



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

---

## **TESIS DOCTORAL**

Monitorización, detección y estimación de estados de fallo en la  
calidad del agua de redes de distribución urbanas

Presentada por:

Joanna Alicia Gutiérrez Pérez

Dirigida por:

Dr. Manuel Herrera Fernández

Dr. Joaquín Izquierdo Sebastián

Dr. Idel Montalvo Arango

Valencia, España  
Abril 2021

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Problemática	2
1.2	El concepto de vulnerabilidad referido a los sistemas de infraestructura crítica	6
1.3	Motivación y alcances de la investigación	9
1.4	Objetivos	10
1.5	Organización de la Tesis	11
<b>2</b>	<b>El sistema de distribución de agua como infraestructura crítica</b>	<b>13</b>
2.1	La vulnerabilidad de los sistemas de distribución de agua	17
2.1.1	Peligros naturales	20
2.1.2	Amenazas intencionales	23
2.2	Evaluación de la vulnerabilidad de los sistemas de distribución de agua	34
2.2.1	Herramientas y métodos	37
2.3	Prevención y alerta temprana frente a eventos de contaminación	43
2.3.1	Desarrollos orientados a la mejora de la seguridad de las RDAs	48
<b>3</b>	<b>Enfoque multiobjetivo para la ubicación óptima de sensores de calidad en redes de distribución de agua</b>	<b>57</b>
3.1	Fundamentos de la optimización multiobjetivo	60
3.2	Planteamiento general de los objetivos para la ubicación de sensores de calidad en RDAs	63
3.3	Definición de las funciones objetivo utilizadas	66
3.3.1	Tiempo de detección	68
3.3.2	Volumen de agua contaminada consumida	70
3.3.3	Fallo de detección	71
3.3.4	Costes de implementación	73

3.3.5 El cálculo de las matrices de contaminación y de agua contaminada consumida .....	73
3.4 Conclusión .....	76
<b>4 Metodología para localizar sensores de calidad en redes de distribución de agua .....</b>	<b>79</b>
4.1 La Teoría de grafos como herramienta para el análisis de RDAs .....	80
4.1.1 Marco conceptual y principales medidas de análisis de redes .....	83
4.1.2 Medidas de centralidad en redes .....	92
4.1.3 Detección de comunidades en redes .....	97
4.2 Implementación de los fundamentos de la teoría de redes para seleccionar nodos de monitoreo en una RDA .....	98
4.3 Optimización multiobjetivo: aplicación del algoritmo evolutivo ASO para obtener una red de sensores en una RDA .....	102
4.3.1 Algoritmo evolutivo ASO.....	105
4.3.2 Consideraciones para la aplicación del algoritmo evolutivo ASO en una RDA .....	108
4.4 La hibridación entre la teoría de redes y el algoritmo evolutivo ASO .....	111
<b>5 Caso de estudio y resultados: localización de una red de sensores en una RDA .....</b>	<b>115</b>
5.1 Caso de estudio.....	115
5.2 Obtención de los nodos-sensores de la RDA de Coro con el proceso de teoría de redes.....	118
5.3 Red de sensores aplicando la metodología: Teoría de redes – Optimización multiobjetivo .....	128
<b>6 Conclusiones y trabajos futuros .....</b>	<b>147</b>
6.1 El problema.....	147
6.2 Hacia la solución.....	148
6.3 Sobre la implementación de la solución.....	149
6.4 La propuesta híbrida planteada en la tesis.....	151
6.5 Direcciones futuras.....	155
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>159</b>

## ÍNDICE DE CONTENIDO

---

<b>Publicaciones propias .....</b>	<b>177</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>185</b>