



Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año

1. DATOS GENERALES DEL PROYECTO

<i>Código del proyecto:</i>		CI2760	
<i>Título del proyecto:</i> Desarrollo de una arquitectura de auto-diagnóstico de fallas por medio de motores de inferencia heurística basados en reglas difusas para adaptación en una planta de tratamiento de agua potable			
<i>Facultad o Instituto Académico:</i>		Facultad de Ingenierías	
<i>Departamento o Escuela:</i> Instituto Cinara, Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico			
<i>Grupo (s) de investigación:</i> Abastecimiento de Agua, Instituto Cinara; Percepciones y Sistemas Inteligentes, PSI, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Mejoramiento Industrial, GIMI, Escuela de Ingeniería Mecánica			
<i>Investigadores</i> ¹	<i>Nombre</i>	<i>Tiempo asignado</i>	<i>Tiempo dedicado</i>
<i>Investigador Principal</i>	Edgar Leonardo Quiroga Rubiano	5 horas/semana	5 horas/semana
<i>Co-investigadores</i>	José Isidro García Melo	5 horas/semana	5 horas/semana
	Carlos Rafael Pinedo Jaramillo	5 horas/semana	5 horas/semana
	Gustavo A Rojas	18 horas/semana	18 horas/semana

¹ Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.



2. RESUMEN EJECUTIVO:

Las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) involucran un conjunto de procesos que hacen uso de recursos físicos de diferente naturaleza para generar transformaciones en determinadas materias primas orientadas a obtener como producto agua apta para el consumo humano, donde el desvío de por lo menos una de las propiedades del sistema (falla) lleva a la PTAP a un estado no especificado que representa un comportamiento anormal o no proyectado del sistema, que puede poner en riesgo la calidad de producto que se entrega y por ende la salud pública. En la actualidad, dadas las estrictas exigencias normativas para que se garantice la calidad del agua potable que debe ser suministrada a la población, las PTAP enfrentan grandes retos en términos de calidad, costos y eficiencia en el uso de los recursos para suministrarla. En ese sentido, se hace necesario buscar mecanismos que permitan incrementar la confiabilidad de los sistemas de producción, reducir los tiempos de respuesta ante las fallas en los mismos, y mitigar los impactos que éstas fallas tienen sobre la calidad y el costo del suministro de agua potable o la prestación de este servicio. Para ello, un abordaje recomendado es la generación de una respuesta rápida y adecuada que lleve a la PTAP a un estado seguro, donde la identificación veraz, temprana y oportuna de las fallas es el primer paso para lograrlo.

En este contexto, este proyecto de investigación se propuso como objetivo central el desarrollo de una arquitectura de auto-diagnóstico de fallas por medio de motores de inferencia heurística basados en reglas difusas para adaptación en una PTAP. Se plantearon dos procedimientos orientados al auto-diagnóstico de fallas y la especificación de la información, respectivamente. El primero, se centró en la especificación de mecanismos de supervisión de una PTAP, donde basados en conjuntos difusos y soportado, fundamentalmente, en el conocimiento de operadores expertos de la PTAP, se definió un sistema de ayuda o soporte para la operación de la planta. Considerando que el sistema de soporte permite detectar fallas e inferir de forma autónoma la causa probable de las mismas, se ofrece una herramienta al operador de la PTAP para tomar decisiones basadas en informaciones seguras provenientes de elementos constitutivos de la PTAP, tales como: sensores y actuadores, entre otros. En el segundo procedimiento, con el objetivo de contar con un sistema que facilitará la inducción de fallas en una PTAP y de forma ágil evaluar la propuesta del sistema de diagnóstico concebido, se incorporó al desarrollo de este proyecto una iniciativa orientada hacia la integración de herramientas formales, como las Redes de Petri Coloreadas y las Redes Bayesianas. El ambiente de simulación desarrollado fue más amplio y permitió definir tanto los estados normales o nominales de la PTAP como estados derivados de inducir fallas en el sistema, escenario que facilitó el desarrollo del sistema de diagnóstico propuesto.

Para evaluar la efectividad de las propuestas planteadas de diagnóstico de fallas, se desarrolló un ejemplo de aplicación centrado en la etapa de captación de agua cruda de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de EMCALI, ubicada en Puerto Mallarino de la Ciudad de Cali. Los resultados preliminares alcanzados permitieron la presentación a evaluación de dos artículos en una revista indexada de Colciencias, la formación de un talento humano a nivel de pregrado y posgrado. Así mismo, se divulgó la experiencia alcanzada con la presentación de ponencias a nivel nacional e internacional, y finalmente para continuar el proceso, se elaboraron y presentaron a convocatoria tres (3) propuestas de investigación relacionadas con los desarrollos obtenidos, lo que permitió alcanzar los productos del proyecto.

3. SÍNTESIS DEL PROYECTO:

Este proyecto de investigación se centró en el desarrollo de una arquitectura de una Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) auto-diagnosticable implementando un sistema experto basado en técnicas difusas. Para esto, fueron definidos tres objetivos específicos, a saber: i) Desarrollar estrategias para el análisis de una PTAP que permitan validar y verificar los requerimientos del mismo ante estados de falla. ii) Generar técnicas para la detección y diagnóstico de situaciones de anomalía en las PTAP por medio de un motor heurístico usando lógica difusa. iii) Implementar un piloto de aplicación de los conceptos propuestos haciendo uso de la PTAP de Puerto Mallarino de EMCALI en la ciudad de Cali.

La metodología de investigación desarrollada permitió alcanzar una fuerte relación entre teoría, herramientas y aplicaciones. Esos tres aspectos fueron sinérgicamente integrados en la especificación de una PTAP auto-diagnosticable. El tiempo de realización del proyecto se dividió en dos etapas, una etapa de estudio e investigación y otra de desarrollo. En la primera etapa se conceptualizó entorno a la detección de fallas y la PTAP, donde considerando que el consumo del agua potable es una necesidad primaria de la humanidad, las PTAP son un pilar de las organizaciones poblacionales [1]. Por esto, es necesario asegurar su correcto funcionamiento y disponibilidad, entre otros parámetros, a fin de prestar un servicio con criterios de calidad y sostenibilidad [2]. Sin embargo, ante la imposibilidad de garantizar la ausencia de fallas, se hace necesario prever mecanismos de detección y diagnóstico oportuno de anomalías o fallas, de forma que se minimicen los riesgos a los operarios, máquinas, ambiente, o alteraciones en el producto, que afecten la salud de los consumidores, entre otras consecuencias [3].

Los mecanismos de detección y diagnóstico de fallas permiten determinar el tipo, tamaño y localización de la falla, basándose en síntomas que presenta el sistema [4][5]; además, la detección y diagnóstico de fallas centra su atención en generar un margen de seguridad con tiempo suficiente para contrarrestar las consecuencias que pudiera traer un fallo a través de operaciones como: reconfiguración, mantenimiento o reparación; para ello, actualmente, se utilizan técnicas y metodologías avanzadas en el proceso de identificación de anomalías pertenecientes al área de conocimiento de la Inteligencia Artificial (IA)[6][7]; lo que permite supervisar sistemas cada vez más complejos. Por otra parte, los sistemas expertos son un subcampo de la inteligencia artificial. Éstos emulan el razonamiento de un experto humano en una cierta especialidad o campo [8][9]. El conocimiento humano es a menudo inexacto e incompleto, además toma largos periodos de tiempo pasar de ser un aprendiz a convertirse en un experto, por ello es normal que el conocimiento se adquiera paso por paso. Lo que no sucede con los sistemas expertos que poseen en su interior el conocimiento de un experto o de varios, el cual está disponible en cualquier momento para ser utilizado. Además, el conocimiento de varios expertos humanos puede combinarse, lo que da lugar a sistemas expertos más fiables, ya que se obtiene un sistema experto capaz de resolver problemas mucho más rápidamente que un solo experto humano. Por ello, los sistemas son muy valiosos en casos en los que el tiempo de respuesta es crítico. Dentro de los sistemas expertos, los más comunes son los basados en reglas heurísticas presentadas en un formato condicionado del tipo IF-THEN [10], donde diversas técnicas se han desarrollado para realizar la inferencia [11], entre las que se resalta el uso de la lógica difusa [12][13]. Aplicaciones de este tipo de sistemas son diversas. Así, es posible encontrarlas en el ámbito científico, comercial, económico y militar [14][6]. De esta forma, este tipo de sistemas resultan de gran utilidad donde exista la presencia de expertos



humanos que puedan proporcionar conocimiento para generar una herramienta automática que agilice la interpretación de datos [15]. Estos sistemas utilizan un conocimiento inferido a partir de reglas. El objetivo es ser utilizado como herramienta que ayuda en la toma de decisiones más no para sustituir al experto. Los sistemas que utilizan lógica difusa permiten trabajar con imprecisión y “vaguedad” [16], que es un abordaje comúnmente usado por el hombre para impartir conocimiento y transmitir información; utilizando lenguaje natural (Natural Language) [17]. Este abordaje se basa en conjuntos denominados “difusos” [18]. El razonamiento difuso hace posible la idea de un grado de pertenencia parcial de un elemento a un determinado conjunto utilizando una variable lingüística o la palabra que cumple la función de etiqueta de dicho conjunto, por ejemplo: alto, medio o bajo [19][20]. Estos términos se implementan en gran variedad de campos: reconocimiento de imágenes, sistemas de escritura, aplicaciones industriales de supervisión o seguridad, entre otros, [2][6][7]-[47], lo cual evidencia la efectividad del uso de los conjuntos difusos.

Referido ahora a la dinámica de una PTAP, desde un enfoque discreto, los cambios de los estados del sistema están orientados por la ocurrencia de eventos o condiciones considerados instantáneos, en este sentido es posible utilizar herramientas formales, tales como las Redes de Petri Coloreadas (CPN) o las Redes Bayesianas [48]-[51]. Estas herramientas permite representar el comportamiento del sistema considerando las complejidades derivadas de características de concurrencia de procesos, recursos compartidos, entre otras [50]-[52]. El uso de la herramienta CPN (del inglés, Coloured Petri Nets) permite visualizar la evolución de las variables de interés, las cuales son clasificadas de acuerdo al tipo de dato que pueden (colores). Estos valores pueden ser observados para conceptualizar aspectos determinados del sistema. En este contexto, varios trabajos han integrado los modelos con otras semánticas para estudios de alertas tempranas, tales como: lógica difusa y redes bayesianas [53]-[56].

Las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAPs) son sistemas productivos que tratan el agua para hacerla apta y aprovechable para el consumo humano [21]. Las etapas y procesos de potabilización varían en función de las características de calidad y proveniencia del agua (fuente de suministro), de manera que se deben eliminar los microorganismos y contaminantes que se encuentran en ella, para lo cual, se recurre a procesos físicos-químicos y microbiológicos de tratamiento [22]. La calidad del servicio de las PTAP está relacionada con la calidad, cobertura, continuidad y costos en el suministro de agua potable a las comunidades, cumpliendo con rigurosos estándares establecidos por las autoridades sanitarias nacionales, entre otros parámetros [23]. Así, es relevante disminuir las etapas de parada, garantizar el óptimo funcionamiento de equipos, supervisar el flujo de información, y además implementar una correcta toma de decisiones para evitar condiciones de riesgo sanitario, independiente de los constantes cambios en el ambiente.

El proyecto de investigación realizado se orientó a la detección de estados alterados o de falla de manera temprana y oportuna en una PTAP, utilizando herramientas de la inteligencia artificial como lógica difusa en sistemas expertos basados en reglas, así como en las Redes Coloreadas de Petri y Redes Bayesianas. Los desarrollos alcanzados fueron implementados como ejemplo de aplicación con el objetivo de detectar y diagnosticar anomalías presentes en los sensores que miden la turbiedad del agua cruda afluente a la PTAP de Puerto Mallarino de Cali, Colombia, que abastece el 60% del agua Potable de la ciudad [24], con 3.474.695 habitantes [25].



En la etapa desarrollo del proyecto, fueron definidos dos procedimientos: i) modelado del sistema de información de una PTAP usando CPN y Redes Bayesianas, ii) definición del sistema de detección y diagnóstico de falla de una PTAP. La simulación utilizando el modelo CPN y redes bayesianas permitió definir escenarios induciendo fallas en los elementos constitutivos de la PTAP, tales como sensores o actuadores. Complementariamente, estos escenarios fueron utilizados para el desarrollo del segundo procedimiento, o sea, de detección y diagnóstico de falla de una PTAP.

Como conclusiones de esta investigación se logró el desarrollo de una herramienta de soporte que permite la detección y diagnóstico temprano de anomalías en PTAPs mediante motores de inferencia difusa. La aplicación de estos planteamientos permitió detectar el estado de fallas en los sensores de turbiedad localizados en la etapa de captación de agua en la PTAP Puerto Mallarino de las empresas públicas de la ciudad de Cali, EMCALI. El sistema desarrollado evidencio su eficacia como herramienta de soporte para una toma de decisiones por parte de operadores basados en informaciones seguras de los elementos constitutivos de la PTAP. Adicionalmente, fue posible la virtualización del conocimiento de los operadores expertos mediante el uso de conjuntos difusos. Considerando que el modelo de motor de inferencia propuesto requirió de una variada fuente de información, el conocimiento de expertos fue complementado con documentación teórica y antecedentes históricos. La base del conocimiento del sistema de inferencia se estructuró como un conjunto de condiciones de límites máximos y mínimos, rango de aceptabilidad de la rata de cambio de las variables medidas y, finalmente, la creación de reglas tipo IF-THEN. Así, el uso de esta herramienta de supervisión puede soportar el proceso de toma de decisiones que se realiza con base en la sistematización de información de expertos. Además, el sistema propuesto permite la posibilidad de monitorear desde diferentes niveles de proceso (gerencia, ingeniería y operación) las condiciones de cada etapa del proceso, las irregularidades y acciones tomadas, permitiendo realizar un seguimiento más exhaustivo del proceso. Es importante aclarar que las fallas no detectadas en un dispositivo de medición pueden desencadenar anomalías en el proceso de tratamiento, y en general en cualquier proceso productivo, ya que en éste se basan decisiones de alta relevancia como la dosificación correcta de compuestos costosos entre ellos coagulante, desinfectante y neutralizante.

Una descripción de los resultados de esta investigación es presentada en los anexos de publicaciones y representan dos artículos que han sido sometidos a evaluación en la revista indexada A1, Dyna, de la Universidad Nacional de Medellín, titulados “*Supervisory System for Early Fault Detection and Diagnosis in Productive Systems Using Fuzzy Inference Engine*”. y “*Development of Information Model to Support Fault Detection and Diagnosis in a Plant Water Purification Using Coloured Petri Nets*”.

Desde el punto de vista de formación, este proyecto de investigación permitió la formación de varios profesionales, dos a nivel de posgraduación en Maestría y uno a nivel de pregrado en Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle. Un Ingeniero Mecánico, Jesús Caratar, en el marco de la Maestría en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Mecánica, trabajó y profundizó sus conocimientos en modelado de sistemas productivos, como la PTAP, utilizando la Red de Petri Coloreada, donde el profesor José Isidro García Melo, PhD, actuó en calidad de director. El estudiante Caratar está en la etapa de correcciones del documento final como último requisito para optar al título de Maestría en Ingeniería. Otro Ingeniero Mecánico, Gustavo A Rojas, en el



marco de la Maestría en Ingeniería con énfasis en Automática, trabajó y profundizó sus conocimientos en la definición de sistemas expertos en PTAP, utilizando la lógica difusa, donde el profesor Carlos Rafael Pinedo Jaramillo, MSc, actuó en calidad de director. El estudiante Rojas está igualmente en la etapa de correcciones del documento final como último requisito para optar al título de Maestría en Ingeniería. El estudiante del Programa Académico de pregrado de Ingeniería Mecánica, Felipe Mejía, en el marco del desarrollo de su proyecto de grado, trabajó y alcanzó importantes conocimientos en detección y diagnóstico de fallas en PTAP con el uso de redes bayesianas, donde el profesor José Isidro García Melo, PhD, actuó en calidad de director y en su evaluación alcanzó la máxima calificación posible. A nivel de pregrado, los estudiantes del Programa Académico de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Ana María Caicedo Pérez (código 201123164), Natalia Prieto Rodríguez (código 201123145) y Elkin Eugenio Molina Camacho (código 201010325) estuvieron vinculados al semillero de investigación de la Facultad de Ingeniería, de manera que pudieran orientarse hacia lo que podrían ser los temas de sus respectivos trabajos de grado. Los soportes de estas participaciones se encuentran en la sección de anexos de formación de personal.

Con el objetivo de hacer una difusión de los resultados, se participó en tres eventos, dos nacionales y uno internacional. El 12 de septiembre de 2014 fue organizado un seminario en “Sistemas Productivos Auto-Diagnosticables utilizando Lógica Difusa y Redes Bayesianas en PTAP”, el cual se realizó en la Escuela de Ingeniería Mecánica. Se participó en la XI Semana de la Ingeniería y 7º Simposio de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería que se realizó entre el 18 al 21 de noviembre de 2014 con dos (2) trabajos en diagnóstico de fallas. Finalmente, del 25 al 27 de marzo de 2015 se participó en el XII Congreso Internacional Sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, CIINDET 2015, realizado en Cuernavaca, Morelos, México, donde el estudiante de Maestría Gustavo A Rojas, co-investigador del proyecto, presentó el artículo “*Sistema soporte para detección y diagnóstico de fallas en plantas de tratamiento de agua*” Soportes de estas participaciones son encontradas en la sección de anexos participación de eventos.

Los desarrollos de este proyecto de investigación permitió la presentación de varias propuestas de investigación. En el mes de noviembre de 2014 se presentó a la dirección de Gestión Tecnológica e Innovación, GTI de EMCALI la propuesta “*Desarrollo de una herramienta de apoyo para la detección temprana y diagnóstico de fallas en dispositivos de medida y actuadores para la toma de decisiones*” con la participación del profesor Edgar Leonardo Quiroga Rubiano como investigador principal. Esta propuesta no logró contar con el presupuesto por parte de EMCALI pero está registrada en su Banco de Proyectos. Se presenta constancia de envío de la propuesta al GTI de EMCALI.

Adicionalmente, considerando que los desarrollos alcanzados son potencialmente aplicables a otros campos de conocimiento, en el campo de la rehabilitación física, que es un sistema crítico debido a las posibilidades de consecuencias graves para un paciente ante la ocurrencia de una falla, se consideraron los planteamientos derivados con el desarrollo del sistema de auto-diagnóstico en PTAP en dos proyectos que fueron presentados en la convocatoria interna de la Universidad del Valle del año 2014, que lograron ser aprobados y actualmente, se encuentran en desarrollo, i) *Desarrollo de un sistema tele-operado vía internet para incrementar la cobertura de atención en rehabilitación de rodilla en pacientes con vulnerabilidad geográfica.* ii) *Diseño y construcción de una unidad de rehabilitación de hombro tele-operada que integra*



requerimientos de diseño interdisciplinarios. En estos proyectos, con código SICOP CI809 y CI804 respectivamente, el co-investigador, profesor José Isidro García Melo, participa en calidad de investigador principal y co-investigador. Los soportes de estos resultados son encontrados en la sección de anexos propuestas.

Como trabajos futuros se propone la realización de un proyecto para verificar y comparar los resultados reales con los entregados por el modelo con el fin de observar las desviaciones de los parámetros de interés y posteriormente realizar la detección y el diagnóstico de anomalías.

Desarrollos posteriores se deben encaminar en el perfeccionamiento de la herramienta a fin de poder incluir los dispositivos de todas las etapas del proceso de tratamiento del agua con el objetivo de tener una herramienta de soporte para el proceso completo y llevar un registro automático de las etapas que presenta mayor densidad de fallas en sus dispositivos de medida y actuación.

PRODUCTOS:

Tabla No. 1. Cantidad y tipo de productos pactados en el *Acta de Trabajo y Compromiso* y productos finalmente presentados

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS		No. de PRODUCTOS PRESENTADOS	
Productos de nuevos conocimientos				
Artículo completo publicado en revistas A1 o A2	2		2	
Normas basadas en resultados de investigación				
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados	No. de tesis	No. De estudiantes Vinculados	No. De tesis
Estudiantes de pregrado	2	2	1	1
Semillero de Investigación	2		3	0
Estudiantes de maestría	1	1	2	2
Productos de divulgación				
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales
Propuesta de investigación	1	1	3	1
Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación.	1		3	



Tabla No. 2. Detalle de productos.

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	Presentado a la revista DyNA de la Universidad Nacional de Medellín
Nombre Particular:	Supervisory System for Early Fault Detection and Diagnosis in Productive Systems Using Fuzzy Inference Engine
Participantes:	Gustavo A. Rojas, Jesús F. Caratar, Edgar L. Quiroga, Carlos R. Pinedo, José I. García.

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	Presentado a la revista DyNA de la Universidad Nacional de Medellín
Nombre Particular:	Development of Information Model to Support Fault Detection and Diagnosis in a Plant Water Purification Using Coloured Petri Nets
Participantes:	Jesús F. Caratar, Gustavo A. Rojas, Edgar L. Quiroga, Carlos R. Pinedo, José I. García.

IMPACTOS ACTUAL O POTENCIAL:

Los impactos de este proyecto se pueden agrupar en impactos sociales y económicos como se muestra a continuación:

5.1 Impactos sociales:

Considerando que el agua es fundamental para la supervivencia de todas las formas de vida, el consumo de este vital líquido es esencial para una vida saludable además de ser un derecho humano básico (reconocido por la Organización Mundial de la Salud). En este sentido, un sistema de detección temprana de fallas basada en el diagnóstico ayuda a asegurar un agua apta para consumo humano, acorde con la normatividad de las autoridades sanitarias nacionales. Así, los resultados de este proyecto potencialmente contribuyen con la prestación del servicio de suministro de agua con criterios de calidad y sostenibilidad, ya que se pueden minimizar o atender oportunamente las posibles fallas que presente un sistema de tratamiento.

5.2 Impactos económicos:

Con el desarrollo de este proyecto se podrían potencialmente disminuir los costos de producción de agua potable. Esto por un concepto de gastos de producción y por mantenimiento correctivo. Así, el desarrollo de un sistema de soporte para la detección y diagnóstico temprano de anomalías o fallas en PTAP, mediante motores de inferencia difusa, permite tomar oportunamente las decisiones preventivas o correctivas por parte de funcionarios de operación de la planta, tales como definir las dosis de sustancias químicas a utilizar en el proceso de tratamiento. Adicionalmente, permite establecer un programa de mantenimiento preventivo lo cual permite una disminución de costos por ítem.



REFERENCIAS

- [1] L. B. Paredes, "Sistemas de Producción y Economía de la Producción," Arch. Latinoam. Prod. Anim., vol. 15, no. 1, pp. 265–277, 2007.
- [2] E. Monterroso, "La gestión de Abastecimiento," Departamento de Ciencias Sociales Universidad de Luján. Buenos Aires, Argentina, 2002.
- [3] L. F. Blázquez and L. J. De Miguel, "Diagnóstico automático de fallos para sistemas dinámicos no lineales," Reporte de Investigación, Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Valladolid, España, 1999.
- [4] B. M. González C., "Diagnóstico de fallas en un motor de corriente directa utilizando el método del bond-graph," Tesis de grado de Maestro en Ciencias en ingeniería electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, México, 2002.
- [5] R. Isermann, "Integration of Fault Detection and Diagnosis Methods," Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems, London, England, pp. 15–49, 2000.
- [6] J. Ramírez Valenzuela, "Diagnóstico de fallos en sistemas industriales basado en razonamiento borroso y posibilístico," Tesis Doctoral, Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Valencia, 2007.
- [7] W. A. Kwong, K. M. Passino, E. G. Laukonen, and S. Yurkovich, "Expert Supervision of Fuzzy Learning Systems for Fault Tolerant Aircraft Control," IEEE, vol. 83, no. 3, pp. 466–483, 1995.
- [8] E. Castillo, M. Gutiérrez, and A. S. Hadi, Sistemas Expertos y Modelos de Redes Probabilísticas, Universidad. España: Springer, 1998.
- [9] L. Stevens, Artificial Intelligence. The Search for the Perfect Machine. Hasbrouck . 1984.
- [10] R. M. Ramos, "Ejemplos de aplicación de inteligencia artificial," Cuadernos de prehistoria y arqueología, no. 16. Universidad Autónoma de Madrid, pp. 73–80, 1989.
- [11] B. M. Del Brío and A. S. Molina, Redes neuronales y Sistemas difusos, 2nd ed. Madrid, España, 2002.
- [12] S. M. Hurtado and O. O. Manco, "Diseño de un sistema experto-difuso evaluación de riesgo crediticio en firmas comisionistas de bolsa para otorgamiento de recursos financieros," Estud. Gerenciales, vol. 23, no. 104, pp. 101–129, Jul. 2007.
- [13] P. Ponce Cruz, Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería, 1 edición. México: Alfaomega Grupo Editor, 2010, p. 378.
- [14] V. B. Pandit and U. S. Navy, "Artificial Intelligence and Expert Systems: A Technology Update," IMTC TUPM, vol. 4, no. 1, pp. 77–81, 1994.



- [15] J. Durkin, Expert Systems: Design and Development. Universidad de Michigan, 1994, p. 800.
- [16] M. Duque, E. Giraldo, A. Gauthier, and A. Martínez, "El uso de la lógica difusa para la potabilización del agua," Rev. Ing. Univ. de los Andes, vol. 1, no. 12, pp. 31–35, 2000.
- [17] H. T. Nguyen and E. A. Walker, A first course in Fuzzy Logic, 3rd ed. United States: Chapman & Hall/CRC, 2006.
- [18] L. Zadeh, "Fuzzy Sets," Inf. Control, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [19] R. E. Bellman and L. A. Zadeh, "Decision Making Fuzzy Environment," Manage. Sci., vol. 17, no. 4, pp. 141–164, 1970.
- [20] L. A. Zadeh, "Commonsense Knowledge Representation Based on Fuzzy Logic," IEEE Comput., pp. 61–65, 1983.
- [21] Diseprosa, "Plantas de tratamiento de aguas," Documento preparado para la empresa Diseprosa, Madrid, España, 2012.
- [22] Y. Cárdenas A., "Tratamiento de agua coagulación y floculación," Documento preparado para SEDAPAL, Evaluación de Platas y Desarrollo Tecnológico. Lima, Perú, 2000.
- [23] Organización Mundial de la Salud, OMS, Guías para la calidad del agua potable Vol. 1, 3rd ed., vol. 1. Organización Mundial de la Salud, Geneva, Suiza, 2006, p. 398.
- [24] EMCALI_E.I.C.E_E.S.P., "Manual de operación de la planta de potabilización de agua Puerto Mallarino," Documento preparado para EMCALI, Cali, Colombia, 2011.
- [25] Alcaldía de Santiago de Cali, "Datos de Cali y el Valle del Cauca," Santiago de Cali en el Departamento del Valle del Cauca, 2004. [Online]. Available: http://www.cali.gov.co/publicaciones/datos_de_cali_y_el_valle_del_cauca_pub.
- [26] D. McNeill and P. Freiberger, Fuzzy Logic: The Revolutionary Computer Technology That Is Changing Our World. Simón and Schuster, 1994, p. 319.
- [27] J. L. Castro, J. J. Castro-Schez, and J. M. Zurita, "Aprendizaje inductivo utilizando algoritmos genéticos.pdf," in Sexto Congreso Español sobre Tecnología y Lógica Fuzzy, 1996, pp. 83–88.
- [28] E. H. Mamdani, "Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis," IEEE Trans. Comput., vol. 26, no. 12, pp. 1182–1191, Dec. 1977.
- [29] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," Int. J. Man. Mach. Stud., vol. 7, no. 1, pp. 1–13, Jan. 1975.
- [30] J.-J. Ø. Lauritz P. Holmblad, Control of a Cement Kiln by Fuzzy Logic. 1982, p. 11.



- [31] a. N. I. Wardana, "PID-fuzzy controller for grate cooler in cement plant," in 2004 5th Asian Control Conference (IEEE Cat. No.04EX904), 2004, vol. 3, pp. 1563–1567.
- [32] F. a. Batzias, "Rotary cement kiln control for reducing NOx emissions to atmosphere," IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. ETFA, no. x, pp. 879–886, 2006.
- [33] M. Fallahpour, A. Fatehi, B. N. Araabi, and M. Azizi, "A supervisory fuzzy control of back-end temperature of rotary cement kilns," in ICCAS 2007 - International Conference on Control, Automation and Systems, 2007, pp. 429–434.
- [34] M. Grabisch, "Fuzzy integral in multicriteria decision making," Fuzzy Sets Syst., vol. 69, pp. 279–298, 1995.
- [35] H. Oshima, S. Yasunobu, and S. -i. Sekino, "Automatic train operation system based on predictive fuzzy control," in Proceedings of the International Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications, 1988, p. 5.
- [36] B. Kosko and S. Isaka, "Fuzzy-Logic," Sci. Am., vol. 269, pp. 76–81, 1993.
- [37] J. A. O. Varela, "La lógica borrosa y sus aplicaciones," España, 2007.
- [38] T. J. Cord and S. Newbern, "Unmanned air vehicles: new challenges in design," 2001 IEEE Aerosp. Conf. Proc. (Cat. No.01TH8542), vol. 6, pp. 2699–2704, 2001.
- [39] K. M. Zemalache and H. Maaref, "Intelligent control for a drone by self-tunable fuzzy inference system," in 2009 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2009, 2009.
- [40] M. Sasikumar, S. Ramani, S. M. Raman, and R. Chandrasekar, A Practical Introduction to Rule Based Expert Systems. New Delhi, India: Narosa Publishing House, 2007, p. 306.
- [41] S. J. Russell and P. Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1995, p. 946.
- [42] P. Harmon and D. King, Expert systems: Artificial intelligence in business, vol. 2, no. 2. 1987, p. 125.
- [43] A. Barr and E. A. Feigenbaum, The Handbook of Artificial Intelligence, Vol. 1, William Ka. California: Los Altos, 1981.
- [44] D. Heckerman, "Probabilistic interpretations for MYCIN's certainty factors," in Proceedings of the Workshop on Uncertainty and Probability in Artificial Intelligence, 1985, pp. 9–20.
- [45] B. Buchanan and E. Shortliffe, Rule-based expert systems: The mycin experiments of the Stanford heuristic programming project, The Addison., vol. 26, no. 3. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1984, p. 742.



- [46] T. L. Quintanar, "Sistemas Expertos y sus Aplicaciones," Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México, 2007.
- [47] R. Godínez, "Modelo de un sistema experto a partir de la aplicación de la lógica difusa, para ayudar en las decisiones bursátiles." Divulg. la Investig. Univ. del SABES, vol. 1, no. 8, pp. 1–19, 2011.
- [48] J. Celaya, "Modeling and analysis of multi-agent systems using petri nets," Syst. Man ..., vol. 4, no. 10, pp. 981–996, 2007.
- [49] F. Huan and W. Lili, "Colored petri net based multi-agents dynamic task allocation modeling and analysis," 2nd Int. Conf. Inf. Sci. Eng., pp. 1080–1083, Dec. 2010.
- [50] T. Murata, "Petri nets: Properties, analysis and applications," Proc. IEEE, vol. 77, no. 4, pp. 541–580, Apr. 1989.
- [51] R. Gaeta, "Efficient discrete-event simulation of colored Petri nets," IEEE Trans. Softw. Eng., vol. 22, no. 9, pp. 629–639, 1996.
- [52] K. Jensen, L. M. Kristensen, and L. Wells, "Coloured Petri Nets and CPN Tools for modeling and validation of concurrent systems," Int. J. Softw. Tools Technol. Transf., vol. 9, no. 3–4, pp. 213–254, Mar. 2007.
- [53] CPN Group. AIS group., "software de Redes de Petri Coloridas cpn tools." [Online]. Available: <http://cpntools.org/download>.
- [54] M. Nassar and J. Melo, "Modeling and Analyzing of the Material Entry Flow System in a Pickling Line Process Using Petri Net," ABCM Symp. Ser. Mechatronics, vol. 3, pp. 444–453, 2008.
- [55] L. Gomes and A. Steiger-Garção, "Petri net based Programmable Fuzzy Controller targeted for distributed control environments," Fuzzy Syst. 1995. Int. Jt. Conf. Fourth IEEE Int. Second Int. Fuzzy Eng. Symp. Proc. 1995 IEEE Int, vol. 3, pp. 1427–1434, 1995.
- [56] I. Fliss and M. Tagina, "Multiple fault diagnosis of discrete event systems using Petri Nets," Common. Comput. Control Appl. (CCCA), 2011 Int. Conf., pp. 1–6, 2011.

Firma del investigador principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones

Por favor presente su informe impreso y en formato digital en hoja tamaño carta, letra arial 11, con espacios de 1 1/2