

Panel de alertas aplicando Lógica Difusa a las lecturas de sensores de auscultación de la presa de Itaipu

**Cristhian Vega¹, Lucas Moreira¹, Richard Ruiz Diaz¹, Néstor Cáceres¹,
Sidney Viana¹, Enrique Chaparro²**

¹Parque Tecnológico Itaipu - Paraguay, ²Centro de Investigación de la FPUNE

Paraguay

RESUMEN

En el contexto de la seguridad de presas, en una central hidroeléctrica, el monitoreo y evaluación periódicos de la estructura civil resulta vital. Este proceso, denominado de auscultación, se realiza mediante sensores ubicados estratégicamente dentro de la estructura de la presa. Para cada sensor se fijan límites referenciales que permiten saber si las lecturas son normales o si están desviándose hacia valores extremos. En orden creciente de criticidad, estos límites referenciales son: límite de control, límite de alerta y límite de proyecto.

Con el objetivo de complementar el sistema de auscultación implementado, en el presente trabajo se propone una solución que incorpora novedosas características. Una de estas características es el uso de Lógica Difusa para definir cinco Conjuntos Difusos, identificados por los Valores Lingüísticos; Muy Bajo, Sub-normal, Normal, Supra-normal y Muy Alto, para describir el estado de una lectura dada utilizando lenguaje natural. Además, dado que un valor de lectura puede pertenecer a dos Conjuntos Difusos contiguos, es posible anticipar el paso a la siguiente categoría aún antes de alcanzar el valor que define el límite del Conjunto Difuso dominante.

Por otra parte, los límites de cada Conjunto Difuso son calculados automáticamente mediante estadísticas sobre las lecturas históricas recientes, lo que permite identificar tempranamente los cambios en el patrón de lecturas de cada sensor. Este monitoreo más fino e individualizado de los sensores, no requiere más horas-hombre de los técnicos, pues los ajustes en los límites se realizan de forma automática.

Otra importante mejora en el proceso de monitoreo consiste en la incorporación de un panel que, mediante gráficas de novedoso diseño, facilita la rápida interpretación del estado de cada sensor con base en la última lectura disponible. En este panel, mediante una métrica definida por los autores, los sensores se ordenan de forma que destaquen aquellos cuyas lecturas están más alejadas de lo normal, aunque todavía no se haya rebasado el límite de alerta. La propuesta descrita fue validada utilizando datos históricos generados por los sensores instalados en la represa de Itaipu para el monitoreo estructural, obteniéndose resultados muy alentadores en cuanto a utilidad y usabilidad de la herramienta desarrollada.

PALABRAS CLAVES

Auscultación de presas, Lógica Difusa, Lenguaje Natural, Ajuste automático de parámetros.

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

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto de la generación de energía en centrales hidroeléctricas, la seguridad de las presas es de extrema importancia. Una falla en la estructura de la presa que derive en un flujo rápido de vaciamiento del embalse casi con seguridad conducirá a una situación de catástrofe, debido a las graves consecuencias asociadas. Dichas consecuencias pueden ser directas e indirectas [1].

Entre las consecuencias directas se pueden citar: Pérdida de vidas, destrucción de embarcaciones, de viviendas, de infraestructuras viales e inundaciones de zonas situadas aguas abajo. Las consecuencias indirectas son más diversas, aunque no menos relevantes. Algunas de estas consecuencias indirectas serían: Caída de la producción industrial, corte en la cadena de frío de productos perecederos, incremento en la cantidad de accidentes de tránsito, corte del servicio de iluminación pública, menor ingreso fiscal por royalties e impuestos, aumento del desempleo, caída del nivel de confort doméstico, inestabilidad sociopolítica, etc. Por consiguiente, se recomienda establecer planes de acción contra condiciones que comprometan la integridad estructural de las presas [2].

Con el objetivo de minimizar riesgos de fallas estructurales es necesaria la evaluación sistemática de las condiciones de seguridad de las presas. En ese sentido, un Proceso de Monitoreo correctamente implementado es la principal herramienta utilizada para atender dicho objetivo [3]. El Proceso de Monitoreo involucra la auscultación de la estructura civil de la presa mediante inspecciones visuales regulares, además de la colecta y análisis de las lecturas obtenidas de sensores, ubicados estratégicamente dentro de la estructura, tales como péndulos, termómetros, extensómetros, piezómetros, entre otros.

El Proceso de Monitoreo, requiere la verificación periódica de las lecturas de los sensores para identificar lecturas atípicas que indiquen situaciones de riesgo o posibles fallas de los instrumentos. Para este fin, es habitual establecer valores límites de control y alerta para cada sensor. Estos límites se muestran en los gráficos de lecturas históricas para ayudar a los responsables del monitoreo a detectar las situaciones en que estos límites son rebasados. Los referidos límites de control y alerta pueden ser establecidos por métodos determinísticos aplicados en modelos numéricos que describen el comportamiento de la presa, o mediante métodos estadísticos aplicados sobre las lecturas históricas de los instrumentos [3]. Para este trabajo, resultan de interés los métodos estadísticos, pues existe abundante bibliografía que muestra la validez de estos métodos para el establecimiento de los límites de control en presas de tierra y de concreto [4 - 6].

No obstante, la revisión visual de cada gráfico histórico para verificar que las lecturas estén dentro de rangos aceptables resulta una tarea tediosa e ineficiente dada la gran cantidad de sensores que pueden estar instalados en una presa. Para resolver el inconveniente citado, en el presente trabajo se propone un Panel de Alertas, dentro del cual la normalidad o anormalidad en la última lectura de cada sensor sea fácilmente identificada mediante simple observación visual. Esto se logra mediante la implementación de un Indicador Visual de Criticidad, basado en el concepto de Conjuntos Difusos. A su vez, estos Conjuntos Difusos se configuran con base en cálculos estadísticos realizados sobre los valores de lecturas históricas de cada sensor [7].

Como parte de la propuesta, también se definió un Índice de Criticidad, el cual considera el nivel de pertenencia de una lectura particular a cada Conjunto Difuso definido. Este índice provee una métrica que permite ordenar los Indicadores Visuales de Criticidad. Esto permite implementar un Panel de Alertas, en el cual los indicadores visuales se muestran en orden descendente de criticidad (de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo), de forma que los sensores cuyas lecturas estén más alejadas de lo normal ocupen los primeros lugares. El Panel de Alertas implementado fue probado con lecturas históricas provenientes de los lectores de auscultación ubicados en la presa de Itaipu. Los resultados obtenidos son muy alentadores puesto que el panel permite efectivamente llamar la atención hacia los sensores con lecturas atípicas, por lo cual tiene mucho potencial para su utilización en sistemas de monitoreo ajustando el modelo a las necesidades específicas de los ingenieros.

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

Cabe observar que, aplicando las técnicas matemáticas de regresión sobre los datos históricos de cada sensor particular [3], la presente propuesta puede ser utilizada también como técnica de Predicción para estimar el comportamiento futuro de la estructura de la presa con base en el análisis simultáneo de los sensores [8].

Más adelante, en la Sección 2, se realiza la descripción de la problemática asociada a la auscultación de presas. En la Sección 3 se describe en forma detallada la propuesta de los autores y, finalmente, en la Sección 4 se presentan las conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

La enorme cantidad de sensores de monitoreo existentes en una presa torna la tarea de auscultación altamente exigente en términos de horas-hombre de dedicación. Por otra parte, lo más habitual es que la enorme mayoría de los sensores arrojen lecturas normales y sólo un pequeño porcentaje arrojen lecturas indicando posibles anomalías; razón por la cual, es recomendable clasificar los sensores y concentrar la atención en aquellos que son más críticos.

Una de las técnicas utilizadas para clasificar los sensores consiste en establecer límites, los cuales son pares de valores (inferior y superior) que permiten agrupar las lecturas en rangos. Los límites más utilizados son:

- **Límites de Control.** Mientras las lecturas de un sensor dado sean superiores al Límite de Control Inferior y, al mismo tiempo, sean inferiores al Límite de Control Superior, las lecturas se consideran normales. Sin embargo, si estas lecturas sobrepasan alguno de los Límites de Control, el sensor requiere atención por parte de los responsables del monitoreo.
- **Límites de Alerta.** Cuando la lectura sobrepasa los valores (mínimo o máximo) de este límite, el sensor requiere intervención del técnico responsable.
- **Límites de Proyecto.** Establecen valores que nunca deberían ser rebasados, pues indicarían condiciones técnicamente inaceptables por riesgo extremo de daños al sensor.

El establecimiento de valores numéricos para esos límites es una tarea minuciosa y exigente, razón por la cual, una vez establecidos dichos valores, sufren poca variación con el tiempo.

Los límites de Control, Alerta y Proyecto facilitan la agrupación de los sensores según el grado de criticidad que reportan.

Sin embargo, cuando existen muchos sensores clasificados en el nivel de Alerta se requiere determinar de alguna manera cuáles son los más críticos. Habitualmente, esto se consigue observando la gráfica de lecturas históricas de cada sensor y determinando visualmente la distancia a la que se encuentra la última lectura del Límite de Proyecto, tal como se observa en la Figura 1, en donde se muestran dos sensores con en la condición de alerta activa.

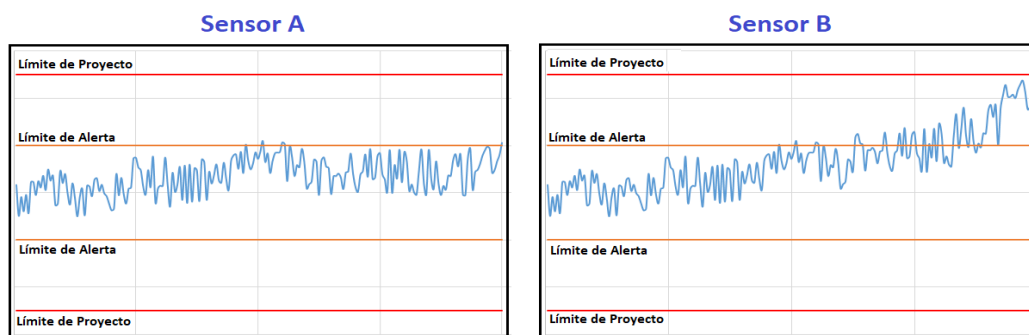


Figura 1 – Sensores en condición de Alerta.

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

De acuerdo con la Figura 1, a pesar de que ambos sensores están en condición de Alerta, se percibe que el **Sensor B** posee una condición mucho más crítica que la condición del **Sensor A**. En resumen, la problemática inherente al monitoreo de sensores utilizando la técnica mencionada radica en el esfuerzo requerido para determinar el orden de criticidad para sensores-que están en el mismo nivel de alerta. Esto se ve agravado por el hecho que los distintos sensores, que deben ser comparados, pueden estar midiendo magnitudes diferentes y utilizando escalas diferentes.

En la sección siguiente, se plantea una propuesta de solución a la problemática descrita. En esta propuesta la clasificación de la criticidad de cada sensor se realiza en forma automática y, además, la diferencia de criticidad entre sensores puede ser observada por el técnico mediante simple inspección visual.

3. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

En el presente trabajo se propone una herramienta de apoyo al monitoreo, en la forma de un Panel de Alertas, dentro del cual la criticidad de la última lectura de cada sensor sea fácilmente identificada mediante simple observación visual. Además, la herramienta es autoajustable, pues los parámetros que definen el grado de criticidad se recalculan automáticamente con base al historial reciente de lecturas.

La presente propuesta integra algunos conceptos que pueden considerarse innovadores para la solución de la problemática descrita en la sección precedente. Estos conceptos se describen a continuación y comprenden: Lógica Difusa, Indicador Visual de Criticidad, Índice de Criticidad y Panel de Alertas.

3.1 Utilización de Lógica Difusa

En lugar de utilizar límites rígidos que determinan el paso de una condición a otra de criticidad, en la presente propuesta se definieron Conjuntos Difusos [9] asociados a las distintas condiciones de criticidad.

Los Conjuntos Difusos definidos se identifican por los Valores Lingüísticos siguientes: Bajo, Sub Normal, Normal, Supra Normal y Alto.

Un valor “Normal” indica que el sensor no requiere atención.

Los valores “Sub Normal” y “Supra Normal” son equivalentes en criticidad e indican que se requiere la atención y evaluación del técnico responsable en el proceso de monitoreo.

Los valores “Bajo” y “Alto” indican una condición extrema y de alto riesgo por lo que requieren atención e intervención urgente del técnico responsable.

Un concepto central de la Lógica Difusa son las Funciones de Pertenencia o Fuzzy Functions [10]. Una Función de Pertenencia permite determinar el grado de pertenencia de un elemento Crisp (valor numérico) a un Conjunto Difuso, pudiendo cada elemento pertenecer simultáneamente a más de un conjunto. La presente propuesta incluye un método para definir las Funciones de Pertenencia con base a estadísticas sobre las lecturas históricas de los sensores. Este método está inspirado en [7], aunque se han hecho varias adaptaciones, considerando que en el referido artículo se busca resolver una problemática muy distinta a la que se enfoca en el presente trabajo.

El procedimiento computacional de evaluación propuesto fue probado utilizando lecturas de los sensores para auscultación de la presa de Itaipu. Con el fin de analizar fácilmente las distintas Funciones de Pertenencia definidas, se desarrolló una interfaz gráfica para evaluar diferentes valores crisp y visualizar su grado de pertenencia a los diferentes conjuntos difusos. En la Figura 2, se muestra la apariencia de la mencionada interfaz.

En la interfaz, mostrada en la Figura 2, se pueden evaluar diferentes valores crisp dentro del rango de definición de las Funciones de Pertenencia mediante el control deslizante, de color azul, ubicado en la parte

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

superior de la pantalla. En la parte derecha de la interfaz se muestra el Indicador Visual de Criticidad correspondiente al valor crisp seleccionado. A su vez, en la parte inferior se muestran los valores de lecturas históricas utilizados para definir los Conjuntos Difusos.

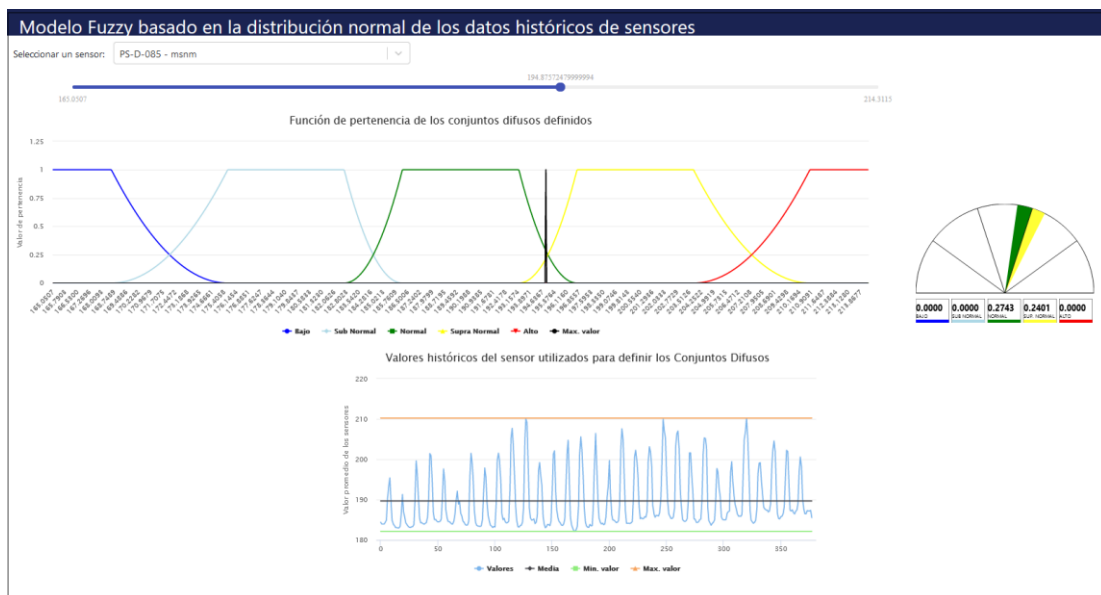


Figura 2 – Interfaz para evaluación de Funciones de Pertinencia.

3.2 Indicador Visual de Criticidad

Con el fin de facilitar la rápida identificación de los sensores que requieren intervención, en la presente propuesta se diseñó un indicador visual, cuyo comportamiento busca emular el de una brújula cuando el viajero necesita desplazarse directamente en dirección al Norte Magnético. En este modelo utilizado como base, cualquier desviación de la “aguja” hacia alguno de los lados es indeseable y cuanto mayor sea la desviación con respecto a la línea central, peor sería la situación, tal como se ilustra en la Figura 3.

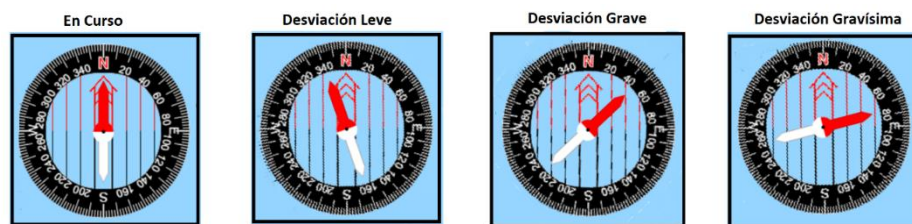


Figura 3 – Modelo de Brújula como base de inspiración del Indicador Visual de Criticidad.

El indicador propuesto, en el presente trabajo, utiliza un semicírculo que se divide en 5 sectores circulares iguales, un sector circular por cada Conjunto Difuso. Cada sector tiene asignado un color según se muestra en la Figura 4.

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

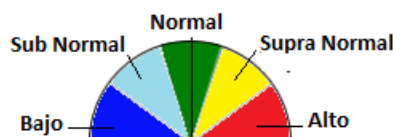


Figura 4 – Asignación de Conjuntos Difusos y colores para cada sector circular.

La pertenencia de un valor de lectura a un Conjunto Difuso se muestra coloreando el sector correspondiente en forma proporcional al nivel de pertenencia. En la Figura 4, la porción pintada emula a la “aguja” de la brújula. Así, una lectura 100% normal se mostrará como el sector central totalmente de verde “apuntando” hacia arriba, como cuando la aguja de la brújula apunta directamente al Norte Magnético. Cualquier lectura que no sea totalmente normal mostrará la “aguja” coloreada con alguna inclinación. Cuanto mayor sea esta inclinación, más crítica es la lectura. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de indicadores en orden creciente de criticidad, de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

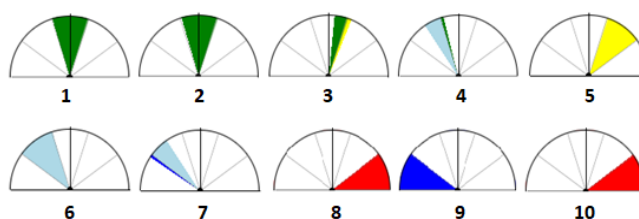


Figura 5 – Ejemplo de indicadores visuales de criticidad – en orden de criticidad creciente.

Obsérvese que los indicadores en las posiciones 5 y 6 están en situación de empate entre sí. Lo mismo ocurre con los indicadores 8, 9 y 10. El indicador en la posición 2 tiene una componente Sub Normal apenas visible, pero que lo diferencia del indicador 1.

3.3 Índice de Criticidad

Para asignar un valor numérico a la criticidad, se propone un Índice de Criticidad (ICr). El ICr se constituye en una función de orden que consiste en la suma ponderada de los valores de pertenencia a cada conjunto difuso de la mencionada lectura. Los “pesos” para ponderar cada valor de pertenencia se definen de forma que los conjuntos más críticos tengan más valor. En la Tabla I se puede observar el peso asignado a cada Conjunto Difuso.

Tabla I – Pesos para ponderar la pertenencia a los distintos Conjuntos Difusos

Valor de Pertenencia	Sigla	Peso
Valor de Pertenencia al Conjunto Normal	VPN	1
Valor de Pertenencia al Conjunto SupraNormal	VPSupN	10
Valor de Pertenencia al Conjunto SubNormal	VPSubN	10
Valor de Pertenencia al Conjunto Bajo	VPB	10000
Valor de Pertenencia al Conjunto Alto	VPA	10000

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

Obsérvese que el factor asociado a VPB y VPA es 3 órdenes de magnitud mayor en relación con VPSupN y VPSubN, y 4 órdenes de magnitud en relación con VPN, debido a que es necesario destacar las variaciones de dichos valores de pertinencia. En (1) se describe la forma de calcular el Índice de Criticidad.

$$ICr = (1 - VPN) * A + (VPSupN + VPSubN) * B + (VPA + VPB) * C \quad (1)$$

donde $A=1$, $B=10$ y $C= 10000$.

Por otra parte, en el primer término, correspondiente al Valor de Pertinencia Normal, se utiliza el complemento a 1 de VPN, a diferencia de los demás términos, que utilizan directamente los valores de pertinencia correspondientes. Esto es así porque la criticidad es inversamente proporcional a la condición de normalidad.

3.4 Panel de Alertas

Al disponer de una métrica para la criticidad, mediante el ICr, se pueden mostrar muchos Indicadores Visuales de Criticidad a la vez. Los mismos son mostrados en orden decreciente de criticidad, de manera que los sensores que más urgente atención requieran son primeramente mostrados, tal como se observa en la Figura 6.

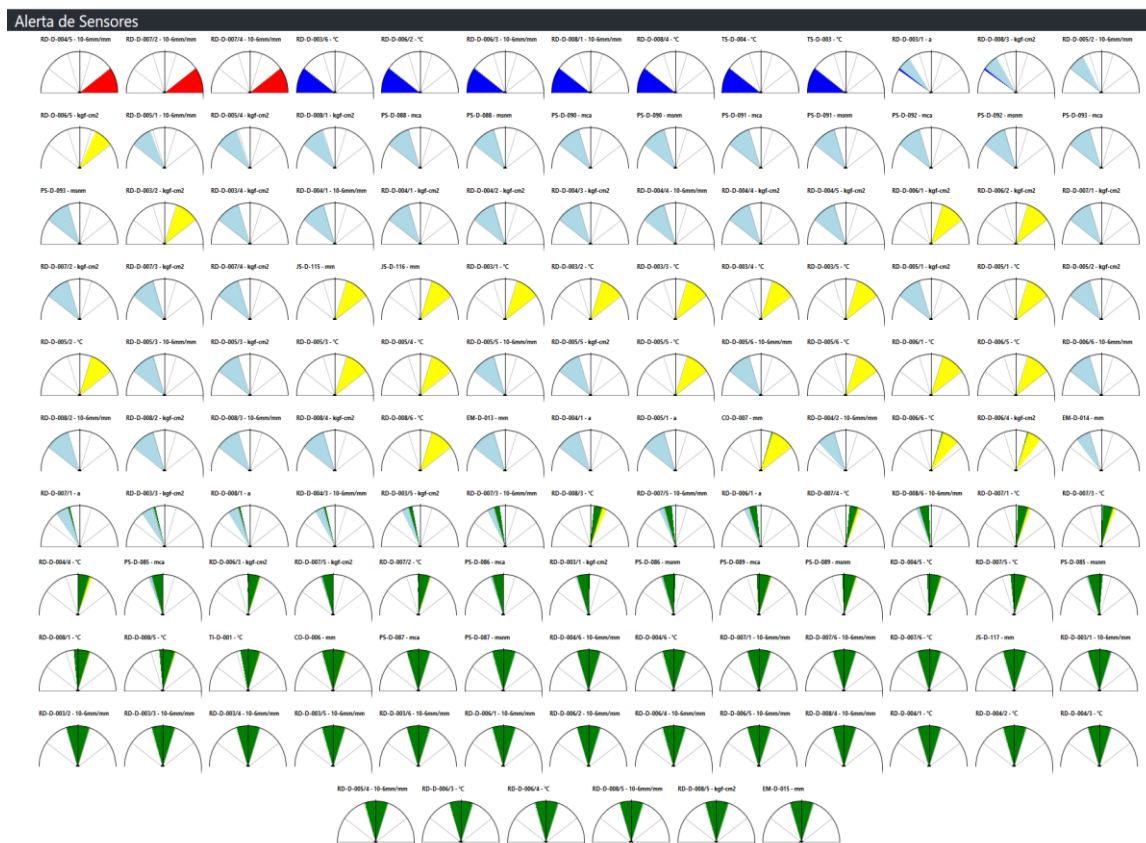


Figura 6 – Panel de Alertas mostrando 136 Indicadores Visuales de Criticidad

Los Indicadores Visuales de Criticidad que se muestran en la Figura 6 corresponden a datos tomados de los sensores de Itaipu. Sin embargo, cabe aclarar que, para evaluar el comportamiento del modelo, la configuración de los Conjuntos Difusos se estableció en forma artificialmente exigente de manera a visualizar toda la gama de valores de criticidad.

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

4. CONCLUSIONES

Se ha propuesto una herramienta para asistir al monitoreo de sensores que permite identificar rápidamente y en forma visual aquellos sensores que precisan de una atención más urgente por parte de los técnicos responsables de la auscultación. La herramienta propuesta fue implementada en la forma de un prototipo funcional, el cual fue probado con datos reales de sensores de Itaipu.

Los resultados obtenidos muestran que la propuesta tiene gran potencial para ser implementada en sistemas reales, para lo cual deberá ser ajustada para reflejar los requerimientos específicos de los responsables de la auscultación.

Como trabajo futuro se plantea la integración del Panel de Alertas propuesto con técnicas de predicción con la finalidad de facilitar la interpretación simultánea de las lecturas predichas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] SERRANO-LOMBILHO, A.; MORALES-TORRES, A.; GARCÍA-KAB, L. *Risk Analysis, Dam Safety, Dam Security and Critical Infrastructure Management*, CRC Press, 2011, p. 107-112.
- [2] BALBI, D. A. F. *Metodologias para a elaboração de planos de ações emergenciais para inundações induzidas por barragens. Estudo de caso: Barragem de PETI*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 2008, p.336.
- [3] GARCIA, S.R.P. *Modelagem e previsão de deslocamentos em barragens de concreto: aplicação a dados de instrumentação da Usina Hidrelétrica de Itaipu*. Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia (Tese de Doutorado), Universidade Federal do Paraná. Curitiba: UFPR, 2016.
- [4] CHOUINARD, L.; ROY, V. “Performance of Statistical Models for Dam Monitoring Data”. Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering ICCEBE XI, Montreal, 2006, p. 9.
- [5] FUSARO, T. C. *Estabelecimento Estatístico de Valores de Controle para a Instrumentação de Barragens de Terra: Estudo de Caso das Barragens de Emborcação 94 e Piau*. Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Engenharia da Universidade Federal de Ouro Preto - Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica. Ouro Preto, 2007, p. 309.
- [6] KUPERMAN, S. C.; MORETTI, M. R.; CIFU, S.; CELESTINO, T. B.; RE, G.; ZOELLER, K. “Critérios para fixação de valores limites da instrumentação civil de barragens de concreto e de terra”, XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens. Salvador, 2003. p. 81-96.
- [7] LIU, H.G. and GUAN, J.H. “A Model of Fuzzy Normal Distribution”. Open Journal of Statistics, 2016, p. 749-755.
- [8] 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.
- [9] BOGARIN, J.; EBECKEN, N. “Fault-Tree Analysis: A Knowledge-Engineering Approach”. IEEE Transactions on Reliability, Vol. 44, NO. 1, 1995.
- [10] BOGARIN, J.; EBECKEN, N. “Expert Scheduling of Petroleum Support Vessels for Offshore Applications”. IEEE International Conference on Fuzzy Systems Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence. Anchorage, AK, USA. 1998.