

disponible durante la fase de desarrollo de los proyectos. Esto dificulta aún más la mitigación de errores y aumenta la vulnerabilidad de los sistemas.

La manera tradicional de evaluar la tolerancia a los errores de *software* es realizar un ensayo por radiación. En estos ensayos se utilizan instalaciones en tierra para pruebas de radiación. Sin embargo, estas instalaciones son costosas y la preparación y ejecución de los ensayos consumen mucho tiempo.

Para lograr un ensayo por radiación, las instalaciones deben producir un haz de partículas cargadas. Estas partículas se pueden obtener de:

- Aceleradores de partículas: en esta categoría se incluyen ciclotrones y aceleradores lineales.
- Decaimiento por fisión: basados en el decaimiento por fisión espontánea de elementos como Cf^{252} .

En la figura 1.5 se puede observar una cámara de iones pesados. Durante el ensayo se ejecuta una metodología particular que define la actividad en el dispositivo bajo prueba. Además, se necesita de un sistema que controle y observe el dispositivo bajo prueba durante su exposición a la radiación. Finalmente, se requiere de personal calificado en el diseño, ejecución e interpretación de estos ensayos.

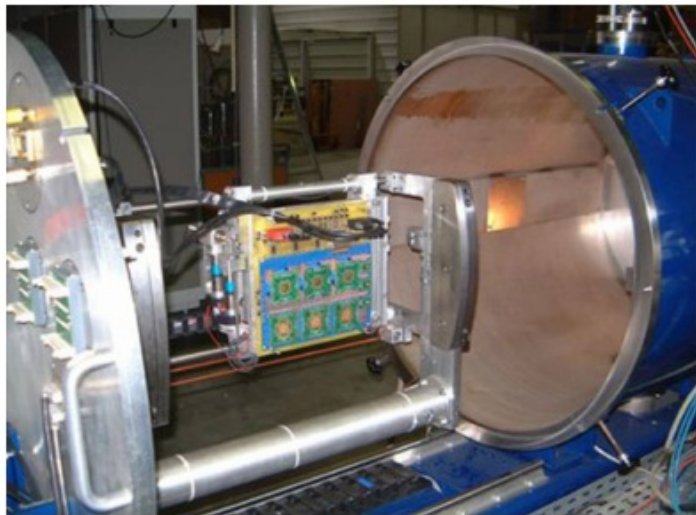


FIGURA 1.5. Cámara de pruebas de iones pesados⁵.

Las estrategias para la inyección de errores pueden ser estáticas o dinámicas. En las estáticas solo se observa si se producen cambios en valores determinados de memorias y registros. Las pruebas dinámicas se realizan mientras se activan secuencias de lectura y escritura de memorias. También incluyen la ejecución de programas para estimular el procesador.

⁵Imagen tomada del sitio web ucl.ac.uk [11].

disponible durante la fase de desarrollo de los proyectos. Esto dificulta aún más la mitigación de errores y aumenta la vulnerabilidad de los sistemas.

La manera tradicional de evaluar la tolerancia a los errores de *software* es realizar un ensayo por radiación. En estos ensayos se utilizan instalaciones en tierra para pruebas de radiación. Sin embargo, estas instalaciones son costosas y la preparación y ejecución de los ensayos consumen mucho tiempo.

Para lograr un ensayo por radiación, las instalaciones deben producir un haz de partículas cargadas. Estas partículas se pueden obtener de:

- Aceleradores de partículas: en esta categoría se incluyen ciclotrones y aceleradores lineales.
- Decaimiento por fisión: basados en el decaimiento por fisión espontánea de elementos como Cf^{252} .

En la figura 1.5 se puede observar una cámara de iones pesados. Durante el ensayo se ejecuta una metodología particular que define la actividad en el dispositivo bajo prueba. Además, se necesita de un sistema que controle y observe el dispositivo bajo prueba durante su exposición a la radiación. Finalmente, se requiere de personal calificado en el diseño, ejecución e interpretación de estos ensayos.

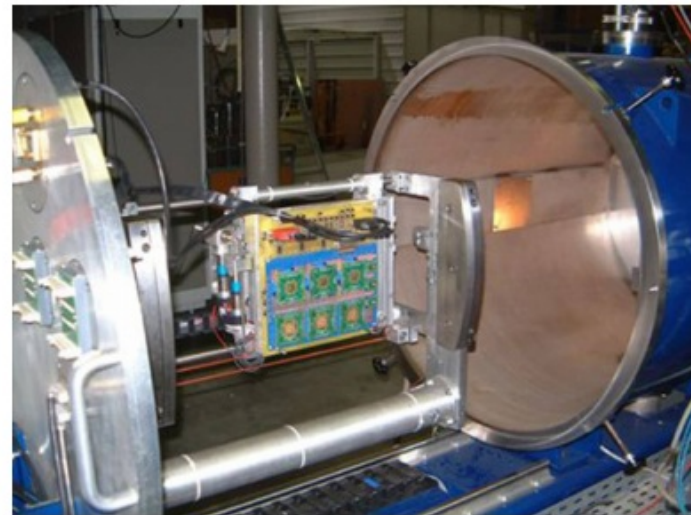


FIGURA 1.5. Cámara de pruebas de iones pesados⁵.

Las estrategias para la inyección de errores pueden ser estáticas o dinámicas. En las estáticas solo se observa si se producen cambios en valores determinados de memorias y registros. Las pruebas dinámicas se realizan mientras se activan secuencias de lectura y escritura de memorias. También incluyen la ejecución de programas para estimular el procesador.

⁵Imagen tomada del sitio web ucl.ac.uk [11].

El diseño de un ensayo dinámico necesita determinar la contribución de *SEU* sobre una sección transversal de memoria que está relacionada con su tiempo de lectura y escritura (ciclo de trabajo). La sección transversal de un programa se puede definir entonces como:

$$\sigma_{(SEU)} = \sum d(R_i) \times \sigma_{R_i} \quad (1.1)$$

Donde:

- $d(R_i)$ es el ciclo de trabajo del elemento de memoria R_i .
- σ_{R_i} es la sección transversal de memoria obtenida por la metodología estática [6].

Diseñar un ensayo dinámico por radiación es un proceso largo y costoso, esto demanda que se distribuya la inversión de capital entre varias misiones. Como consecuencia, el ensayo se realiza con un *benchmark* que no representa realmente la aplicación de vuelo. Finalmente, al ejecutar un ensayo genérico se obtiene un número mayor de *soft-errors*.

Otra técnica disponible son los ensayos basados en *software*, cuyo método se basa en emular la arquitectura a evaluar e introducir instrucciones que generen errores. Esto genera un consumo de cómputo elevado y la problemática de estimar la tasa de error. Con esta tasa se puede determinar en que momentos de la emulación corresponde introducir las instrucciones de error. La tasa de error se estima como:

$$\tau_{SEU} = \sigma_{SEU} \times \tau_{inj} \quad (1.2)$$

Donde τ_{inj} es la tasa de incidencia de una partícula cargada.

Esta técnica demanda ciclos de la unidad de proceso y por lo tanto consume más tiempo de ejecución. Además, cada vez que se altera el código fuente de la aplicación se necesita volver a diseñar una serie nueva de ensayos.

Existe una tercera técnica de ensayo de errores transitorios. Esta técnica está basada en *hardware*; y en el caso de los microprocesadores, se utiliza una sonda de depuración. La principal ventaja de este método frente al basado en *software* es que un mismo ensayo puede ser utilizado para múltiples iteraciones del código fuente. Esto se debe a que la tasa de ocurrencia de los eventos nucleares sigue un proceso Poisson. Si se observa el proceso como el tiempo que tarda en producirse cada impacto de una partícula cargada, entonces el proceso sigue una distribución exponencial. Este razonamiento está sustentado en la siguiente ecuación:

$$P(N_{SEU}(t + \Delta t) = N_{SEU}(t)) = e^{-\sigma \times \phi \times \Delta t} \quad (1.3)$$

El trabajo realizado es una solución del tipo ensayo por *hardware*. Además, se propuso superar el estado del arte de este método al crear una abstracción para el diseño de ensayos. Los métodos mencionados presentan compromisos de ingeniería y están resumidos en la tabla 1.4.

El diseño de un ensayo dinámico necesita determinar la contribución de *SEU* sobre una sección transversal de memoria que está relacionada con su tiempo de lectura y escritura (ciclo de trabajo). La sección transversal de un programa se puede definir entonces como:

$$\sigma_{(SEU)} = \sum d(R_i) \times \sigma_{R_i} \quad (1.1)$$

Donde:

- $d(R_i)$ es el ciclo de trabajo del elemento de memoria R_i .
- σ_{R_i} es la sección transversal de memoria obtenida por la metodología estática [6].

Diseñar un ensayo dinámico por radiación es un proceso largo y costoso, esto demanda que se distribuya la inversión de capital entre varias misiones. Como consecuencia, el ensayo se realiza con un *benchmark* que no representa realmente la aplicación de vuelo. Finalmente, al ejecutar un ensayo genérico se obtiene un número mayor de *soft-errors*.

Otra técnica disponible son los ensayos basados en *software*, cuyo método se basa en emular la arquitectura a evaluar e introducir instrucciones que generen errores. Esto genera un consumo de cómputo elevado y la problemática de estimar la tasa de error. Con esta tasa se puede determinar en que momentos de la emulación corresponde introducir las instrucciones de error. La tasa de error se estima como:

$$\tau_{SEU} = \sigma_{SEU} \times \tau_{inj} \quad (1.2)$$

Donde τ_{inj} es la tasa de incidencia de una partícula cargada.

Esta técnica demanda ciclos de la unidad de proceso y por lo tanto consume más tiempo de ejecución. Además, cada vez que se altera el código fuente de la aplicación se necesita volver a diseñar una serie nueva de ensayos.

Existe una tercera técnica de ensayo de errores transitorios. Esta técnica está basada en *hardware*; y en el caso de los microprocesadores, se utiliza una sonda de depuración. La principal ventaja de este método frente al basado en *software* es que un mismo ensayo puede ser utilizado para múltiples iteraciones del código fuente. Esto se debe a que la tasa de ocurrencia de los eventos nucleares sigue un proceso Poisson. Si se observa el proceso como el tiempo que tarda en producirse cada impacto de una partícula cargada, entonces el proceso sigue una distribución exponencial. Este razonamiento está sustentado en la siguiente ecuación:

$$P(N_{SEU}(t + \Delta t) = N_{SEU}(t)) = e^{-\sigma \times \phi \times \Delta t} \quad (1.3)$$

El trabajo realizado es una solución del tipo ensayo por *hardware*. Además, se propuso superar el estado del arte de este método al crear una abstracción para el diseño de ensayos. Los métodos mencionados presentan compromisos de ingeniería y están resumidos en la tabla 1.4.

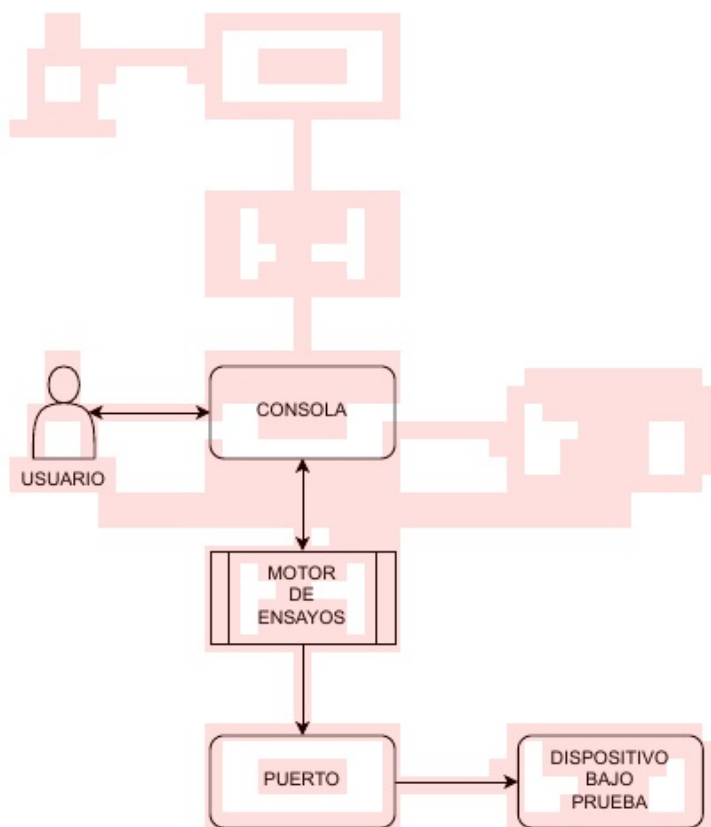


FIGURA 1.7. Diagrama simplificado del sistema de inyección de errores.

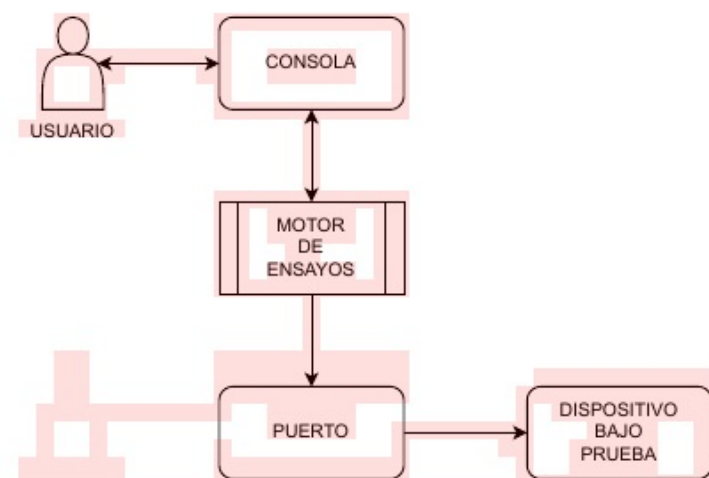


FIGURA 1.7. Diagrama simplificado del sistema de inyección de errores.