

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Implementación del Módulo de Predicciones del Sistema de Optimización del Análisis de la Auscultación - SOAA

Cristhian Vega¹, Marcos Miranda¹, Néstor Cáceres¹, Sidney Viana¹, Dimilson Pinto², Sheila Oro³

¹ Parque Tecnológico Itaipu, ² Itaipu Binacional, ³ Universidad Federal del Paraná

Paraguay

Resumen

El presente trabajo nace a partir de una tesis de doctorado cuyo objetivo es la elaboración de un Índice de Monitoreo Conjunto para las Respuestas de los Bloques de Presa (IMCRB) en el Sistema informático utilizado para la Optimización del Análisis de Auscultación de Instrumentaciones de la Estructura Civil de la Represa de Itaipú (SOAA), con base en lecturas históricas obtenidas por los sensores instalados en la presa de Itaipú.

Para el cálculo del IMCRB se recurre a técnicas propias de la estadística multivariada, tales como, el análisis factorial, el modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA), entre otras. De esta forma, el IMCRB facilita el monitoreo del desplazamiento de las estructuras de los bloques de la represa que son consecuencia de las condiciones ambientales en el entorno de dicha presa. Es posible realizar la observación del índice por medio de una interfaz gráfica que monitorea la serie temporal del IMCRB, teniendo en cuenta un trecho específico y un periodo de tiempo definido. Para que el monitoreo de los valores del índice esté en un rango de normalidad, se fijan los límites de control y de alertas. Estos límites son calculados de forma automática mediante estadísticas sobre los valores del índice en periodos pasados. Adicionalmente, se implementó técnicas de regresión, para fines de predicción de valores futuros del IMCRB, implementados en la interfaz gráfica.

Los resultados logrados son muy alentadores, una vez que se elaboró una herramienta gráfica parametrizable, que permite el análisis del IMCRB para cada trecho de la presa, teniendo en cuenta un periodo de tiempo específico. Además, dicha herramienta, posibilita la variación de los límites de control y de alerta, a partir de la necesidad del análisis a realizar. Esta herramienta es la instanciación de la tesis doctoral traducida en varios esfuerzos tales como la necesidad de comprender y garantizar la calidad a la base de datos para que la herramienta propuesta representase la esencia de la investigación realizada, la salida en producción para su uso en campo y la definición de los datos de pruebas para que la herramienta logre la calidad necesaria para atender la expectativa del cliente final.

Palabras clave

Auscultación de presas, Estadística multivariada, Número índice, Modelo autorregresivo, Análisis factorial.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a que las presas implican cierto riesgo de destrucción catastrófica de vidas humanas y propiedades, surge la necesidad de una auscultación continua de su comportamiento.

Por Auscultación se entiende un conjunto sistemático de tareas como la realización de inspecciones visuales rutinarias, la medición de instrumentos, la evaluación del comportamiento estructural y, finalmente la evaluación de la Seguridad.[1]

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

La instalación de instrumentos o acumulación de datos del instrumento por sí solo no garantiza la seguridad de la presa. Los instrumentos deben ser cuidadosamente seleccionados, localizados e instalados. Además, los datos también deben ser criteriosamente validados en tiempo hábil. [2]

La instrumentación consiste en equipamientos de sistemas eléctricos y mecánicos utilizados para medir la presión, el flujo, desplazamiento, tensión, deformación y temperatura; y el monitoreo consiste en la recolección, reducción, presentación y validación de estos datos de instrumentación. El monitoreo de presas es el principal procedimiento usado para la validación de las condiciones de seguridad. El conocimiento del nivel de seguridad es importante para la elaboración de un plan de reacción a alguna alteración significativa en la estructura. [2]

El análisis detallado de los datos de la instrumentación de auscultación de presas requiere una combinación de conocimientos, especialmente de Ingeniería, Matemática, Estadística, y experiencia anterior del equipo técnico responsable del análisis de estos datos. Esto puede consumir mucho tiempo, y muchas veces hace que sea imposible realizar esa tarea de forma eficiente. Por eso, las técnicas computacionales son indicadas como herramientas auxiliares en la importante tarea de toma de decisiones. Las técnicas multivariadas denominadas análisis de agrupamiento y análisis factorial cuando aplicadas a los datos de monitoreo de presas permiten realizar el agrupamiento de los instrumentos con comportamiento similares, bien como realizar la clasificación jerárquica de los datos de mediciones y los propios instrumentos.

Las actividades que constituyen el monitoreo de presas son las inspecciones visuales regulares y la recolección y análisis de los datos de la instrumentación, cuyo objetivo es identificar eventuales alteraciones en el comportamiento observado, generando alertas para los equipos responsables de la gestión de la seguridad.[2]

A través de la aplicación del método propuesto por la Prof. Sheila Oro en su tesis doctoral en la Universidad Federal del Paraná se elaboró una herramienta gráfica parametrizable, que permite el análisis del IMCRB para cada tramo de la presa, teniendo en cuenta un periodo de tiempo específico, el cual se sumó a la actualización tecnológica del Sistema de Optimización del Análisis de Auscultación.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

Los sistemas están desarrollados utilizando una plataforma de aplicaciones de escritorio. Teniendo en cuenta el continuo avance tecnológico, hay una necesidad constante y obligada de actualización en la infraestructura y en la arquitectura de desarrollo de las aplicaciones del SOAA. Además de la falta de automatización de las mediciones que no fueron registradas en fechas dadas y selección de sensores para la aplicación de algoritmos correspondientes.

3. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

Una actualización tecnológica siempre tendrá beneficios significativos para la organización, algunos beneficios son: la reducción significativa de tiempos de espera, respuesta eficiente de los servidores, mayor estabilidad en la gestión de datos, una óptima recuperación (backup) en caso de problemas de hardware y aplicaciones desarrolladas y funcionales independientemente al sistema operativo que utilizará el cliente.

Apuntando a la mejoría de los procesos de mantenimiento, el acceso de los usuarios, las actualizaciones tecnológicas de los sistemas y el desarrollo de nuevos sistemas, es necesario la definición de una nueva arquitectura de desarrollo de software modular, que permita la escalabilidad del sistema y en donde la disponibilidad de la información sea accesible en múltiples dispositivos, pudiendo crecer en funcionalidades de una forma ordenada y eficiente.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

Con la implementación e implantación de la actualización tecnológica del SOAA a través de una plataforma integrada y modular en ambiente web, de manera a estandarizar el desarrollo de las aplicaciones que forman parte del Área de Seguridad de Represa.

- Realizar el desarrollo del Sistema Principal (SOAA), utilizando la nueva arquitectura de desarrollo de aplicaciones.
- Implementar un nuevo módulo que permita visualizar los datos del Sistema de Sismología integrada a los demás sistemas del SOAA.
- Implementar las aplicaciones utilizando la base de datos de la Nueva Central de Información y eventualmente otras bases de datos no relacionales para el manejo de grandes volúmenes de datos.

3.1 MÓDULO DE PREDICCIONES

El Módulo de Predicciones se basa en la implementación de un Modelo Matemático denominado Índice de Monitoreo Conjunto de las Reacciones de los Bloques de la presa (IMCRB), propuesto por la Prof. Sheila Oro en su tesis doctoral en la Universidad Federal del Paraná en el año 2016.

El IMCRB busca describir, mediante una serie temporal de valores numéricos, el comportamiento de la estructura de los bloques de hormigón de la presa ponderando los valores reportados por los sensores ubicados dentro de la estructura y los valores de sensores hidrometeorológicos.

Adicionalmente, mediante la aplicación de técnicas de regresión, el modelo permite predecir el comportamiento futuro de la estructura de hormigón. Para ello se aplica propias de la estadística multivariada, tales como, el análisis factorial, el Modelo Autorregresivo Integrado de Media Móvil o ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average).

3.2 MODELO ARIMA

ARIMA son las siglas de AutoRegressive Integrated Moving Average. Regresión Automática (AR) es el término que hace referencia a los retardos de las series diferenciadas (T-i), Media Móvil (MA) hace referencia a los retardos de los errores y la integración (I) es el número de diferencias usadas para hacer que la serie de tiempos sea estacionaria. [4]

3.2.1 Condiciones Necesarias para el Modelo ARIMA

- Los **datos** deben ser **estacionarios**, esto significa que las propiedades de la serie no dependen del momento en que se capturan. Una serie de ruido blanco y series con comportamiento cíclico también pueden considerarse series estacionarias.
- Los **datos** deben ser **univariantes**, ARIMA trabaja en una sola variable. La regresión automática tiene que ver con la regresión de los valores pasados.

3.2.2 Para definir un modelo ARIMA vamos a seguir una serie de pasos: Análisis exploratorio

- Ajuste del modelo
- Medidas de diagnóstico.

3.2.3 Análisis Exploratorio de Datos (EDA)

- **Análisis de autocorrelación** para examinar la dependencia en serie. Se utiliza para estimar qué valor en el pasado tiene una correlación con el valor actual. Proporciona la estimación p, d, q para los modelos ARIMA.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

- **Análisis espectral** para examinar el comportamiento cíclico. Se realiza para describir cómo la variación en una serie temporal puede ser explicada por componentes cíclicos. También se conoce como un análisis en dominio de la frecuencia. Usando esto, los componentes periódicos en un ambiente ruidoso se pueden separar.
- **Estimación y descomposición** de la tendencia. Se utiliza para el ajuste estacional. Busca construir, a partir de una serie temporal observada, una serie de componentes (que podrían usarse para reconstruir la serie original) donde cada una de ellas tiene una característica determinada.

3.3 ANÁLISIS FACTORIAL

El Análisis Factorial (AF) es un método multivariante que pretende expresar p variables observables como una combinación lineal de m variables hipotéticas o latentes, denominadas factores. Tiene una formulación parecida al Análisis de Componentes Principales, pero el modelo que relaciona variables y factores es diferente en AF. Si la matriz de correlaciones existe, las componentes principales también existen, mientras que el modelo factorial podrá ser aceptado o no mediante una prueba estadística. [3]

3.4 ÍNDICE DE MONITOREAMIENTO CONJUNTO DE RESPUESTAS DE BLOQUES DE LA PRESA

El Índice de Monitoreo Conjunto de las Reacciones de los Bloques de la presa (IMCRB) es un modelo matemático, aplicable en el marco de la problemática de Seguridad de Presas.

El mencionado índice, explicado con más detalle en la sección 3.4.1, busca describir en una forma concisa el comportamiento de los bloques de hormigón como respuesta a las condiciones ambientales tales como la temperatura ambiente, temperatura superficial del hormigón y Nivel de agua del embalse. Además, mediante la aplicación de técnicas de regresión, se busca predecir el comportamiento futuro de la estructura de la presa.

3.4.1 ÍNDICES

Un índice es una medida estadística que describe en forma sintética el comportamiento de una variable, simple o compleja, en función del tiempo.

El IMCRB es un índice que busca describir, mediante una serie temporal de valores numéricos, el comportamiento de la estructura de los bloques de hormigón de la presa ponderando los valores reportados por los sensores ubicados dentro de la estructura y los valores de sensores hidrometeorológicos.

3.4.2 REGRESIONES Y PREDICCIÓN

El Análisis de Regresión consiste en técnicas estadísticas cuyo objetivo es establecer las relaciones entre variables independientes y variables dependientes. Dicho de otra forma, el análisis de regresión busca determinar una función $Y = F(X)$ que permite calcular los valores de la variable dependiente de Y con base en los valores de la variable independiente X .

Si X e Y son valores escalares, se puede graficar $F(X)$ como una curva, la cual puede tener forma lineal, cuadrática, exponencial, polinómica, etc. En la Figura 1, se pueden observar ejemplos de tipos de regresión.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

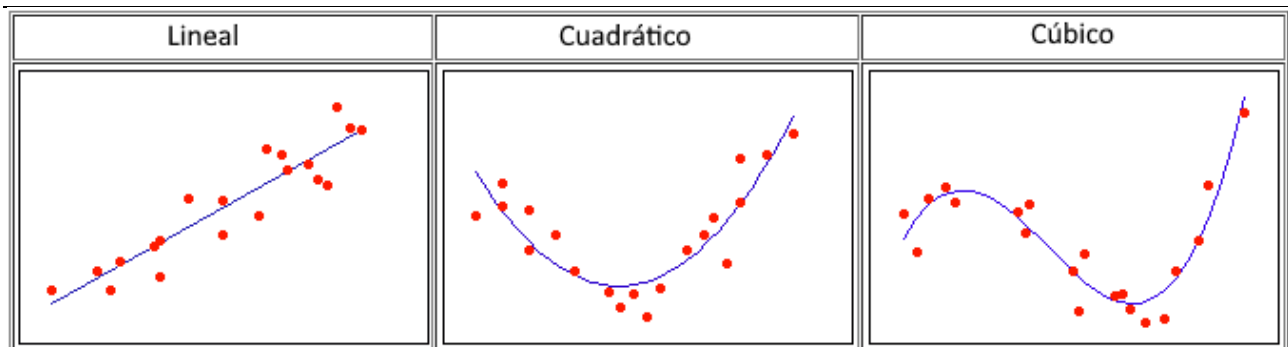


Figura 1. Ejemplos de tipos de regresión

Como ya se mencionó, el Análisis de Regresión es una técnica estadística y, como tal, se base en algún conjunto de valores observados. Sin embargo, una vez conocida la función $F(X)$ es posible estimar los valores de Y en función a valores supuestos (no observados) de X . Se habla de Predicción de los valores de Y cuando el análisis se hace sobre series temporales y los valores supuestos de X corresponden a valores futuros.

Cabe observar que en la tesis doctoral de la Prof. Sheila se plantea un enfoque basado en la estadística multivariante o multivariada, la cual implica la observación y el análisis simultáneos de más de una variable respuesta. Dicho de otra forma, las variables dependientes e independientes no son escalares sino valores vectoriales, razón por la cual no es posible aplicar directamente las técnicas de regresión.[5]

Para poder aplicar las técnicas de regresión y hacer predicciones, se plantean las siguientes adecuaciones al modelo:

- Definir un índice (el IMCRB) que permita sintetizar en una variable escalar el comportamiento de las estructuras de concreto como respuestas a los factores ambientales.
- Calcular una serie de valores del referido índice, de manera que cada valor calculado corresponda a un periodo de tiempo de un mes.
- Expresar la serie de valores de índice calculados como una serie temporal, es decir, como función del tiempo.

De esta manera se puede aplicar *técnicas de regresión y hacer predicciones*. Más específicamente, se aplica el modelo autorregresivo integrado de media móvil o ARIMA, por las siglas en inglés de **autoregressive integrated moving average**.

3.4.3 INDICE IMCRB

El índice IMCRB se define para proveer una forma sintética de describir el comportamiento de la estructura de los bloques de concreto ante las variables ambientales.

Dado que el enfoque del estudio es multivariado, es menester aplicar la técnica denominada *Análisis Factorial* sobre los datos de los sensores a fin de determinar la configuración de Factores que mejor se ajusten al modelo. Un Factor, es un valor representativo de las medidas de un conjunto de sensores altamente correlacionados entre sí, pero débilmente correlacionado con sensores correspondiente a otros Factores.

En el trabajo de tesis se han identificado 5 Factores, los cuales fueron nombrados según el fenómeno que los sensores asociados al factor describen, a saber:

- MF – Movimiento de la Fundación
- MHRB – Movimiento Horizontal Relativo entre Bloques

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

- MHRBF – Movimiento Horizontal Relativo entre Bloques y la Fundación
- MHBIT – Movimiento Horizontal de los Bloques por influencia Térmica Ambiental
- PHI – Presión Hidrostática

En el referido trabajo, el índice IMCRB se calcula según la ecuación siguiente:

$$\text{IMCRB} = 0,46\text{MF} + 0,31\text{MHRB} + 0,1\text{MHBITA} + 0,02\text{MHRBF} + 0,02 \text{ PHI} \quad (1)$$

Donde MF, MHRB, MHBITA, MHRBF y PHI son las medias de los escores factoriales calculados durante el análisis factorial, por su parte, las constantes representan los correspondientes “pesos” de los factores estipulados por autovalores de la matriz de correlación muestral, también calculada durante el análisis factorial.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

Para la implementación del módulo, primeramente, fue necesario desarrollar un algoritmo para estimar las mediciones que no fueron registradas en una dada fecha. Seguidamente, fue desarrollado el algoritmo para la selección de los sensores aptos a ser utilizados, considerando que algunos sensores poseían todas las mediciones repetidas y otros tenían distintas cantidades de mediciones para un dado periodo de tiempo.

Una vez seleccionados los sensores, se calculó la matriz de correlaciones de los sensores. La matriz de correlación es una matriz que indica los coeficientes de relación entre los sensores; posteriormente se desarrolló un algoritmo para excluir los sensores altamente correlacionados, por el hecho que esto imposibilita que la matriz de correlaciones sea invertible, lo cual es necesario para la aplicación del análisis factorial.

A continuación, se procede a la verificación de la aplicabilidad del análisis factorial por medio de la prueba de esfericidad de Bartlett y el test KMO (Kaiser, Meyer y Olkin). Luego utilizando el criterio del análisis paralelo de Horn se calcula el número de factores necesarios, para así aplicar propiamente el análisis factorial.

Con el resultado obtenido del análisis factorial, se utilizó una función para encontrar de forma automática el modelo ARIMA que mejor se ajusta a los datos. Así finalmente, por medio de la regresión estimar los valores futuros para el IMCRB. Cabe destacar que tanto para el análisis factorial, como para la aplicación del modelo ARIMA fueron utilizadas librerías del lenguaje de programación R, el cual fue desarrollado originalmente para facilitar los análisis estadísticos.

Es importante mencionar que este proceso fue realizado para todos los trechos de la presa de ITAIPU, utilizando los datos reales obtenidos del SOAA.

En la Figura 2, se puede observar el resultado del módulo implementado, donde se muestran la serie temporal del IMCRB y las predicciones en función de los datos históricos.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

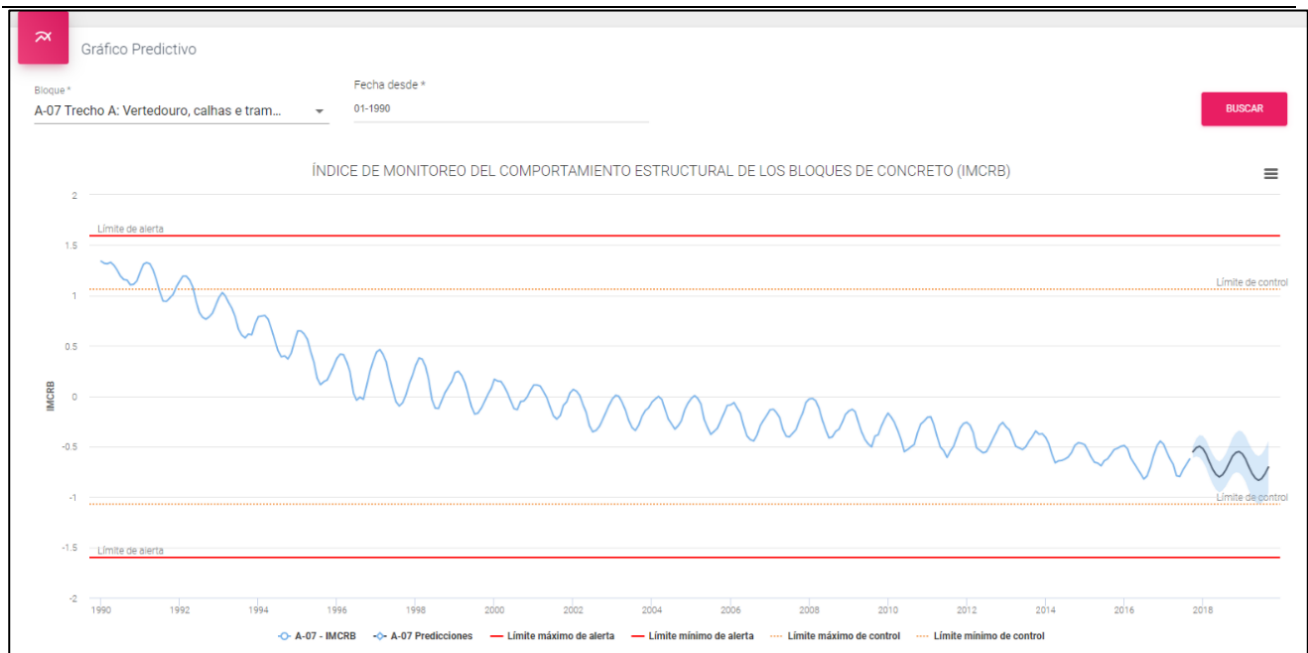


Figura 2: Interfase del SOAA en el que se muestra el resultado de aplicar el Modelo Predictivo Propuesto

5. CONCLUSIÓN

Un Sistema Informático integrado que mejorará la disponibilidad de los datos y agilizará el acceso a la información, permitiendo a los especialistas de la ITAIPU contar con toda la información necesaria para la gestión de la Seguridad de Represa. Además de la inclusión de los algoritmos para la automatización de mediciones y selección de sensores para la aplicación del Modelo Matemático denominado Índice de Monitoreo Conjunto de las Reacciones de los Bloques de la presa (IMCRB), propuesto por la Prof. Sheila Oro en su tesis doctoral.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Fabian Restelli, “Seguridad de Presas en Argentina”, **Seminario Represas y Operación de Embalses**, Argentina, Octubre 2005, 14p. Il., Cuad. Incl. 28 transpar.
- [2] Suellen Ribeiro Pardo Garcia, “Modelagem e previsão de deslocamentos em barragens de concreto: aplicação a dados de instrumentação da usina hidrelétrica de ITAIPU”, 2016, pág. 16, 22 y 39.
- [3] Análisis factorial. **RPubs**. Fecha de acceso: 25/04/2022. Enlace: www.shorturl.at/nosCR
- [4] Análisis de series temporales en R. ARIMA. **Fernando Campos**. Fecha de acceso: 25/04/2022. Enlace: www.shorturl.at/lyU25
- [5] ORO, S. R. Índice de monitoramento do comportamento estrutural dos blocos de concreto de barragens: uma abordagem multivariada. Programa de Pós-Graduação em Métodos Matemáticos em Engenharia (Tese de Doutorado), Universidade Federal do Paraná. Curitiba: UFPR, 2016.