinturón	Frontera	Partícula dominante
Interior	1,2 - 2,5 radios terrestres	Protones de alta energía
Exterior	2,8 - 12 radios terrestres	Electrones de alta energía

La electrónica de los satélites tiene un alto grado de exposición al viento solar. Esto significa que la probabilidad de incidencia de una partícula cargada en el circuito es mayor. La incidencia de una partícula genera una traza densa de pares electrón-hueco en los semiconductores. Además, es posible que esta ionización cause un pulso transitorio de corriente. En la figura 1.3 se puede ver el efecto de la radiación sobre los transistores de un integrado.

Los efectos de la radiación cósmica sobre el circuito pueden ser transitorios o permanentes. Los permanentes se deben a la destrucción de una parte del circuito. Esta destrucción es producto de: el disparo de componentes activos parásitos o la generación de plasma dentro del encapsulado. Finalmente, en la tabla 1.2 se puede ver un resumen de los tipos de errores generados por la radiación cósmica.

¹Imagen tomada de la página oficial de INVAP S.E. [1]

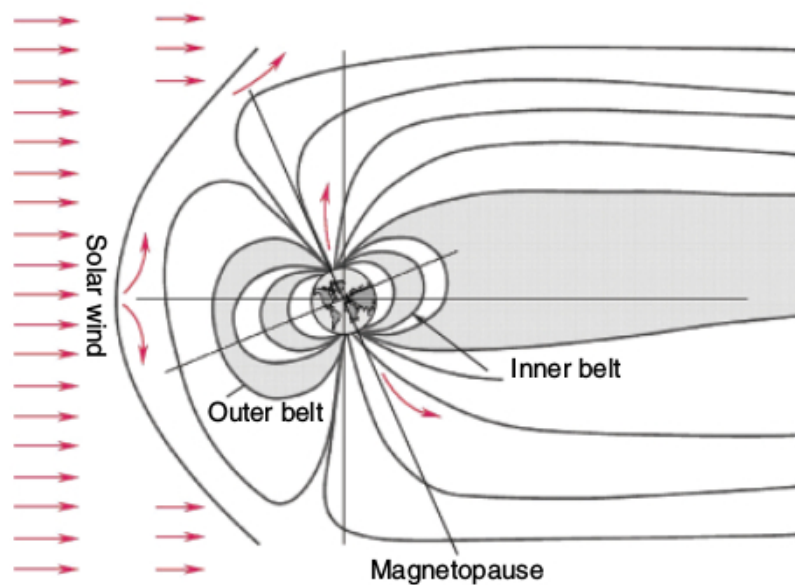
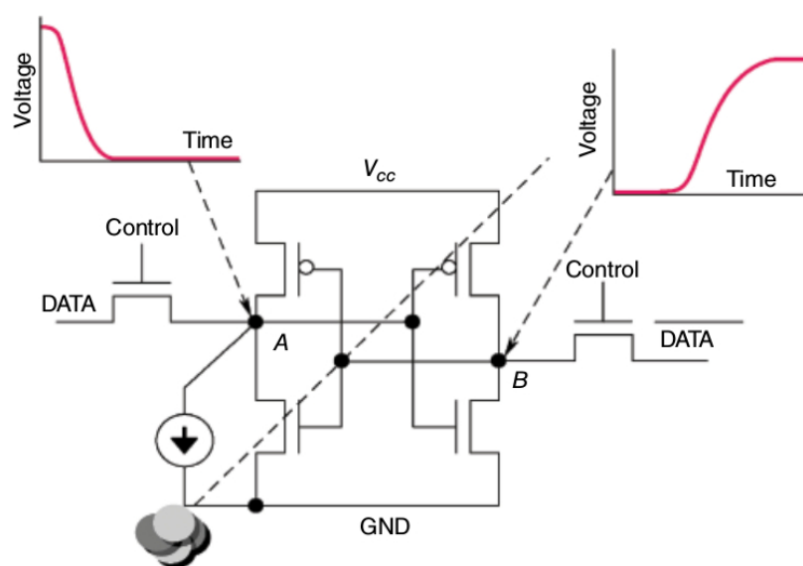
FIGURA 1.2. Capas magnéticas de la tierra y viento solar².FIGURA 1.3. Ejemplo simplificado de *bit flip* en un bloque SDRAM³.²Imagen tomada del artículo *Structure of space radiation* [2]³Imagen tomada del artículo *Effects of space radiation on electronic devices* [3]

TABLA 1.2. 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

1.3. Calificación espacial e iniciativa *new space*

A los efectos vistos en la sección 1.2 se suman: el estrés mecánico del lanzamiento y los cambios de temperatura en la órbita. Este ambiente genera la necesidad de utilizar componentes con calificación espacial. Para que un componente alcance la calificación espacial se debe someter a un largo y costoso proceso de acreditación. Luego, estos componentes adolecen de un elevado precio y atraso tecnológico frente a los del mercado masivo.

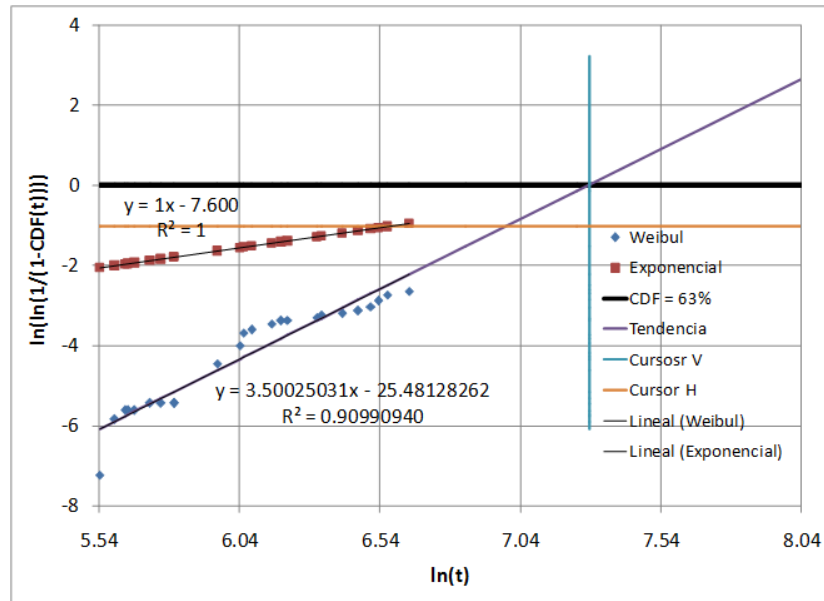
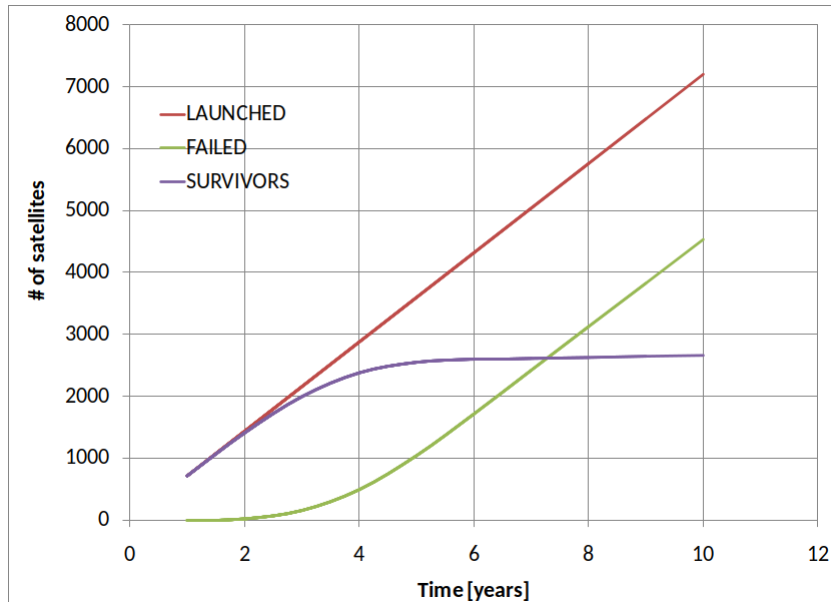
La irrupción del sector privado vista en la sección 1.1, trajo una nueva iniciativa comercial denominada *new space*. Esta iniciativa busca bajar los costos al utilizar componentes no calificados para su uso espacial. Además, existe la ventaja adicional de introducir tecnología de vanguardia.

El caso de *Starlink* es un ejemplo de *new space* particular. Su volumen de satélites lanzados permite realizar conclusiones estadísticas significativas. En particular, su poca capacidad para cumplir sus objetivos si se mantiene la actual tasa de mortalidad de sus satélites. En la figura 1.4 se puede observar que la constelación no logrará alcanzar la población deseada.

Al problema de población de *Starlink* se suma la gran cantidad de polución generada. Los satélites fuera de servicio no pueden ser desorbitados y persisten en forma de *debris*. Como se puede ver en la tabla 1.3, el volumen de basura generado es significativo.

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

(A) Gráfico Weibull de expectativa de vida *Starlink*.(B) Proyección de la constelación *Starlink*.FIGURA 1.4. Estadísticas de la constelación *Starlink*⁴.

Las conclusiones del caso *Starlink* muestran la importancia de tener herramientas para simular el ambiente espacial. En particular, los efectos de la radiación cósmica para poder probar las técnicas de mitigación de errores seleccionadas. Finalmente, este trabajo agrega valor al cliente al incrementar la confiabilidad de los satélites y evitar los problemas de la competencia.

⁴Imagen tomada de la publicación de Roberto Cibils [4].

1.4. Estado del arte

Los ensayos de pruebas de radiación en tierra tienen las siguientes estrategias:

- Ensayo por *software*: se introducen instrucciones espúreas en el código para generar errores.
- Ensayo por *hardware*: se conecta un dispositivo que introduce errores durante la ejecución del programa.
- Ensayo por radiación: se introduce el dispositivo bajo prueba en una cámara de iones pesados como se puede ver en la figura 1.5.

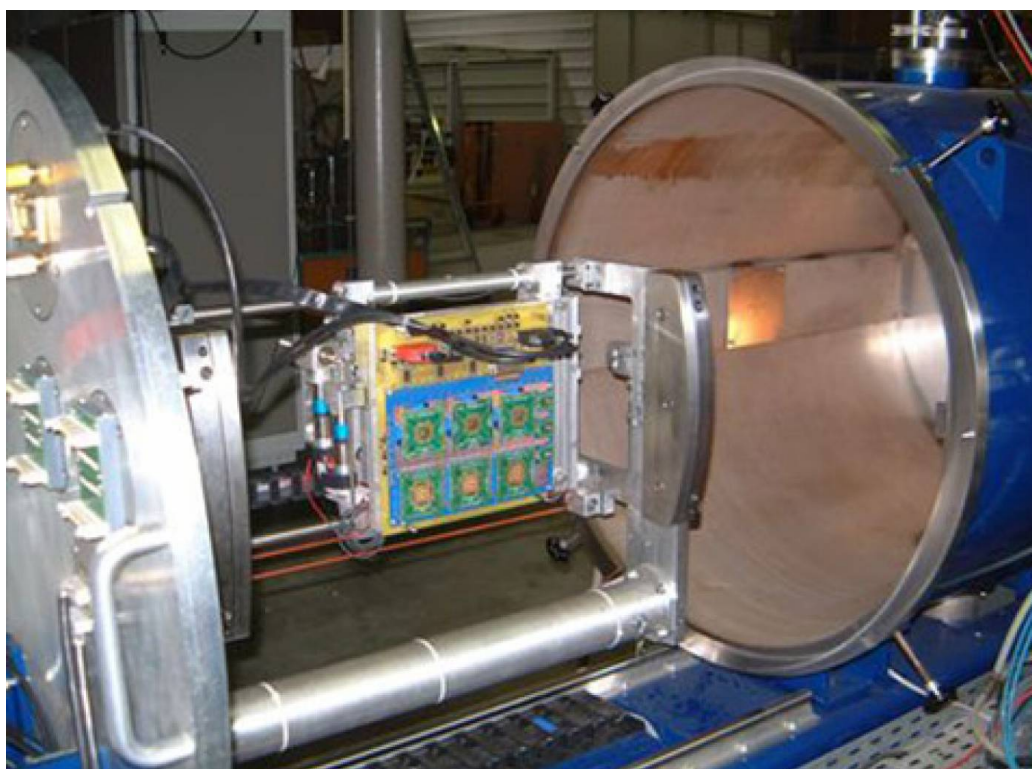


FIGURA 1.5. Cámara de pruebas de iones pesados⁵.

Los métodos de ensayos mencionados presentan compromisos de diseño como se puede ver en la tabla 1.4. El trabajo realizado es una solución del tipo ensayo por *hardware*.

TABLA 1.4. Comparación de métodos de simulación [6].

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

⁵Imagen tomada del sitio web ucl.ac.uk [5].

1.5. Alcance del trabajo

El trabajo realizado se divide en dos partes:

1. *Firmware* para el dispositivo bajo prueba.
2. Inyector de *soft-errors* por consola de comandos.

El *firmware* en el dispositivo bajo prueba tiene la misión de validar su funcionamiento. Esto se logró al verificar cada periférico de interés dentro del integrado. Luego, se generan reportes periódicos que se envían al inyector por consola de comandos. En la figura 1.6 se puede observar un diagrama en bloques simplificado.

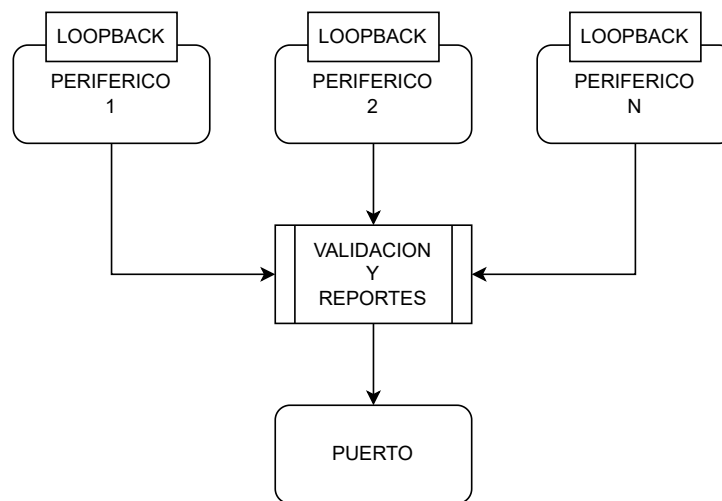


FIGURA 1.6. Diagrama simplificado del dispositivo bajo prueba.

El inyector por consola de comandos tiene la función de planificar los ensayos y gestionar la introducción de errores. En la figura 1.7 se puede ver como interactúan las partes del sistema.

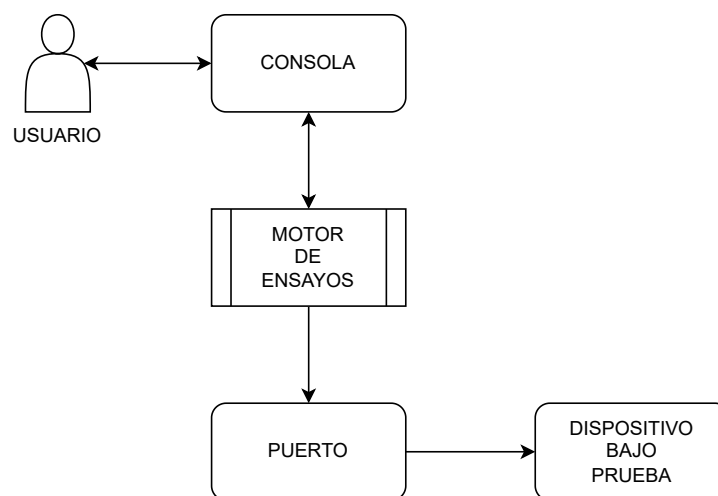


FIGURA 1.7. Diagrama simplificado del sistema de inyección de errores.

Capítulo 2

Introducción específica

En este capítulo se detallan las tecnologías que forman parte del trabajo. Son productos de terceros que se integran en las herramientas entregadas al cliente.

2.1. Arquitectura del dispositivo bajo prueba

El trabajo fue realizado para un tipo de microcontrolador específico. Su diseño forma parte de la familia *Cortex M* de la empresa *ARM*. En la figura 2.1 se puede observar un diagrama en bloques de la arquitectura.

Al fabricante del dispositivo bajo prueba se le impone respetar el mapa de memoria y registros del núcleo. Esto permitió construir un inyector de *soft-errors* genérico. Finalmente, la herramienta entregada funciona para cualquier integrado de la familia *Cortex M*.

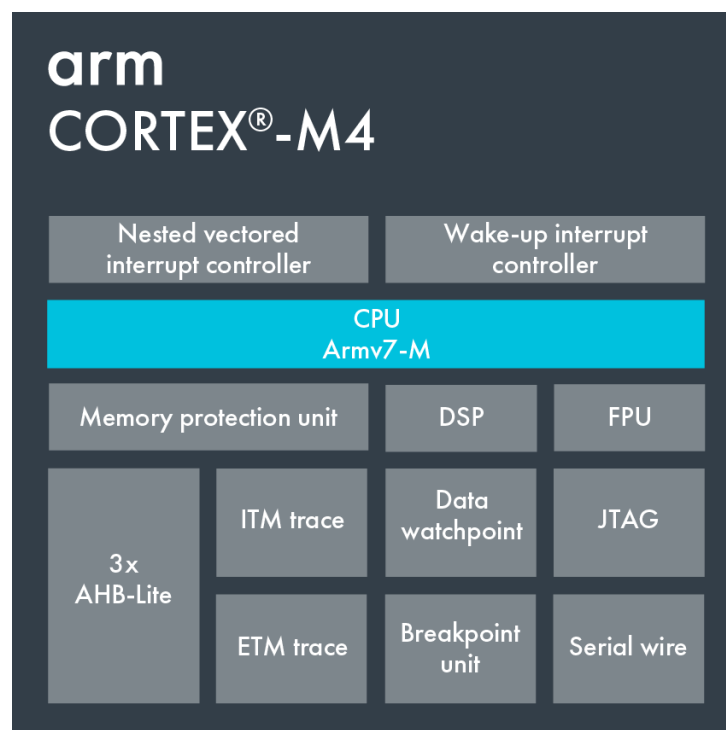


FIGURA 2.1. Diagrama de la arquitectura *Cortex M4*¹.

¹Imagen tomada de la página oficial de *ARM Developers*. [7]

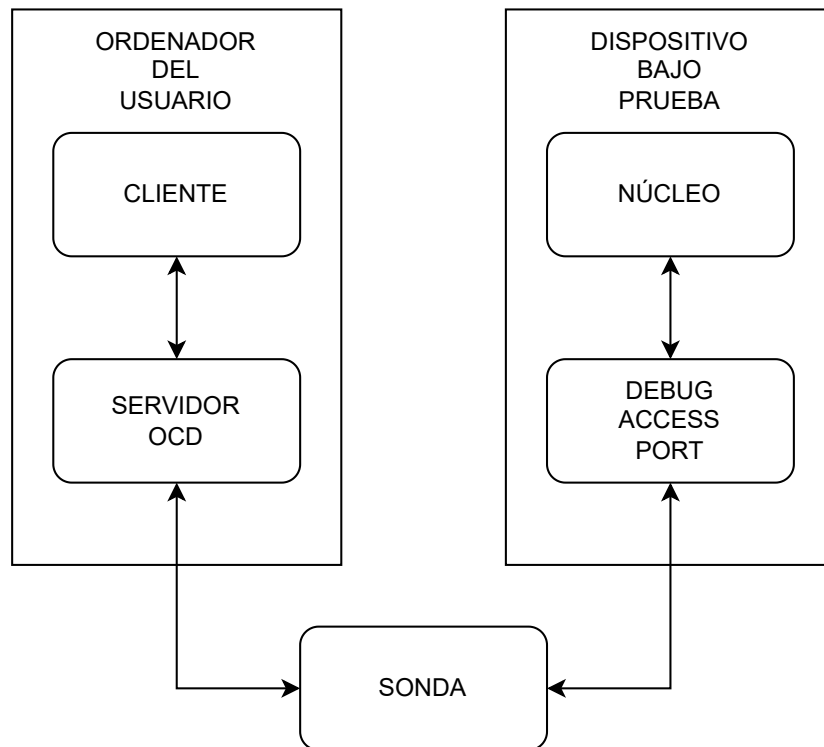


FIGURA 2.3. Conexión de una sesión de depuración.

Las sondas de depuración tienen el objetivo de conectar el *Debug Access Port* con el puerto del ordenador del usuario. Adaptan los niveles de tensión y los protocolos involucrados. Luego, permiten realizar una sesión de depuración, programar el dispositivo o verificar el estado de los componentes en la placa. En la figura 2.4 se puede ver la sonda provista por el cliente.

FIGURA 2.4. Sonda de depuración Segger J-32³.

Un servidor *On-chip debugger* tiene la misión de abstraer la conexión la sonda de depuración. Además, facilita el manejo del ciclo de vida de la sesión y permite usar *software* como *GNU Project debugger*. Finalmente, es la base de una pila de tecnologías que permite el uso de herramientas como *Eclipse IDE*. En la tabla 2.1 se puede observar un resumen de los servidores evaluados en el trabajo.

³Imagen tomada de <https://www.digikey.com/>

TABLA 2.1. Comparativa entre servidores de depuración

Servidor	API	Acceso	Licencia
OpenOCD	tcl	Registros y SDRAM	MIT
PyOCD	Python 3	Registros y SDRAM	Apache-2.0

2.3. Periféricos de interés

El dispositivo bajo prueba ofrece una variedad de periféricos para el desarrollo de aplicaciones. Sin embargo, el cliente manifestó interés solo en los que se nombran a continuación:

- CAN: este periférico permite al microcontrolador ser el dispositivo principal en una *Controller Area Network*. La red es de grado industrial y fue diseñada para gestionar una red de sensores en un ambiente automotriz.
- PIO: es el puerto de entradas y salidas digitales de propósito general. En el caso del dispositivo bajo prueba, el periférico permite usar circuitos anti rebote, *pull-up* y *pull-down* internos.
- SPI: el periférico permite realizar una conexión del tipo *Serial Peripheral Interface*. Esta conexión es sincrónica y solo apta para distancias cortas.
- UART: es un periférico que permite conectarse a puertos y controlar dispositivos serie.
- Watchdog: el periférico sirve para detectar un error de ejecución y reiniciar el microprocesador.

En la tabla 2.2 se resume la funcionalidad de cada uno de ellos.

TABLA 2.2. Resumen de periféricos

Periférico	Funcionalidad
CAN	Bus de comunicación de grado industrial
PIO	Entradas y salidas digitales
SPI	Interfaz de comunicación sincrónica
UART	Puerto para dispositivos serie
Watchdog	Detección de errores y reinicio del integrado

2.4. Requerimientos del cliente

Se realizaron una serie de reuniones con el cliente y se pudo definir los requerimientos del trabajo. A continuación se enumeran los principales:

1. Referentes al inyector por consola de comandos:
 - a) Generará de una interfaz de usuario.
 - b) Permitirá configurar el ensayo a realizar.
 - c) Observará la salida del dispositivo bajo prueba.
 - d) Inyectará *soft-errors* en el dispositivo bajo prueba.

- e) Persistirá las operaciones, entradas y salidas.
 - f) Generará informes del ensayo realizado.
2. Referentes al proceso del dispositivo bajo prueba:
- a) Verificará el estado de los periféricos del dispositivo bajo prueba.
 - b) Detectará si el dispositivo bajo prueba perdió su secuencia.
 - c) Generará reportes de estado de periféricos y secuencia.
 - d) Permitirá que inyector por consola de comandos configure el alcance de la secuencia.
 - e) Permitirá que inyector por consola de comandos maneje el flujo de su secuencia.

El cliente definió algunas restricciones para el desarrollo del sistema. Estas se enumeran a continuación:

- Utilización de un repositorio con control de versiones *Gitlab*.
- Documentación del código con *Doxygen*.
- Utilización exclusiva del lenguaje de programación *Python 3*.

Capítulo 3

Diseño e implementación

3.1. Autovalidación del dispositivo bajo prueba

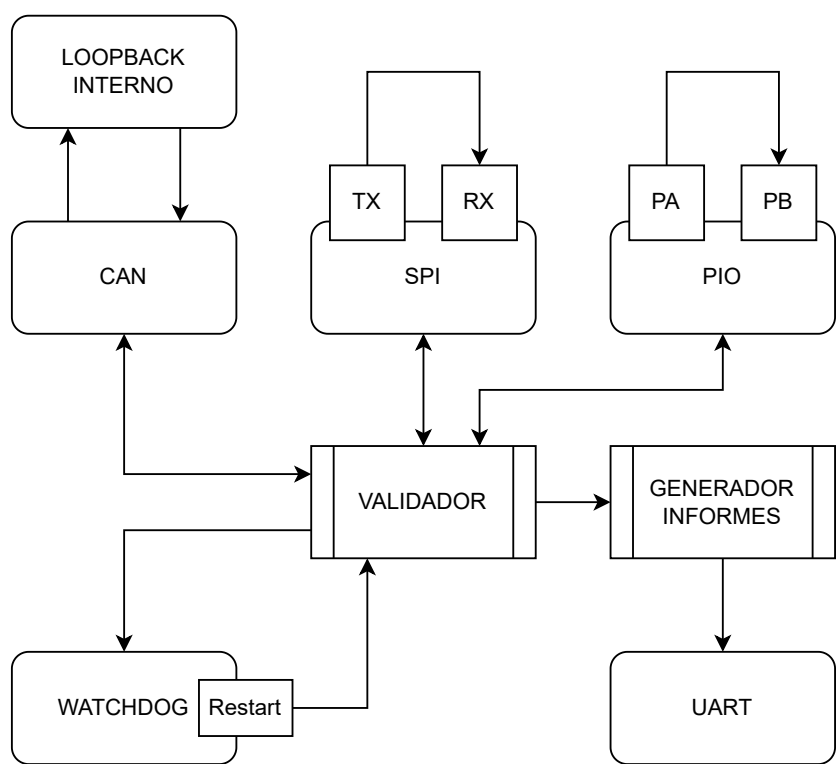


FIGURA 3.1. Diagrama en bloques del firmware de autovalidación.

TABLA 3.1. Comparación entre estrategias de depuración

Periférico	Validación	Detección en un ciclo
CAN	Loopback interno	Si
PIO	Loopback externo	No
SPI	Loopback externo	Si
UART	Lógica en firmware	No
Watchdog	Lógica en inyector	No

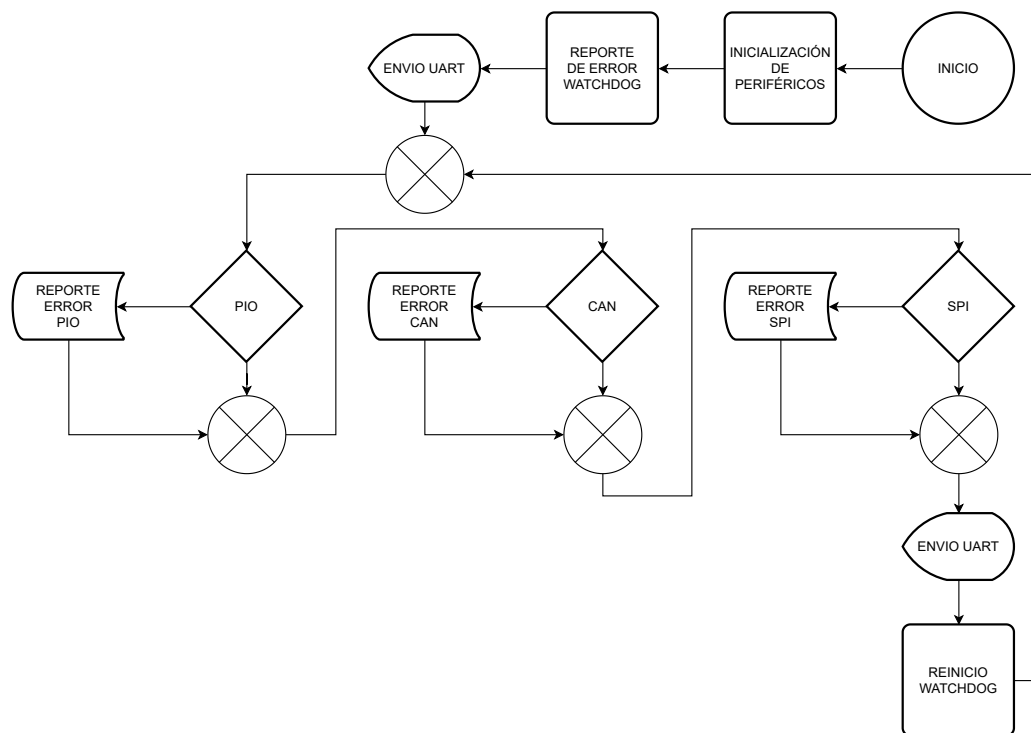
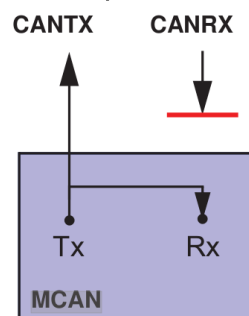
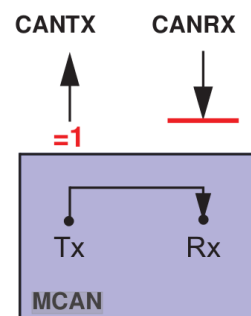


FIGURA 3.2. Flujo del firmware de autovalidación.

Pin Control in Loop Back Modes



External Loop Back Mode



Internal Loop Back Mode

FIGURA 3.3. Diagrama de *loopback* del periférico CAN[9].

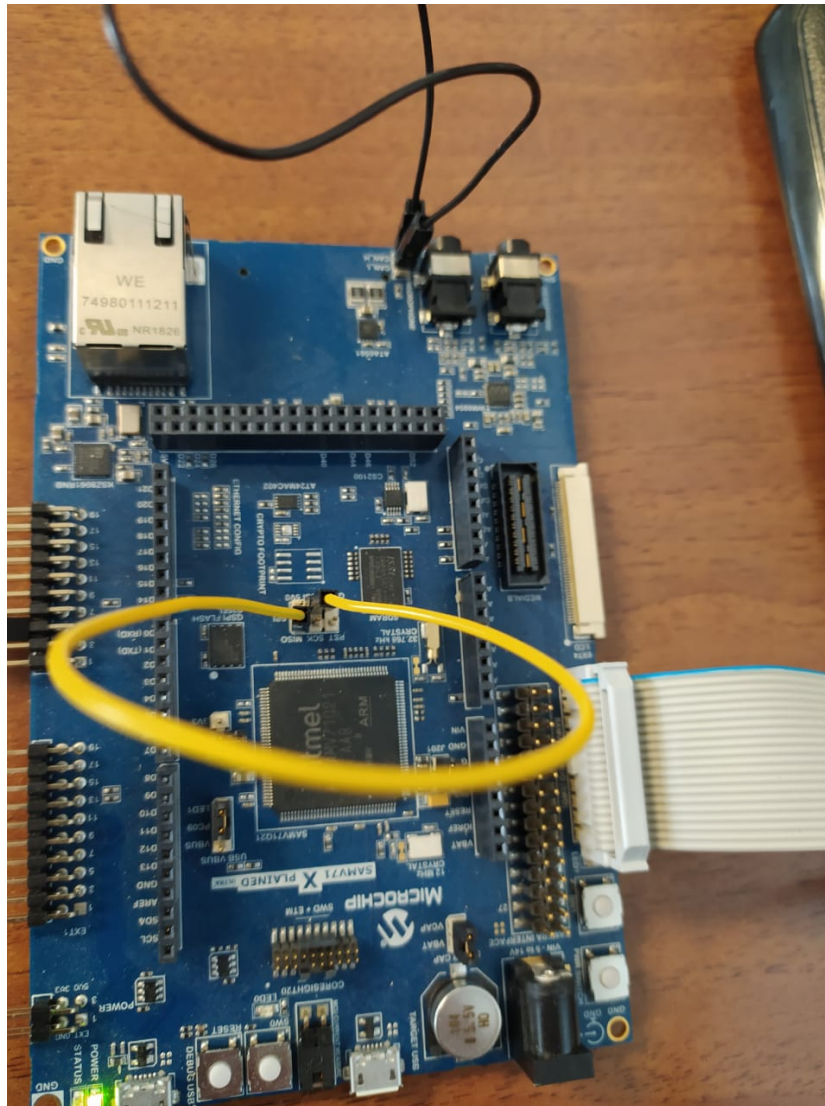


FIGURA 3.4. Fotografía del dispositivo bajo prueba.

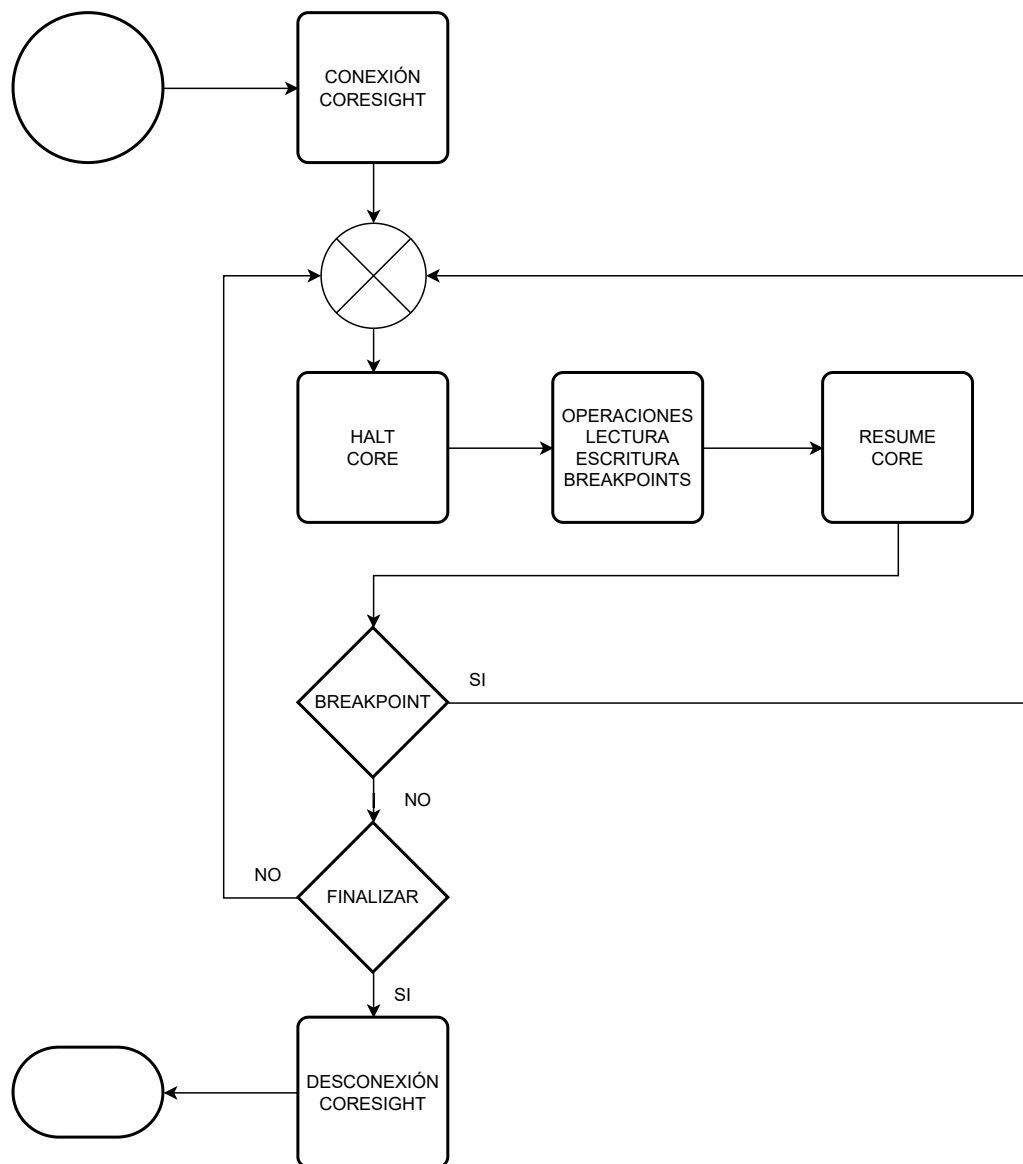


FIGURA 3.5. Flujo de una sesión de depuración.

TABLA 3.2. Funcionalidades abstraídas

Funcionalidad	Patrón de diseño	Acceso
Conexión al integrado	RAII	Público
Detener el núcleo	RAII	Privado
Registros CORE: read/write	OOP	Público
Memoria SDRAM: read/write	OOP	Público

3.2. Interfaz de programación de aplicaciones

3.3. Sistema de inyección de soft-errors

3.4. Biblioteca para el desarrollo de ensayos

```

1 import sise.library as sise
2
3 dut = sise.Connection()
4
5 # Bit-flip en SDRAM
6 addr = 0x20400000
7 bit = 0
8 res = dut.bitFlipMemory(addr, bit)
9 print("res:", res)
10
11 del(dut)

```

CÓDIGO 3.1. Ejemplo de aplicación de la biblioteca.

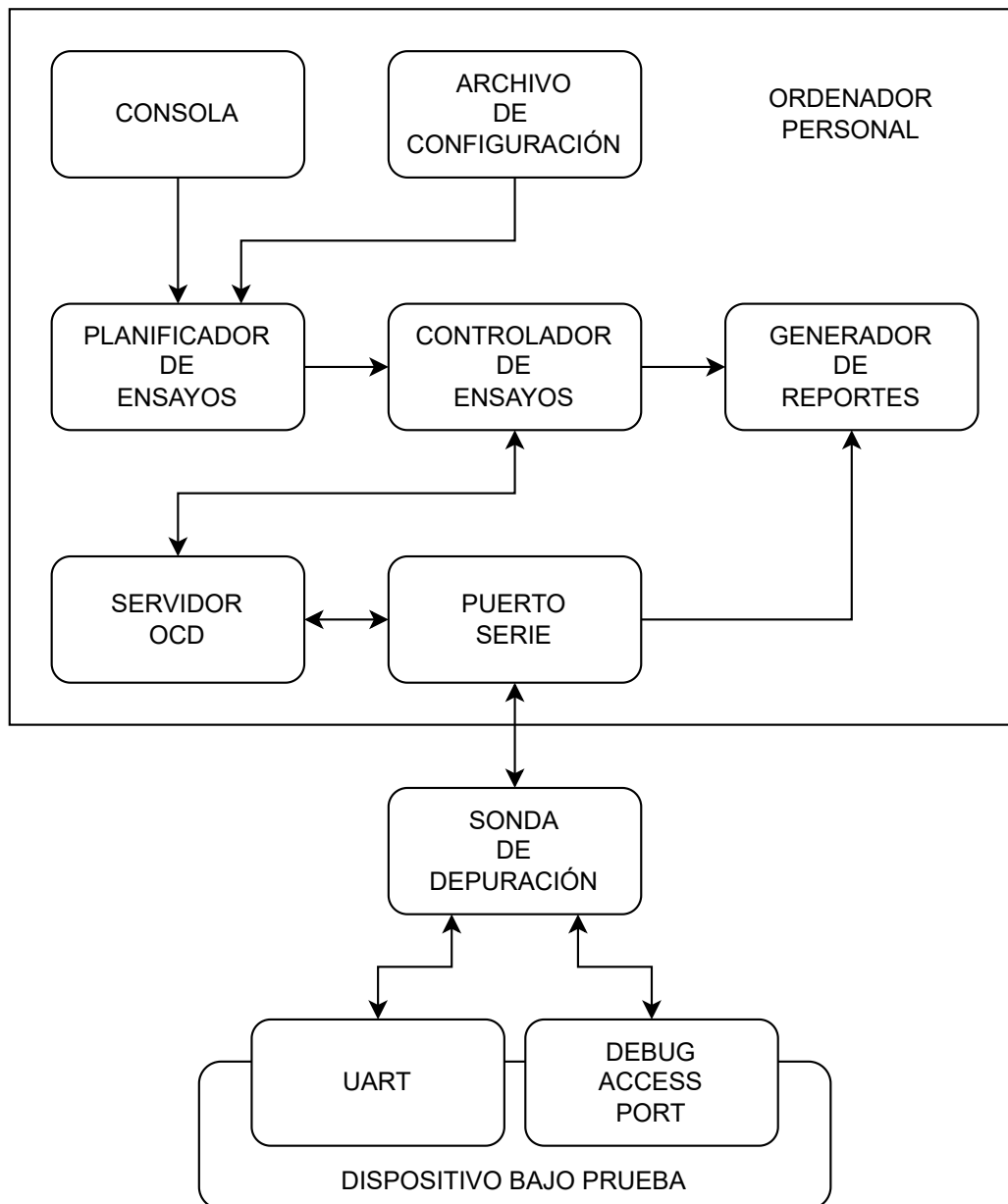


FIGURA 3.6. Diagrama en bloques del sistema de inyección de soft-errors.

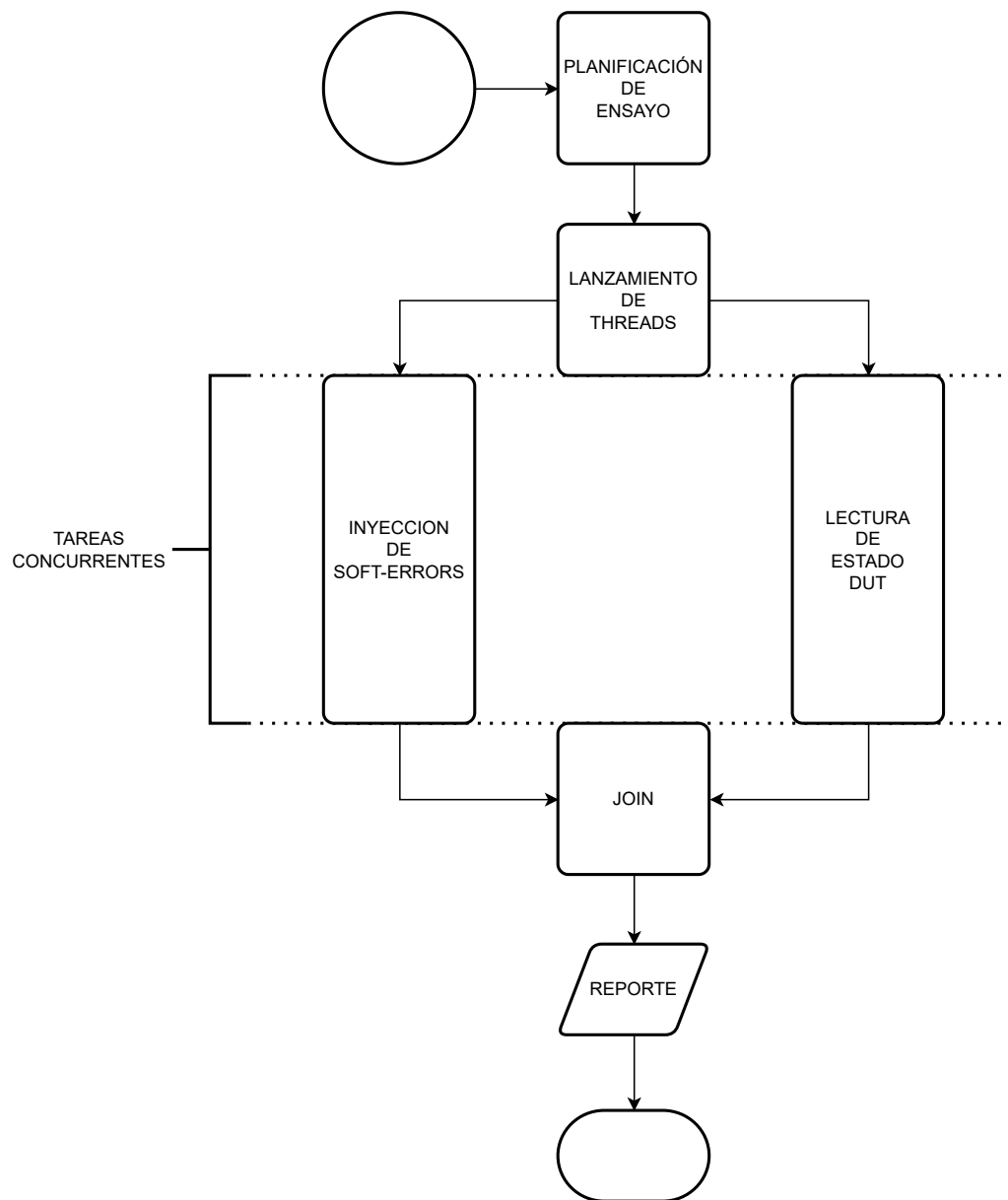


FIGURA 3.7. Flujo de tareas concurrentes.

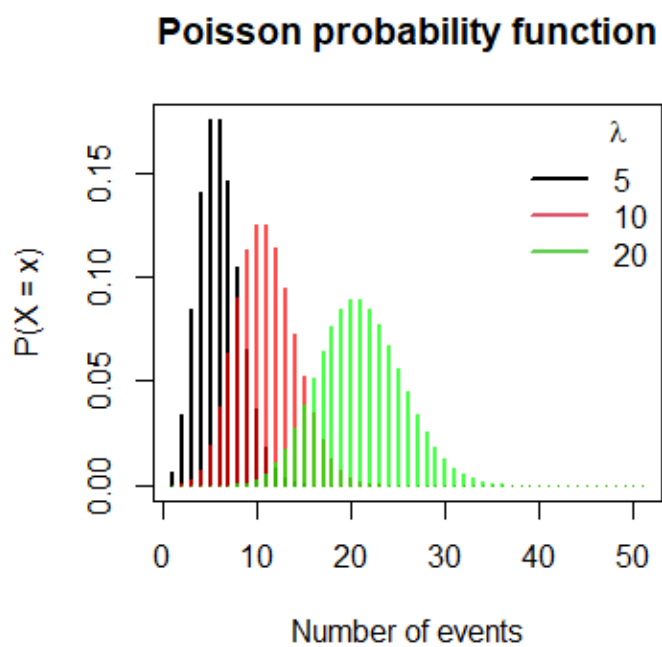


FIGURA 3.8. Gráfico de distribución Poisson[10].

Capítulo 4

Ensayos y resultados

4.1. Laboratorio remoto

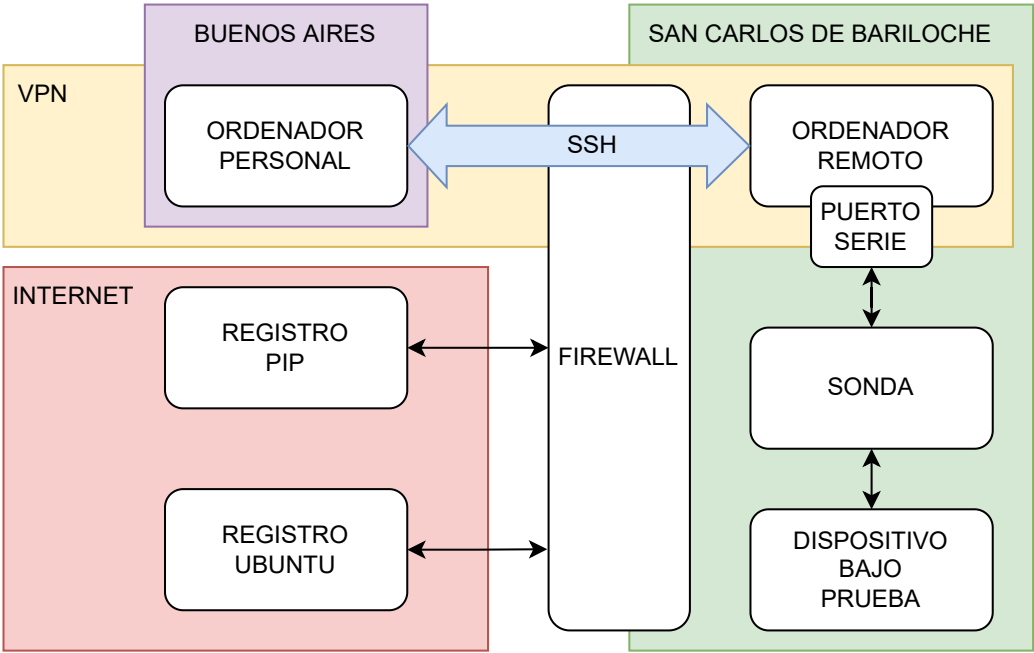


FIGURA 4.1. Diagrama en bloques del laboratorio remoto.

TABLA 4.1

Funcionalidad	Nivel de servicio
Carga de binarios en DUT	++
Comunicación con registro PIP	+++
Comunicación con registro Ubuntu	+++
Comunicación con debug access port	+++
Comunicación con UART	+

- 4.2. Ensayos de inyector
- 4.3. Validación con el cliente

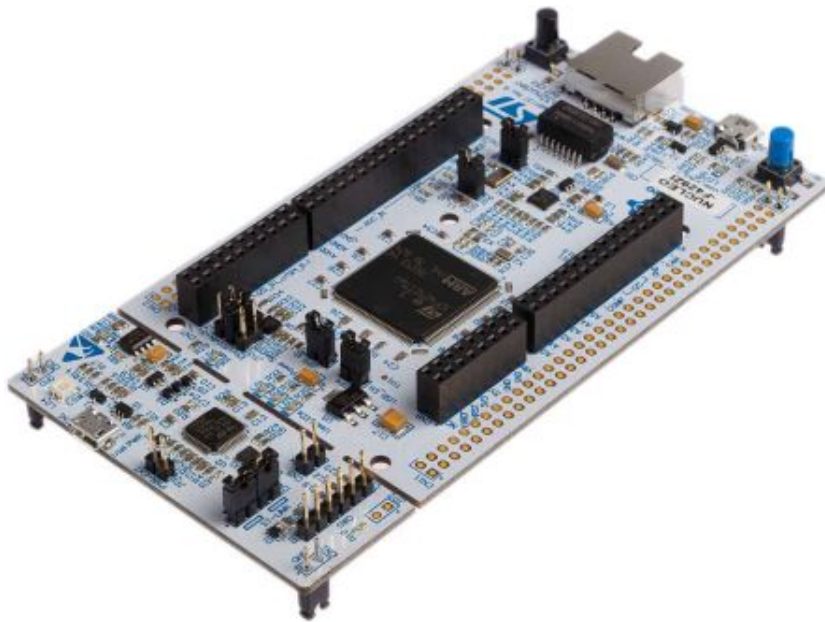
FIGURA 4.2. Dispositivo alternativo *NUCLEO-F429ZI*.

TABLA 4.2. Resumen de ensayos

Ensayo	Lab. local	Lab. remoto	DUT alerno
Escritura SDRAM	+++	+++	+++
Escritura registros CORE	+++	+++	+++
Funcionalidades extras	++	++	+++
Halt CORE	+++	+++	+++
Lectura SDRAM	+++	+++	+++
Lectura registros CORE	+++	+++	+++
Uso concurrente de puerto serie	+++	+	+++
Resume CORE	+++	+++	+++

TABLA 4.3. Resumen de la validación con el cliente

Expectativas	Cumplimiento
Acceso a memoria	+++
Acceso al CORE	+++
Biblioteca de ensayos	+++
Capacidad de bit-flip	+++
Configuración del sistema	+++
Distribución de errores	+++
Validación de periféricos	+++
Generación de reportes	+++

Capítulo 5

Conclusiones

Este capítulo explica de forma breve el cierre del trabajo realizado, sus logros y futuro.

5.1. Resultados obtenidos

El trabajo logró cumplir las expectativas y requerimientos del cliente. En particular, los siguientes objetivos:

- Creación de un sistema de inyección de *soft-errors* que permita evaluar técnicas de mitigación de errores.
- Acceso a la memoria volátil del dispositivo bajo prueba.
- Biblioteca para el diseño de ensayos en lenguaje *Python 3*.

La recepción de este trabajo fue muy positiva; ya que en la actualidad, INVAP S.E. se encuentra en proceso de integrar la herramienta en su ambiente de desarrollo de satélites. Además, el sistema realizado se utiliza dentro del marco de un proyecto final en la Especialización en Sistemas Embebidos.

5.2. Trabajo futuro

La investigación realizada durante la producción del trabajo sugiere que es posible agregar las siguientes funcionalidades:

- Conexión entre el código fuente del dispositivo bajo prueba y el inyector de *soft-errors*.
- Creación de instrucciones específicas para la inyección de *single event functional interrupt*.

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. 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] developer.arm.com. *Cortex M4*. <https://developer.arm.com/>. Mayo de 2022. (Visitado 01-05-2022).
- [8] How to debug: CoreSight basis (Part 3). *Cortex M4*. <https://community.arm.com/arm-community-blogs/b/architectures-and-processors-blog/posts/how-to-debug-coresight-basics-part-3>. Mayo de 2022. (Visitado 01-05-2022).
- [9] ATMEL. «Atmel 44003 32 bit Cortex M7 Microcontroller SAMV71». En: *Atmel Smart ARM-based Flash MCU* (2016).
- [10] r coder.com. *Poisson probability function in R*. <https://r-coder.com/wp-content/uploads/2020/10/poisson-probability-function-r.png>. Mayo de 2022. (Visitado 01-05-2022).