

Especificación Formal y Validación de un Sistema de Detección de Metales Pesados en el Agua

M. Pinazo¹, A. Vasquez², J. Ramos³, J. Quispe⁴, F. Perez⁵, M. Molina⁶

Universidad La Salle de Arequipa, Perú

¹mpinazov@ulasalle.edu.pe, ²avasquezl@ulasalle.edu.pe, ³jramoss@ulasalle.edu.pe,

⁴jquispel@ulasalle.edu.pe, ⁵fperezd@ulasalle.edu.pe ⁶mmolinab@ulasalle.edu.pe

Resumen—El presente artículo establece una especificación formal y validación de un sistema de detección de metales pesados en el agua centrado en una solución de monitoreo automatizado y continuo. El sistema sugerido utiliza métodos electroquímicos para detectar la presencia de metales peligrosos como mercurio, arsénico y plomo. El sistema proporciona reportes detallados sobre la calidad del agua y alertas en tiempo real cuando las concentraciones de metales superan los niveles de seguridad. Para configurar el sistema, se utilizan métodos formales, particularmente VDM++, definiendo elementos importantes como estructuras de clases, tipos de datos y expresiones. Simulaciones y pruebas se realizan con muestras de agua limpia y contaminada para validar el sistema. Este método evita la necesidad de un monitoreo preciso a largo plazo de la calidad del agua y garantiza la precisión y confiabilidad del sistema.

Palabras clave—Metales pesados, Monitoreo de agua, VDM++, Validación, Especificación formal, Electroquímica, Alertas en tiempo real.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua con metales pesados es un problema grave que afecta a muchas regiones del Perú, como Ayacucho, Junín, Piura, Puno, Moquegua y la provincia constitucional del Callao. La exposición a estos contaminantes, generados por actividades como la minería, la erosión natural, las prácticas agrícolas, el uso de fertilizantes, la mala gestión de residuos sólidos y los desechos industriales, pone en riesgo la salud y el medio ambiente.

Metales pesados como el plomo, arsénico, mercurio y cadmio son altamente tóxicos y, al liberarse en cuerpos de agua, representan un peligro considerable para las comunidades que dependen de estos recursos hídricos. La exposición prolongada puede causar daños neurológicos, trastornos del sistema inmunológico, enfermedades renales, cáncer y afectar negativamente el desarrollo cognitivo en niños.

A pesar de la gravedad del problema, los métodos de detección actuales suelen ser costosos, requieren equipos especializados y no permiten la detección en tiempo real, lo que incrementa el riesgo de incidentes de contaminación. En este contexto, surge la necesidad de un sistema automatizado, accesible y eficiente para la detección de metales pesados en el agua, capaz de operar en diversos contextos geográficos y económicos.

Por ello, el presente trabajo tiene como objetivo general desarrollar un sistema basado en métodos formales para la detección automática y en tiempo real de metales pesados en el agua, contribuyendo así a la protección de la salud pública

y el medio ambiente. Este sistema se enfocará en regiones vulnerables, donde el riesgo de exposición es elevado y la infraestructura actual es limitada.

A. Objetivos Específicos

- Definir los parámetros y condiciones para el monitoreo continuo de metales pesados en el agua, como plomo, arsénico y mercurio.
- Establecer los criterios para alertar a los usuarios cuando los niveles de metales pesados superen los límites permitidos.
- Determinar el proceso de validación y calibración del sistema para garantizar su precisión a largo plazo.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Los sistemas para detectar metales pesados en el agua pueden ser portátiles o no, lo que implica un alto consumo de recursos en algunos casos y un uso mínimo de recursos en otros.

La voltamperometría es un método que aplica un voltaje controlado a una muestra de agua a través de tres electrodos, según el artículo de Torres Llano [1]. Los átomos de mercurio de la muestra se depositan sobre el electrodo de trabajo a medida que aumenta el voltaje, generando una corriente eléctrica.

Esta corriente cambia según la cantidad de mercurio presente, lo que permite calcular su concentración. Este proceso es extremadamente preciso y puede detectar concentraciones de mercurio muy bajas en el agua.

Los autores Qi Ding, Chen Li, Haijun Wang, Chuanlai Xu y Hua Kuang [2] proponen el uso de técnicas electroquímicas recientes para detectar los iones de metales pesados presentes en el agua. Estos métodos permiten la detección de iones como Hg(II), Cd(II) y Pb(II) de manera rápida y efectiva. Además, se destacan por su facilidad de transporte y bajo costo.

III. BACKGROUND

A. Definición de Metales Pesados

En la industria, los metales pesados se utilizan en una variedad de procesos, desde la manufactura hasta la minería. Sin embargo, la manipulación y control de estos metales

presentan serios riesgos para la salud y el medio ambiente. Los metales pesados, incluso en concentraciones bajas, pueden ser tóxicos y perjudiciales. La exposición a estos metales puede llevar a problemas de salud graves, dependiendo de la concentración y la duración de la exposición. Los efectos adversos pueden incluir daño a los sistemas respiratorio, nervioso y cardiovascular, y en casos extremos, la muerte.

Los metales pesados considerados en el presente trabajo son:

- 1) **Plomo (Pb)**: Un metal pesado utilizado en baterías y soldaduras, la exposición prolongada puede causar daños en los riñones, sistema nervioso central, y problemas cardiovasculares [3].
- 2) **Mercurio (Hg)**: Se utiliza en la minería y en algunos procesos industriales, la exposición al mercurio puede causar daño neurológico, problemas renales y efectos adversos en el desarrollo [4].
- 3) **Cadmio (Cd)**: Se emplea en baterías recargables y en la industria de recubrimientos, la exposición al cadmio puede causar enfermedad pulmonar, daño renal y cáncer de pulmón [5].
- 4) **Arsénico (As)**: Utilizado en pesticidas y en la industria del vidrio, la exposición al arsénico puede resultar en cáncer de piel, enfermedad cardiovascular y daño neurológico [6].
- 5) **Cromo (Cr)**: Empleado en la producción de acero inoxidable y en tratamientos de cuero, el cromo hexavalente es carcinogénico y puede causar daño a los pulmones y problemas gastrointestinales [7].

B. Límites de Concentración y Estándares para Metales Pesados en el Agua

El monitoreo de la calidad del agua en lo que respecta a la presencia de metales pesados, como el mercurio, el plomo, el cadmio y el arsénico, es fundamental para prevenir riesgos a la salud humana. Las normativas establecidas por organizaciones internacionales, como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y diversas agencias regulatorias locales, proporcionan los límites de concentración permitidos de estos metales en el agua potable [1], [8].

El sistema de detección propuesto está diseñado para detectar y cuantificar las concentraciones de estos metales, permitiendo activar alertas cuando los niveles exceden los valores permitidos por las normativas vigentes [2], [3]. Estos valores, que se presentan en la Figura 1, son fundamentales para calibrar el sistema y asegurar su precisión y confiabilidad.

Metales Pesados	Concentración Mínima (ppm)	Concentración Máxima (ppm)	Valor Estequiométrico
Plomo (Pb)	0,01	0,015	0,13
Mercurio (Hg)	0,001	0,002	0,01
Cadmio (Cd)	0,003	0,005	0,05
Arsénico (As)	0,01	0,01	0,012
Cromo (Cr)	0,05	0,1	0,09

Fig. 1: Concentraciones permitidas de metales pesados en el agua y valores estequiométricos [5]–[8]

En la tabla presentan los valores máximos permitidos de concentración para metales pesados como el plomo, el mercurio, el arsénico y el cadmio, los cuales han sido objeto de estudios debido a su toxicidad y efectos adversos para la salud [4]–[6]. Estos valores sirven como referencia para el diseño del sistema de detección de metales pesados en el agua, asegurando que las mediciones que realice el sistema cumplan con los requisitos internacionales [7].

Además, la implementación de este sistema sigue un enfoque de especificación formal para garantizar su robustez y validación. El uso de técnicas formales, como el método Z y otras herramientas de modelado de sistemas, permite describir con precisión el comportamiento del sistema y realizar pruebas exhaustivas para su validación [9], [10].

IV. ESPECIFICACIONES FORMALES Y VDM++

A. VDM++

La Vienna Development Method (VDM) es uno de los métodos formales más antiguos y establecidos orientados a modelos para el desarrollo de sistemas y software en entornos computacionales. Este método utiliza un conjunto de lenguajes rigurosamente fundamentados en la matemática para representar y analizar modelos de sistemas en las primeras fases del diseño. Esto permite evaluar las propiedades clave del sistema antes de realizar compromisos significativos relacionados con la implementación. Gracias a la construcción y análisis de estos modelos, es posible identificar áreas donde las especificaciones informales del sistema pueden ser incompletas o ambiguas, lo que proporciona una mayor confianza en que la implementación final respetará propiedades fundamentales, como la seguridad y la protección [6].

B. Definición de Clases

En VDM++, las clases son bloques fundamentales que encapsulan tanto datos como operaciones. Las clases se definen mediante la especificación de sus atributos (variables de instancia) y métodos (funciones y operaciones). Cada clase también puede incluir invariantes que describen condiciones que deben mantenerse verdaderas a lo largo de la vida de la clase [9].

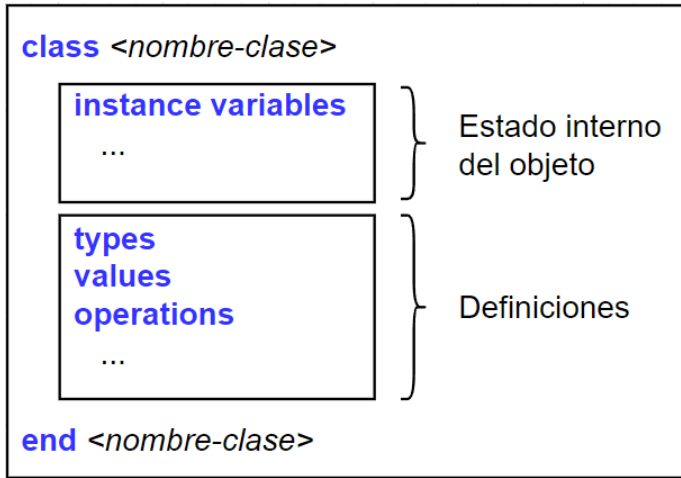


Fig. 2: Estructura básica de formalización de clases en VDM++

C. Tipos

VDM++ soporta una amplia variedad de tipos, tanto básicos como estructurados. Entre los tipos básicos se incluyen enteros, reales, booleans, y caracteres, mientras que los tipos estructurados pueden ser secuencias, conjuntos, y tuplas. Además, los tipos definidos por el usuario permiten una mayor flexibilidad y robustez en la modelización de sistemas complejos [10].

Operador	Semántica	Tipo
hd l	Primer elemento de la lista	$\text{seq1 of } A \rightarrow A$
tl l	Cola de lista	$\text{seq1 of } A \rightarrow \text{seq of } A$
len l	Largo de lista	$\text{seq of } A \rightarrow \text{nat}$
inds l	Índices de lista	$\text{seq of } A \rightarrow \text{set of } A$
l(i)	Elemento de la i-ésima posición	$\text{seq of } A * \text{nat1} \rightarrow A$
l1 = l2	Compara si dos listas son iguales	$\text{seq1 of } A * \text{seq of } A \rightarrow \text{bool}$

Fig. 3: Operaciones Formales de tipo secuencia en VDM++

D. Expresiones

Las expresiones en VDM++ están definidas de manera formal utilizando operadores matemáticos y lógicos. Estas expresiones pueden ser aritméticas, booleanas o relacionales, y se emplean para definir propiedades del sistema, como las precondiciones y postcondiciones de funciones y operaciones, así como las invariantes de las clases [9].

V. PROPUESTA

A. Requerimientos Funcionales del Sistema

Para la determinación de los requerimientos en el sistema de detección de metales pesados en el agua, se debe de tener en cuenta los siguientes:

- R1. Detección Automatizada: El sistema debe ser capaz de detectar automáticamente la presencia de metales pesados específicos en muestras de agua.
- R2. Alerta en Tiempo Real: Debe generar alertas en tiempo real cuando los niveles de metales pesados superen los límites de seguridad establecidos.
- R3. Monitoreo Continuo: El sistema debe poder realizar un monitoreo continuo de la calidad del agua en ubicaciones específicas.
- R4. Generación de Reportes: Debe poder generar reportes detallados sobre los niveles de contaminación, incluyendo gráficos y análisis históricos.
- R5. Calibración y Mantenimiento: El sistema debe incluir funcionalidades para la calibración y el mantenimiento regular de los sensores de detección.

B. Diagrama de Clases

El diagrama de clases se mostrará a continuación.

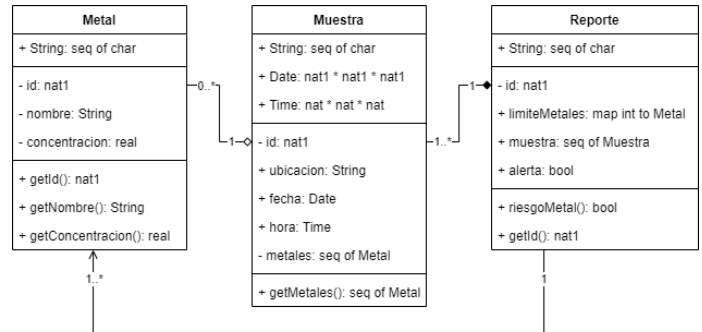


Fig. 4: Diagrama de Clases para la Especificación Formal y Validación de un Sistema de Detección de Metales Pesados en el Agua.

C. Sistema de Control

El sistema de detección de metales pesados en el agua se formaliza a través de tres entidades principales: Metal, Muestra, y Reporte. A continuación, se describe cada uno de estos elementos.

La clase Metal representa cada tipo de metal presente en las muestras de agua. Los atributos de la clase son:

- **id_metal**: Identificador único para cada tipo de metal.
- **nombre**: Nombre descriptivo del metal (por ejemplo, mercurio o plomo) [1].
- **concentracion**: Concentración del metal en la muestra, expresada en unidades de partes por millón (ppm) [2], [3].

La clase Muestra captura la información de cada recolección de datos en el sistema:

- **id_muestra**: Identificador de la muestra.
- **ubicacion**: Descripción de la ubicación donde se toma la muestra.
- **fecha**: Fecha de recolección de la muestra.
- **tiempo**: Hora exacta de la recolección.
- **metales**: Lista de metales presentes en la muestra con sus respectivas concentraciones [4], [5].

La clase Reporte sintetiza los datos obtenidos de varias muestras y permite identificar riesgos:

- **id_reporte**: Identificador único del reporte generado.
- **limiteMetales**: Mapa que asocia el nombre del metal con su concentración límite aceptable [6].
- **muestra**: Lista de muestras que forman parte del reporte.
- **alerta**: Indica si hay alerta por sobrepasar los límites de concentración de metales [7].

El sistema emitirá una alarma en caso de que las concentraciones de los metales detectados superen los valores permitidos. La función alertaRiesgo() calculará si la concentración de algún metal es peligrosa para la salud humana, generando una señal de alerta [8].

VI. ESPECIFICACIÓN FORMAL

A. Clase Metal

La clase **Metal** representa un metal detectado en una muestra de agua. Los atributos principales son:

- **id**: Un identificador único para el metal.
- **nombre**: El nombre del metal, representado como una secuencia de caracteres.
- **concentracion**: La concentración del metal en la muestra, que debe ser un número real positivo.

Además, la clase contiene dos invariantes:

- La longitud del nombre debe ser mayor que cero.
- La concentración debe ser mayor que cero.

El código en VDM++ de la clase es el siguiente:

```
class Metal

types
public String = seq of char
```

```
instance variables
private id: nat1;
private nombre: String;
private concentracion: real;

inv len nombre > 0;
inv concentracion > 0;

operations
public Metal: nat1 * String * real ==> Metal
Metal(i, nom, con) == ( id := i; nombre := nom
;
concentracion := con; );

public getId: () ==> nat1
getId() == ( return id; );

public getConcentracion: () ==> real
getConcentracion() == ( return concentracion;
);

end Metal
```

B. Clase Muestra

La clase **Muestra** modela una muestra de agua que contiene diferentes metales. Los atributos principales de esta clase son:

- **id**: Un identificador único de la muestra.
- **ubicacion**: La ubicación donde se tomó la muestra.
- **fecha y hora**: La fecha y la hora en que se tomó la muestra.
- **metales**: Una secuencia de metales que se detectaron en la muestra.

Los invariantes de la clase aseguran que:

- La ubicación no sea vacía.
- La secuencia de metales contenga al menos un metal.

El código en VDM++ de la clase es el siguiente:

```
class Muestra
types
public String = seq of char;
public Date = nat1 * nat1 * nat1;
public Time = nat * nat * nat;

instance variables
private id: nat1;
public ubicacion: String;
public fecha: Date;
public hora: Time;
private metales: seq of Metal;

inv len ubicacion > 0;
inv len metales > 0;

operations
public Muestra: nat1 * String * Date * Time *
seq of Metal ==> Muestra
Muestra(i, ubi, fec, hor, metal) == ( id := i;
ubicacion := ubi;
fecha := fec; hora := hor; metales :=
metal;
);

public getMetales: () ==> seq of Metal
```

```
getMetales() == ( return metales; );

end Muestra
```

C. Clase Reporte

La clase **Reporte** almacena la información sobre múltiples muestras y define los límites permitidos para las concentraciones de metales. Los atributos principales son:

- id: Un identificador único para el reporte.
- limiteMetales: Un mapa que relaciona los identificadores de los metales con los límites de concentración permitidos.
- muestras: Una secuencia de muestras que se han tomado.
- alerta: Un valor booleano que indica si se ha detectado un riesgo.

Los invariantes de la clase aseguran que:

- La secuencia de muestras no sea vacía.
- El mapa de límites de metales contenga al menos un valor.

La operación **riesgoMetal** evalúa cada muestra y verifica si la concentración de algún metal excede los límites permitidos. Si esto ocurre, se activa la alerta.

El código en VDM++ de la clase es el siguiente:

```
class Reporte
types
public String = seq of char;

instance variables
private id: nat1;
public limiteMetales: map int to Metal;
public muestras: seq of Muestra;
public alerta: bool;

inv len muestras > 0;
inv card limiteMetales > 0;

operations
public Reporte: nat1 * map int to Metal * seq
of Muestra * bool ==> Reporte
Reporte(i, lim, ms, alert) == ( id := i;
limiteMetales := lim;
muestras := ms; alerta := alert; );

public riesgoMetal: () ==> bool
riesgoMetal() == (
for all m in set elems muestras do (
let metales = m.getMetales() in (
for all metal in set elems metales do (
let limite = limiteMetales(metal.getId
()) in (
if metal.getConcentracion() > limite
.getConcentracion() then
return true;
)
)
)
);
return false;
);

end Reporte
```

VII. VALIDACIÓN

Para la realización de la validación se implementó la clase **Análisis**, donde se crearon los objetos necesarios de los tipos **Metal**, **Muestra**, **Reporte**. Además, se implementó los métodos para su creación y adecuado funcionamiento.

```
class Analisis

types
public String = seq of char;

instance variables
private metales: seq of Metal;
private muestras: seq of Muestra;
private reportes: seq of Reporte;
private limites: map int to Metal;
private peligro: seq of String;

operations
public Analisis: () ==> Analisis
Analisis() == ();

public valoresPrueba1: () ==> ()
valoresPrueba1() == (
limites := {1 |-> new Metal(1, "Plomo",
10.0), 2 |-> new Metal(2, "
Mercurio", 6.0), 3 |-> new Metal
(3, "Ars nico", 4.0)};
metales := [new Metal(1, "Plomo",
12.5), new Metal(2, "Mercurio",
5.0), new Metal(3, "Ars nico",
3.2)];
muestras := [new Muestra(1, "
Laboratorio_A", mk_(2024, 10, 20),
mk_(14, 30, 0), [metales(1),
metales(2)]), new Muestra(2, "
Laboratorio_B", mk_(2024, 10, 21),
mk_(16, 0, 0), [metales(2),
metales(3)])];
reportes := [new Reporte(1, limites,
muestras, false), new Reporte(2,
limites, muestras, false)];
);

public valoresPrueba2: () ==> ()
valoresPrueba2() == (
limites := {1 |-> new Metal(1, "Plomo",
10.0), 2 |-> new Metal(2, "
Mercurio", 6.0), 3 |-> new Metal
(3, "Ars nico", 4.0)};
metales := [new Metal(1, "Plomo", 4.5),
new Metal(2, "Mercurio", 5.0),
new Metal(3, "Ars nico", 3.2)];
muestras := [new Muestra(1, "
Laboratorio_A", mk_(2024, 09, 20),
mk_(14, 30, 0), [metales(1),
metales(2)]), new Muestra(2, "
Laboratorio_B", mk_(2024, 10, 21),
mk_(16, 0, 0), [metales(2),
metales(3)])];
reportes := [new Reporte(1, limites,
muestras, false), new Reporte(2,
limites, muestras, false)];
);

public ejecutarAnalisis: () ==> String
```

```

ejecutarAnalisis() == (
  for all reporte in set elems reportes do (
    if reporte.riesgoMetal() then
      return "PELIGRO!_CONCENTRACION
        _DANINA";
    );
  return "SITUACION_SEGURA";
);

end Analisis

```

A continuación, se presenta el uso de la clase Analisis, para la ejecución de las pruebas establecidas de funcionamiento del Sistema de Detección.

```

>> tcov reset
>> create analisis := new Analisis()
>> print { analisis.valoresPrueba1() }
{ nil }
>> print { analisis.ejecutarAnalisis() }
{ "¡PELIGRO! CONCENTRACION DANINA" }
>> print { analisis.valoresPrueba2() }
{ nil }
>> print { analisis.ejecutarAnalisis() }
{ "SITUACION SEGURA" }

```

Fig. 5: Realizando Pruebas con la clase Analisis.

Por consiguiente, se presenta la construcción del Coverage de las clases de nuestro Sistema de Detección, la cual consta de un 100%. Para ello, se muestra la primera parte de los resultados del Coverage.

```

>> tcov write test.tc
>> rtinfo test.tc
100% 12 Metal`Metal
100% 12 Metal`getId
100% 24 Metal`getConcentracion
100% Metal
100% 4 Muestra`Muestra
100% 6 Muestra`getMetales
100% Muestra
100% 4 Reporte`Reporte

```

Fig. 6: Realizando Analisis de Coverage, Parte 1.

Finalmente, se muestra la segunda parte de los resultados del Coverage del Sistema de Detección.

```

100% 3 Reporte`riesgoMetal
100% Reporte
100% 1 Analisis`Analisis
100% 1 Analisis`valoresPrueba1
100% 1 Analisis`valoresPrueba2
100% 2 Analisis`ejecutarAnalisis
100% Analisis

```

Total Coverage: 100%

Fig. 7: Realizando Analisis de Coverage, Parte 1.

VIII. MODEL CHECKING

Para nuestro sistema de detección de metales pesados, se define un modelo que involucra dos subsistemas independientes que aseguran no estar simultáneamente en estado de alerta.

Variables del Modelo

- **System1:** Puede estar en los estados *AlertaOn* o *AlertaOff*.
- **System2:** Puede estar en los estados *AlertaOn* o *AlertaOff*.

Transiciones del Modelo

Las transiciones para cada subsistema son las siguientes:

- **System1:**
 - Desde *AlertaOff*, puede ir a *AlertaOn* o permanecer en *AlertaOff*.
 - Desde *AlertaOn*, solo puede ir a *AlertaOff*.
- **System2:**
 - Desde *AlertaOff*, puede ir a *AlertaOn* o permanecer en *AlertaOff*.
 - Desde *AlertaOn*, solo puede ir a *AlertaOff*.

Especificaciones del Modelo

Las siguientes especificaciones aseguran el comportamiento correcto de los subsistemas:

- **CTL:**
 - $AG \neg (System1 = AlertaOn \wedge System2 = AlertaOn)$: Siempre es cierto que ambos sistemas no están en estado *AlertaOn* simultáneamente.
 - $EF System1 = AlertaOn$: Eventualmente, el sistema 1 llega al estado *AlertaOn*.
 - $EF System2 = AlertaOn$: Eventualmente, el sistema 2 llega al estado *AlertaOn*.
 - $AG (System1 = AlertaOff \rightarrow AX System1 = AlertaOn)$: Si *System1* está en *AlertaOff*, en el siguiente estado puede ir a *AlertaOn*.
- **LTL:**
 - $F (System1 = AlertaOn)$: En algún momento, *System1* estará en *AlertaOn*.

- $G (System1 = AlertaOn \rightarrow X System1 = AlertaOff)$: Siempre que *System1* esté en *AlertaOn*, cambiará a *AlertaOff* en el siguiente estado.

Descripción del Modelo

El modelo simula dos sistemas que operan independientemente con transiciones entre estados *AlertaOn* y *AlertaOff*. Garantiza que ambos sistemas no estén en estado de alerta simultáneamente.

```
MODULE main
VAR
  System1 : {AlertaOn, AlertaOff};
  System2 : {AlertaOn, AlertaOff};

ASSIGN
  init(System1) := AlertaOff;
  init(System2) := AlertaOff;

  next(System1) := case
    System1 = AlertaOff : {AlertaOn, AlertaOff};
    System1 = AlertaOn : {AlertaOff};
    TRUE : System1;
  esac;

  next(System2) := case
    System2 = AlertaOff : {AlertaOn, AlertaOff};
    System2 = AlertaOn : {AlertaOff};
    TRUE : System2;
  esac;

SPEC AG !(System1 = AlertaOn & System2 = AlertaOn);
SPEC EF System1 = AlertaOn;
SPEC EF System2 = AlertaOn;
SPEC AG (System1 = AlertaOff -> AX System1 = AlertaOn);

LTLSPEC F (System1 = AlertaOn);
LTLSPEC G (System1 = AlertaOn -> X System1 = AlertaOff);
```

A continuación se presenta nuestro contra ejemplo del modelo establecido en NuSMV.

```
MODULE main
VAR
  System1 : {AlertaOn, AlertaOff};
  System2 : {AlertaOn, AlertaOff};

ASSIGN
  -- Inicializacion de los sistemas
  init(System1) := AlertaOff;
  init(System2) := AlertaOff;

  -- Transiciones para System1
  next(System1) := case
    System1 = AlertaOff : {AlertaOn, AlertaOff};
    System1 = AlertaOn : {AlertaOff};
    TRUE : System1;
  esac;

  -- Transiciones para System2
```

```
next(System2) := case
  System2 = AlertaOff : {AlertaOn, AlertaOff};
  System2 = AlertaOn : {AlertaOff};
  TRUE : System2;
esac;

-- Propiedad a verificar
SPEC AG !(System1 = AlertaOn & System2 = AlertaOn)
```

IX. CONCLUSIÓN

El sistema de detección de metales planteado es una herramienta fundamental para el monitoreo preciso y constante de contaminantes en entornos industriales, destacando especialmente en el contexto de la contaminación del agua en nuestro país, Perú. Este sistema proporciona un control confiable sobre las concentraciones de metales, facilitando la detección oportuna de riesgos vinculados a la presencia de metales pesados. Acelerando las intervenciones y minimizando los impactos negativos tanto en el medio ambiente como en las comunidades que dependen de fuentes de agua seguras. Esto es particularmente beneficioso, debido a la gran cantidad de actividades industriales como la minería que contribuyen significativamente a la contaminación de los recursos hídricos. En este sentido, el sistema no solo aporta la capacidad de respuesta ante concentraciones peligrosas, sino que también facilita la implementación de políticas de control y reducción de la contaminación, promoviendo así la protección de la salud pública y el medio ambiente.

REFERENCES

- [1] O. A. T. Llano, "Dispositivo detector de mercurio en el agua," *Universidad de Los Andes Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica*, 2015.
- [2] Q. Ding, C. Li, H. Wang, C. Xu, and H. Kuang, "Electrochemical detection of heavy metal ions in water," *Royal Society of Chemistry ChemComm*, 2021.
- [3] J. Matthews and S. Brown, "Health impacts of heavy metals exposure," *Journal of Environmental Health*, vol. 82, no. 3, pp. 12–24, 2019.
- [4] S. Rao and R. Kumar, "Toxic effects of heavy metals in the environment," *Environmental Toxicology*, vol. 35, no. 7, pp. 678–690, 2020.
- [5] L. Nguyen and T. Johnson, "Cadmium contamination and its health risks," *Toxicology Reports*, vol. 9, pp. 34–45, 2022.
- [6] A. Smith and R. Green, "Arsenic poisoning and environmental safety," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 410, pp. 124–135, 2021.
- [7] M. Johnson and E. Davis, "Chromium exposure and its health effects," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 2, pp. 543–558, 2023.
- [8] P. TRUQUE, "Armonización de los estándares de agua potable en las américas," 2006.
- [9] J. Fitzgerald and P. G. Larsen, *Modelling Systems: Practical Tools and Techniques in Software Development*. Cambridge University Press, 2009.
- [10] J. Woodcock and J. Davies, *Using Z: Specification, Refinement, and Proof*. Prentice Hall, 1996.