






# Water 4.0: An Holonic vision for Smart Water Supply Systems

Edgar Chacón Ramírez , PhD<sup>1</sup>, Luis Alberto Cruz Salazar , MSc<sup>2,3</sup>, Juan Cardillo Albarrán , PhD<sup>1</sup>,  
Libis Valdez Cervantes , MSc<sup>4</sup>, and Luis E. Mora M. , PhD<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Venezuela; {echacon, ijuan}@ula.ve

<sup>2</sup> Universidad Antonio Nariño, Colombia; luicruz@uan.edu.co

<sup>3</sup> Instituto de Automatización y Sistemas de Información, Universidad Técnica de Múnich, Alemania

<sup>4</sup> Fundación Universitaria Antonio de Arévalo, Colombia; decano.fadi@unitecnar.edu.co

<sup>5</sup> Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, CIDIAT-ULA, Venezuela; lemoramora@gmail.com

*Abstract— Water supply systems (WSS) share close similarities with international standards widely used in industry (specifically for food). Therefore, Industry 4.0 (I4.0) principles can integrate software modules and equipment types between WSS developers and end-users. In this process, existing WSS devices and software applications can remain in use, requiring the coexistence and integration of these current systems. Since the purpose of the concept of Cyber-Physical Systems (CPS) —as the basis of I4.0— in WSS should correspond to an entirely new way of thinking about the design of these systems. CPS combines a virtual representation of embedded systems, deterministic and real-time systems with the physical part of cloud systems. For this reason, it is essential to create methods that guide WSS developers in the implementation of techniques that can be easily changed/combined. The CPS transformation for WSS cannot be performed in a single meaningful step but instead requires the applicability of a sequence of smaller steps. In this case, the formation of migration strategies is essential for adopting WSS, with CPS playing a crucial role through modularization, reconfiguration, and decentralization that encapsulate its functions as services. Some aspects of the CPS design of digitizing and implementing self-\* properties (self-organizing, self-adapting, self-optimizing and self-healing) are vital since I4.0. Inspiration from nature and biology benefits the development of adaptive, receptive, and evolutionary systems. A particular case is holonic systems that are an elementary paradigm that can solve very complex problems. This work aims to correctly translate the purposes of CPS to the domain of WSS, considering holonic attributes and constraints. It is expected that the encapsulation of CPS functionalities as services can hide the complexity of WSS from end-users as black boxes. In this work, we consider that the CPS management in WSS is a Holonic Production Unit.*

**Keywords—** Water 4.0, Cyber-physical systems, Holonic production unit, Multi-agents, Water supply systems, WSS

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.658>  
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390

# Agua 4.0: Una visión Holónica para Sistemas Inteligentes de Distribución de Agua

Edgar Chacón Ramírez<sup>1</sup>, PhD<sup>1</sup>, Luis Alberto Cruz Salazar<sup>2</sup>, MSc<sup>2,3</sup>, Juan Cardillo Albarrán<sup>1</sup>, PhD<sup>1</sup>, Libis Valdez Cervantes<sup>4</sup>, MSc<sup>4</sup>, Luis E. Mora M.<sup>5</sup>, PhD<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Venezuela; {echacon, ijuan}@ula.ve

<sup>2</sup> Universidad Antonio Nariño, Colombia; luicruz@uan.edu.co

<sup>3</sup> Instituto de Automatización y Sistemas de Información, Universidad Técnica de Múnich, Alemania

<sup>4</sup> Fundación Universitaria Antonio de Arévalo, Colombia; decano.fadi@unitecnar.edu.co

<sup>5</sup> Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, CIDIAT-ULA, Venezuela; lemoramora@gmail.com

**Resumen—** Los sistemas de suministro de agua (siglas en inglés WSS) comparten estrechas similitudes con los estándares internacionales que se utilizan ampliamente en la industria (específicamente para alimentos). Por lo tanto, los principios de la Industria 4.0 (I4.0) pueden integrar módulos de software y tipos de equipos entre los desarrolladores de WSS y los usuarios finales. En este proceso, los dispositivos WSS existentes y las aplicaciones de software pueden permanecer en uso, lo que solicita la coexistencia e integración de estos sistemas actuales. Dado que el propósito del concepto de Sistemas ciber-físicos (CPS) —como base de I4.0— en WSS debería corresponder a una forma de pensar completamente nueva en cuanto al diseño de estos sistemas. El CPS combina una representación virtual de sistemas integrados, sistemas deterministas y en tiempo real con la parte física de los sistemas en la nube. Por esta razón, es fundamental crear métodos que guíen a los desarrolladores de WSS en la implementación de sistemas que se pueden cambiar/combinar fácilmente. La transformación CPS para WSS no se puede realizar en un paso único y significativo, sino que solicita la aplicabilidad de una secuencia de pasos más pequeños. En este caso, la formación de estrategias de migración es esencial para la adopción de WSS, con CPS jugando un papel crucial a través de la modularización, reconfiguración y descentralización que brindan una encapsulación de sus funciones como servicios. Hay algunos aspectos del diseño CPS de la digitalización e implementación de propiedades auto \* (auto organización, auto adaptación, auto optimización y auto curación) que son vitales desde la I4.0. La inspiración sobre la naturaleza y la biología beneficia al desarrollo de sistemas adaptables, receptivos y evolutivos. Un caso particular son los sistemas holónicos que son un paradigma elemental que puede resolver problemas muy complejos. Este trabajo tiene como objetivo traducir correctamente los propósitos de CPS al dominio de WSS, considerando los atributos y restricciones del enfoque holónico. Se espera que la encapsulación de las funcionalidades de CPS como servicios pueda ocultar la complejidad de WSS a los usuarios finales como cajas negras. En este trabajo, consideramos que la gestión del CPS en WSS es una Unidad de Producción Holónica.

**Palabras claves—** Agua 4.0, Sistemas ciber-físicos, Unidad de producción holónica, Multi-agentes, Sistemas de suministro de agua, WSS.

## I. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

El concepto de ciudades inteligentes, (en inglés, *Smart City* [1]), tiene muchos significados que consideran aspectos asociados a la toma de decisiones, la relación con el medio ambiente, y el uso de las nuevas tecnologías. Estas tecnologías se utilizan para gestionar un conjunto de sistemas críticos, tales como la electricidad, la salud, el transporte, y el agua, que sin los cuales el desarrollo de la ciudad no es posible [1]. Estos son sistemas que componen un *Sistema de Sistemas* (siglas en inglés, SoS), no sólo por la interdependencia entre ellos, sino internamente por su complejidad [2].

Como parte de un SoS, proporcionar agua potable de manera eficiente, confiable y autosuficiente a la población urbana es un objetivo crítico y complejo en la sociedad actual [3]. La optimización en la gestión de los recursos hídricos no se debe solo a que el agua sea un recurso escaso [4], sino que el abastecimiento a la población consume una gran cantidad de energía en las diferentes fases del ciclo de vida de los sistemas de abastecimiento de agua potable (siglas en inglés, WSS). Los WSS conforman uno de los sistemas de infraestructura críticos, que son sistemas esenciales y establecen redes de distribución para llegar a la población como proveedores de servicio [5].

Por su tamaño geográfico, diversidad y número de instalaciones, la arquitectura utilizada para este tipo de instalaciones tiende a ser distribuida, con sistemas de control autónomos en instalaciones complejas (p. Ej., Depuradoras de agua, sistemas de bombeo). Un sistema centralizado realiza tareas de coordinación y establecimiento de parámetros de control de las instalaciones especializadas y el control global de la red de transporte del agua. A partir de estos casos, los *Sistemas holónicos* se han utilizado en la fabricación como parte del diseño de procesos inteligentes distribuidos [6]–[9], ej. para la reducción del plazo de entrega de producción [10], en el control y asignación de tareas en planta, así como en la planificación de actividades productivas.

El paradigma holónico también se ha utilizado en sistemas de producción continua y procesos por lotes [11]; en la gestión y control de WSS [12], mediante la aplicación de *gemelos digitales* [13]; y sistemas eléctricos distribuidos [14]. Este trabajo tiene como objetivo presentar una estrategia, basada en holones y agentes, que permita la gestión íntegra de un WSS en

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).  
**DO NOT REMOVE**

un contexto de Smart City [1], [3], [4]. Para ello en la sección II, mostramos el estado del arte de los CPS en I4.0 asociados a WSS. En la sección III, se da un resumen sobre modelado y control de WSS. En la sección IV, se muestra la arquitectura Holónica para WSS bajo en enfoque de I4.0. En la sección V, resultados preliminares y conclusiones son mostrados

## II. ESTADO DEL ARTE:

### A. Sistemas ciber-físicos para el diseño de WSS

En las últimas décadas se han aplicado una variedad de métodos de *Sistemas ciber-físicos* (CPS) [15], [16], para el diseño de WSS [5], [17], [18]. Algunas tareas, así como el mantenimiento, la planificación, que incluye los modelos matemáticos (lineales, no lineales) dinámicos y diversas técnicas como la programación entera [19]. WSS y CPS tienen puntos en común; como tal, un CPS puede actuar como facilitador para que WSS alcance sus metas generales. La migración sin problemas de los sistemas centralizados WSS tradicionales existentes al despliegue del nuevo concepto Plug & Produce de CPS [20], como uno de los beneficios potenciales de la Industria 4.0 (I4.0).

La I4.0, comúnmente denominada *Cuarta Revolución Industrial*, puede ofrecer beneficios únicos para enfrentar el riesgo del agua y aprovechar las oportunidades económicas desaprovechadas tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados [4]. Según el *Foro Económico Mundial*, conceptos de la ciudad inteligente tienen asociados elementos como el Internet de las cosas (IoT), Big data, Inteligencia artificial (IA), robótica, sensores inteligentes, avances en ciencias de los materiales (biotecnología) y un desarrollo informático más rápido permiten soluciones en torno a los datos y la tecnología del agua como se muestra [3].

Los métodos CPS son una combinación de procesos fundamentales y se detienen cuando la limitación de las soluciones tecnológicas y la gestión global de los CPS caen dentro de una tolerancia establecida. Dado que el problema de diseño de CPS a menudo no es lineal, la información del modelamiento puede obtenerse de muchas formas, como se introduce en [16]. Este problema da como resultado una variedad de enfoques para alcanzar la solución de diseño óptima. Se propone un método usado en CPS para la integración de su función de hardware (física) con una representación de software (ciber). El CPS combina una descripción virtual de sistemas integrados, sistemas deterministas y en tiempo real con la parte física de los sistemas en la nube [15], [16].

La Tabla 1 muestra los aspectos de CPS de [16], que puede seguir los WSS. Se señalan también ejemplos potenciales que pueden beneficiarse del uso de las funciones de CPS para lograr los requisitos de WSS.

TABLA I  
ASPECTOS DE CPS DE [16], COMO BENEFICIOS DE DISEÑO DE WSS.

Aspectos CPS	Ejemplos de aplicabilidad en WSS
Integración, modularidad, servificación, colaboración	Obtención de patrones de diseño de WSS que unifican sistemas independientes, envuelven la infraestructura heredada y permiten interacciones colaborativas [19]

La interacción persona-ordenador	Representar procesos complejos de WSS a larga escala, considerando el comportamiento operativo humano de acuerdo con las necesidades del usuario final, proporcionando interfaces de usuario dinámicamente personalizables para la supervisión de WSS [21]
Características autónomas y auto *, comportamiento emergente	Utilizando la autonomía y las reconfiguraciones WSS, en interacciones de alto nivel inspiradas, por ejemplo, en el comportamiento de sistemas biológicos, holónicos, etc. [22]
Migración de infraestructura y servicios	Probar varias migraciones de enfoques de WSS, a redes de tuberías de agua nuevas o funcionales, etc. [23]
Simulación de CPS y CPS SoS a gran escala	Simular una gran cantidad de WSS, interacciones y comportamientos, así como sus complejos ecosistemas [24]
Gestión de datos, transformación, análisis, extracción de conocimiento	Aplicar modelos de optimización para respaldar enfoques que combinan la distribución local (reacción rápida) y global (optimizada y robusta) de WSS [25]
Inteligencia artificial (IA)	El aprendizaje, el ajuste y la reconfiguración como capacidades de IA para WSS grandes se pueden respaldar a través de CPS con estas capacidades [26]
Análisis de riesgos impulsado por el conocimiento y toma / gestión de decisiones	Gestionar el conocimiento y analizar los riesgos, así como tomar decisiones en nombre de la CPS individual y de los ecosistemas de WSS [5]
Gestión de SoS CPS y CPPS a gran escala	Mejorar la gestión de CPS individuales con la capacidad de implementar la recursividad utilizando métodos matemáticos e infraestructuras inteligentes [17]
Control en tiempo real	Integración de estándares de aplicaciones de control (IEC 61131-3 e IEC 61499) que garantizan las restricciones en tiempo real de WSS [18]
Seguridad, confianza, privacidad, resiliencia, seguridad	Realización de pruebas de seguridad, análisis de infraestructura, de forma inteligente y autónoma para mantener la infraestructura WSS, etc. [27]

### B. Hallazgos importantes en la literatura revisada

Varios desafíos al aumento del control de WSS a muy gran escala para el diseño, modelado y simulación de CPS se expresan en [17], que describe las técnicas de modelos de ecuaciones diferenciales parciales para simplificar el modelo CPS, así como el diseño del sistema de control local y sus estrategias para implementar el control de WSS. Las características denominadas arquitectura de un banco de pruebas de distribución de agua (WADI) incluyen la integración de tecnologías de software y hardware industrial existentes [18]. Ejemplos clásicos de estas tecnologías son los controladores lógicos programables (PLC), y las fases controladas a través de unidades terminales remotas (RTU) y múltiples sensores capaces de WADI para realizar análisis de seguridad para redes de distribución de agua. Otros trabajos similares de CPS estiman los efectos de los ataques a CPS sobre el comportamiento hidráulico de WSS [27]. Los ataques a los CPS pueden tener repercusiones significativas en el diseño de mecanismos de detección de ataques, que deberían reconocer comportamientos atípicos en un WSS, así como los componentes de CPS que se “piratean”.

Un trabajo más estrechamente relacionado con la investigación presentada en este artículo es [22], donde se propone un concepto holónico para sistemas de control distribuido en sistemas de calefacción urbana. El artículo destaca el modelado holónico basado en la combinación de dos enfoques. Primero está el objeto modelado donde las relaciones y ecuaciones matemáticas describen sus atributos físicos. En

segundo lugar, el examen de la información de entrada / salida (datos de operación) del objeto analizado puede lograr las características holónicas. El resultado del modelo de este trabajo se denomina “caja negra” [22].

Otro trabajo relacionado con *Multi-agentes* (MAS) en [26], combina adecuadamente agentes y las tecnologías IoT (eso es, agentes móviles, redes inalámbricas, sensores, sistemas inteligentes) para crear un CPS adaptativo y autónomo que respalde la minería de datos e información en un sistema de gestión fluvial. La diferencia crítica entre estos trabajos y nuestro artículo es que integramos un enfoque único basado en el concepto de *Unidad de Producción Holónica* (HPU) [14], [15], [28], [29]. En este caso, los holones definidos y otros elementos componen el CPS para el diseño de WSS [12], [13], así como se describe en la siguiente sección.

### III. MODELADO Y CONTROL DE WSS

Un WSS es un sistema diseñado y construido para asegurar el suministro de agua potable a una población e involucra el estudio y caracterización de las fuentes, la demanda poblacional, su distribución geográfica, y la topografía del terreno. El sistema concebido intenta, con el mínimo costo, asegurar un suministro continuo y de calidad a la población tomando en cuenta las curvas de demanda diaria y estacional, para un pronóstico de suministro de las fuentes basado en estadísticas de disponibilidad de agua en las fuentes. Es una de las estructuras más complejas que debe gestionar una Smart City, asegurando un servicio continuo a los suscriptores, y especialmente a los usuarios críticos.

#### A. Los WSS como organización

Un WSS nunca se completa, ya que la población varía creando nuevos asentamientos, las necesidades de agua cambian con el cambio de uso de las áreas geográficas, se desarrollan nuevas tecnologías, etc. Las etapas del ciclo de vida de un WSS se muestran en la Fig. 1 y se describirán en esta sección brevemente.

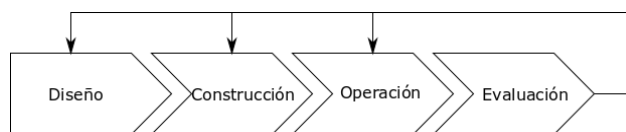


Fig. 1. El ciclo de vida de un sistema de suministro de agua

La evolución de un WSS necesita de:

**Diseño.** Consiste en el estudio y caracterización de las fuentes de agua cruda y la demanda de agua potable para una región geográfica, la definición de la infraestructura a construir mecanismos de captación de agua según el tipo de fuentes, transporte de fuentes a la potabilización (hacer agua potable), redes de almacenamiento y distribución, y plan de implementación.

**Construcción y mantenimiento de infraestructuras.** Desarrollo de nuevas instalaciones y refactorización según el plan de crecimiento para atender el crecimiento poblacional y envejecimiento de las instalaciones.

**Operación.** Incorporación y control de usuarios, mantenimiento de instalaciones y reparaciones menores, gestión de abastecimiento de agua: potabilización, transporte, distribución, seguimiento de diferentes procesos. Las diferentes configuraciones de las instalaciones dan a la operación un ingreso de agua bruta y una demanda en un lapso de tiempo.

**Evaluación.** Varias funciones están asociadas a la evaluación como son: la determinación de costos operativos, determinación del desempeño de equipos e instalaciones y satisfacción de los usuarios, comportamiento de la red ante fallos y facilidad para el seguimiento de las secuencias de operaciones. Así, en esta etapa se verifican el cumplimiento de las instalaciones para el crecimiento de la demanda.

El IDEFO de una empresa hidrológica se muestra en la Fig. 2. Los recuadros representan unidades funcionales y las líneas representan flujos (materiales, recursos, información) entre las unidades funcionales.

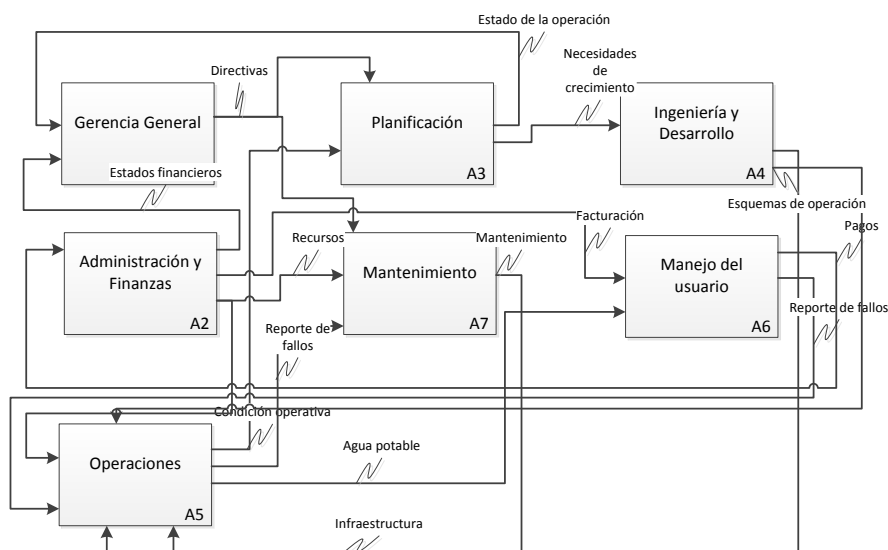


Fig. 2. IDEFO de una organización hidrológica.

Para cumplir con las funciones anteriores, en general, la empresa se organiza en unidades de: i) planificación, asociada a la etapa de diseño y parte de la evaluación de las operaciones; ii) Ingeniería y desarrollo que realiza las actividades relacionadas con la etapa de construcción y ejecución de mantenimientos significativos; iii) Comercial responsable de la gestión de los suscriptores al servicio, facturación en la operación del sistema y soporte para la evaluación; iv) Operaciones, que van desde la recolección en las fuentes hasta la entrega al consumidor, y algunos aspectos de la etapa de evaluación; v) Mantenimiento asociado a la gestión de los equipos en las instalaciones, manejo de los talleres y almacenes; y vi) Administración, responsable de las funciones de apoyo a la empresa y vii) Gestión de la organización.

Una WSS como organización realiza el conjunto de funciones soportadas por una gran cantidad de herramientas (software y hardware) que ayudan al diseño, operación, optimización del proceso. Estas herramientas incluyen simuladores hidráulicos como EPANET, Sistemas de Información Geográfica (GIS). Asimismo, el análisis de datos (analítica de datos) ayuda a determinar el estado del WSS utilizando la información capturada por los sistemas en tiempo real (IIoT), la información de los sistemas de gestión del cliente, para identificar tendencias de consumo, fugas en las tuberías, deterioro de válvulas y bombas. Los usuarios del servicio también forman parte del monitoreo de la red, informando la ausencia del servicio o la aparición de fugas visibles en la red. Todos estos elementos deben estar integrados para garantizar un rendimiento óptimo del sistema.

#### IV. AGUA 4.0: ARQUITECTURA HOLÓNICA DE WSS BAJO EL PARADIGMA DE INDUSTRIA 4.0

El creciente paradigma de I4.0 pueden mejorar cualquier tipo de ecosistema, incluidos los WSS, como se ha mostrado previamente en [30]. Así, *Agua 4.0* hace referencia a un ecosistema inteligente en donde las relaciones y las conexiones entre los elementos de los WSS, como el servicio público de suministro de agua, generará tanta importancia como los eslabones independientes de la cadena del ciclo del agua. Además, como la transformación digital liderada por I4.0, Agua 4.0 sugiere que se puede pasar de pequeños eslabones de la cadena –que funcionan relativamente bien de forma aislada– a la interconexión global de SoS y elementos que conforman un ecosistema interdependiente y mucho más eficiente [31]. Estas interconexiones cambiarían y convendrán la manera de producir en el procesamiento holónico de WSS [12], [13], combinando productos y servicios transversales en cualquier sistema de infraestructura crítica, como se detallará en esta sección.

##### A. Arquitectura Holónica del WSS: Componentes IT / OT

Las principales etapas en la producción de agua potable se muestran en la Fig. 3. Cada paso se efectúa mediante uno o más servicios, formando varios arreglos que permiten satisfacer la demanda que cambia según la hora del día. Entre los aspectos a tener en cuenta para establecer la configuración, están el costo

de la energía, la prioridad de los abonados, en la cantidad de agua bruta disponible (en caso de disminución) y la calidad.

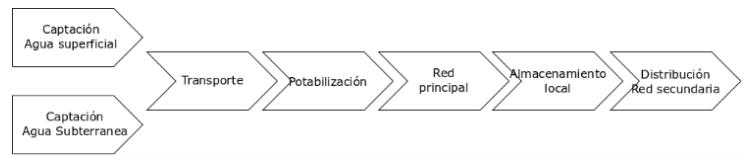


Fig. 3. La cadena de valor de la producción de agua potable

Las instalaciones, la red de tuberías, los sistemas de bombeo, las válvulas, el agua (calidad, caudal, presión, cantidad), son elementos comunes en toda la organización. La información de estos elementos debe corresponder a la realidad, pudiendo realizar evaluaciones y predicciones sobre estos elementos, por lo que los modelos de cada uno de ellos deben estar disponibles para las diferentes aplicaciones. Cada componente del sistema bajo Agua 4.0 debe tener el gemelo digital correspondiente.

El producto, agua, se transporta desde el punto de mayor energía a uno de menor energía, a través de canales o tuberías. La energía potencial que tiene el agua puede venir dada por las coordenadas geográficas del punto de entrada, o mediante bombas que prestan presión al agua en dicho punto geográfico. El flujo, la velocidad y la pérdida de energía dependen de las características del medio (diámetro de la tubería, rugosidad). La energía suministrada al agua por la bomba depende de la tecnología utilizada. Cuando es necesario eliminar energía, se utilizan elementos mecánicos (válvulas) para regular el flujo o la presión.

Igualmente, la cadena de valor presentada anteriormente se debe repensar bajo los nuevos enfoques de economía circular, en la cual, aspectos como la maximización del valor del agua, el reúso y revalorización de productos, la maximización de la productividad y eficiencia, la minimización de impactos al ambiente y la creación de nuevas oportunidades de trabajo, van de la mano con el enfoque planteado. Asimismo, se debe tener en cuenta que las 6 R de Economía circular se alinean en este enfoque a saber: Reducir, Reúso, Reciclaje, Recuperación, Revalorización y Restauración [32].

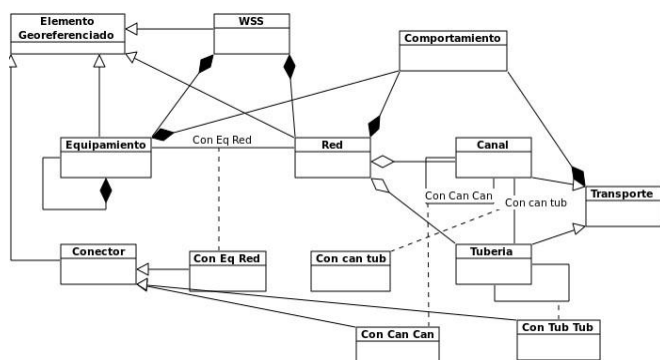
Para tener una descripción completa del WSS, se debe almacenar la información de: reservorios de agua cruda y almacenamiento de agua potable, instalaciones de tratamiento, tuberías (redes primarias y secundarias), sistemas de bombeo, sistemas de regulación y sus conexiones con atributos geográficos y de materiales de construcción, modelos de comportamiento, capacidades y sus interconexiones. Esta información debería ser útil en el diseño, mantenimiento y operación de WSS.

En esta visión, de Manufactura Orientada por Servicios [33], una instalación proporciona un servicio al WSS; estos servicios son depuración, suministro de energía, eliminación de energía, almacenamiento y transporte. Cada una de las instalaciones tiene puertos donde permite la conexión con otros componentes. Un puerto tiene coordenadas geográficas, lo que permite estimar la energía potencial asociada a la altura, un área de transporte que ayuda a definir el flujo de producto. En

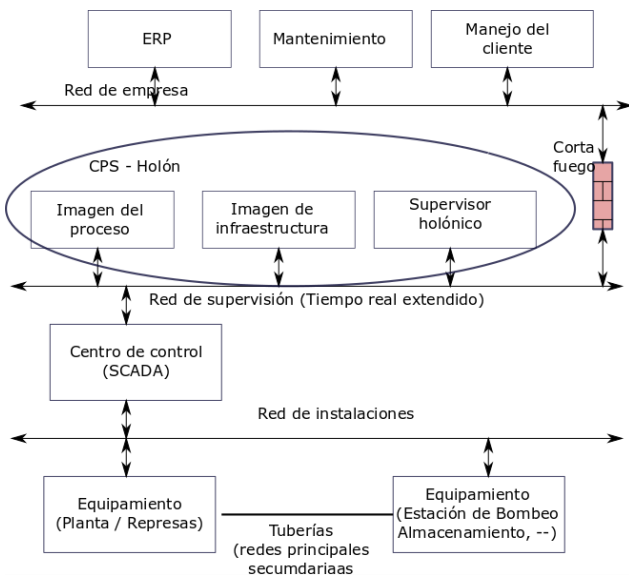
Sistemas de Gestión Eléctrica existe un estándar para la descripción de la red que es el Modelo de Información Común (CIM) (IEC 61968/61970), y se puede adaptar de manera similar para WSS, como se propuso para los sistemas de transporte de gas.

El modelo debe incorporar elementos que describan el comportamiento del sistema, esquemas de control para tener un gemelo digital. La ontología del sistema de WSS se muestra mediante diagramas de clases UML en la Fig. 4 (a), y la arquitectura tecnologías de la información (IT) y tecnologías operativas (OT) que mantienen la información está en la Fig. 4 (b) y se puede adaptar de manera similar para WSS como se propuso para los sistemas de transporte de gas.

El modelo debe incorporar elementos que describan el comportamiento del sistema, esquemas de control para tener un gemelo digital. La integración de un gemelo digital en un CPS puede combinar tecnologías de ingeniería IT / OT, y como resultado un robusto CPS en la fase de automatización prescriptiva, podría incluso ejecutar decisiones más óptimas en los WSS, como se evidencia en [31].



(a) Ontología de un sistema WSS utilizando un diagrama de clases UML. Con Can Can: conector canal canal, Con Eq Red: conector equipo red, Con cab tub: conector canal tubería, Con Tub Tub: conector tubería tubería.



(b) Arquitectura de TI / OT

Fig. 4. Arquitectura holónica para un WSS

En [34] se describe lo difícil que es administrar WSS por la cantidad de información necesaria para mantener el sistema, y la cantidad de aspectos a evaluar con decisiones que deben tomarse en tiempo real. La incorporación de IoT ha creado una gran cantidad de datos que deben procesarse utilizando técnicas de análisis de datos que deben alimentar el conocimiento de WSS. La arquitectura de IT / OT debe estar preparada para soportar este contexto.

Es evidente que al tener gran cantidad de información y los gemelos digitales del proceso, se pueden optimizar los mismos con la ayuda de enfoques de ciencia del dato e inteligencia artificial (IA) y Aprendizaje por refuerzo (RL) con la combinación o apoyo de otros enfoques meta-heurísticos que apliquen para optimizar y solventar en corto tiempo la experiencia adquirida por los expertos del sector WSS, y visualizar nuevos caminos de solución en problemas complejos que afronta el sector.

### V. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Un WSS debe reconfigurarse continuamente para satisfacer la demanda de la capacidad de las diferentes instalaciones, la disponibilidad de agua cruda en los reservorios y las posibles fallas que pueden aparecer en tuberías y equipos. Un modelo global de la red con todas las configuraciones posibles y todas las condiciones de demanda e instalaciones y la disponibilidad de agua cruda es difícil de construir y mantener, además de que va a tener cambios continuamente asociados al consumo diario, cambios en los patrones de lluvias, etc., donde es más fácil ir actualizando la información de cada componente.

El uso de técnicas de planificación y programación online aparece como la solución para este tipo de procesos. Cada nueva situación resulta de un cambio en uno de los componentes del sistema, y eso requiere una nueva configuración para responder a las nuevas condiciones.

En [26], los autores señalan que la tendencia es utilizar la integración de Planificación, Programación y Control de circuito cerrado para tener una respuesta rápida a las perturbaciones en un entorno de proceso por lotes. Las unidades son independientes. La composición de los modelos permite establecer las configuraciones de producción. Cada unidad se considera un sistema autónomo, con diferentes modos de funcionamiento para garantizar un objetivo de producción que corresponde a una etapa del modelo de producto.

El encadenamiento de diferentes unidades con modos de operación compatibles asegura que se logren todas las etapas del modelo de producto. El modelo de cada unidad (modelo de comportamiento) es un modelo híbrido compuesto por un modelo de sistema de eventos que describe las diferentes macro etapas de la unidad, y un conjunto de modelos continuos asociados a los diferentes modos de funcionamiento de la unidad y que hace coincidir cada estado del modelo con eventos discretos. Este modelo, así concebido, contiene el estado de los recursos y la infraestructura y, por tanto, el procesamiento del producto (agua).

La evolución de la unidad se muestra en la Fig. 5. En la etapa de negociación, se obtienen las configuraciones posibles y se selecciona la mejor configuración alcanzable (un subconjunto de configuraciones posibles). El procedimiento que se utiliza se basa en sistemas híbridos bi-simulación para sistemas interconectados.

Los eventos discretos de la HPU se clasifican en: a) eventos internos, que son las acciones asociadas con la llegada o salida de una condición de operación, detección de fallas en los equipos y b) eventos externos, que se relacionan con cambios en las otras unidades.

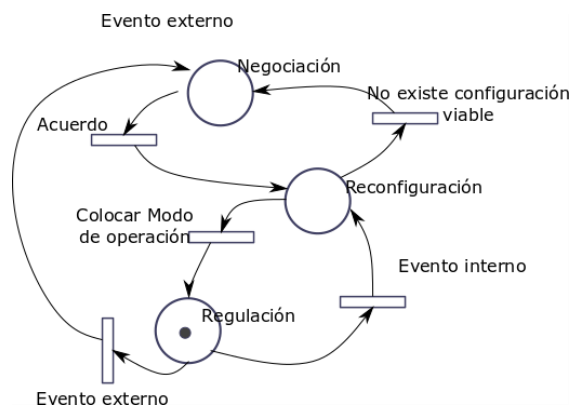


Fig. 5. Evolución de una unidad de producción holónica.

La programación en línea en sistemas cuyo comportamiento es descrito mediante abstracciones discretas [35], [36], del comportamiento de cada unidad. La detección de eventos como cambios de nivel, cambios en el patrón de consumo o fallos detectados a nivel de piso de planta, son transferidos a nivel de la capa MES donde se construye un árbol de alcance con las abstracciones discretas de los distintos componentes para establecer una nueva configuración hasta el próximo evento.

Como conclusión, un aspecto clave, en el diseño inteligente de un WSS, es la interacción automatizada y descentralizada entre la operación y otros SoS [12], [13], como el sistema de mantenimiento. El supervisor de la HPU detecta eventos, y ante la detección de un evento que implica el mantenimiento, el supervisor le envía un mensaje al sistema de encargado y reconfigura la operación a un modo de operación degradado, y espera la recuperación de la falla. La operación interactúa con el sistema de mantenimiento para recuperar el modo de operación en la HPU.

#### AGRADECIMIENTO

El autor Luis Cruz agradece las becas otorgadas en Colombia, por Minciencias convocatoria “756 Doctorados en el exterior” y a la Universidad Antonio Nariño bajo el “Programa de Formación de Alto Nivel PFAN”.

#### REFERENCIAS

[1] T. Nam and T. A. Pardo, “Conceptualizing smart city with dimensions of technology, people, and institutions,” in

*Proceedings of the 12th annual international digital government research conference: digital government innovation in challenging times*, 2011, pp. 282–291, doi: 10.1145/2037556.2037602.

[2] D. Joannou, R. Kalawsky, S. Saravi, M. Rivas Casado, G. Fu, and F. Meng, “A Model-Based Engineering Methodology and Architecture for Resilience in Systems-of-Systems: A Case of Water Supply Resilience to Flooding,” *Water*, vol. 11, no. 3, p. 496, Mar. 2019, doi: 10.3390/w11030496.

[3] World Economic Forum, “5 things you need to know about water,” 2019. <https://www.weforum.org/agenda/2019/03/5-things-you-need-to-know-about-water/> (accessed Apr. 04, 2019).

[4] World Economic Forum, “Harnessing the Fourth Industrial Revolution for Water,” *Fourth Ind. Revolut. Earth Ser.*, 2018, [Online]. Available: [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_WR129\\_Harnessing\\_4IR\\_Water\\_Online.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_WR129_Harnessing_4IR_Water_Online.pdf).

[5] Y. Wei and S. Li, “Water supply networks as cyber-physical systems and controllability analysis,” *IEEE/CAA J. Autom. Sin.*, vol. 2, no. 3, pp. 313–319, 2015, doi: 10.1109/JAS.2015.7152666.

[6] W. Derigent, O. Cardin, and D. Trentesaux, “Industry 4.0: contributions of holonic manufacturing control architectures and future challenges,” *J. Intell. Manuf.*, 2020, doi: 10.1007/s10845-020-01532-x.

[7] J. Barbosa, P. Leitão, E. Adam, and D. Trentesaux, “Dynamic self-organization in holonic multi-agent manufacturing systems: The ADACOR evolution,” *Comput. Ind.*, vol. 66, pp. 99–111, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.compind.2014.10.011.

[8] A. Giret and V. Botti, “Engineering Holonic Manufacturing Systems,” *Comput. Ind.*, vol. 60, no. 6, pp. 428–440, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.compind.2009.02.007.

[9] P. Leitão and F. Restivo, “ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control,” *Comput. Ind.*, vol. 57, no. 2, pp. 121–130, Feb. 2006, doi: 10.1016/j.compind.2005.05.005.

[10] P. Torres-Palacio, “The reduction of production lead time using holonic manufacturing: experiment and analysis,” *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 31, no. 3, pp. 648–668, Sep. 2019, doi: 10.1108/JMTM-03-2019-0097.

[11] N. Chokshi and D. McFarlane, “A distributed architecture for reconfigurable control of continuous process operations,” *J. Intell. Manuf.*, 2008, doi: 10.1007/s10845-008-0075-7.

[12] E. Chacón R., L. A. Cruz S., J. C. Cardillo, and Y. Paredes, “A control architecture for continuous production processes based on Industry 4.0: Water Supply Systems application,” *J. Intell. Manuf.*, pp. 1–19, 2021, doi: 10.1007/s10845-021-01790-3.

[13] J. C. Cardillo, E. Chacón R., L. A. Cruz S., and Y. Paredes, “Digital Twin in Water Supply Systems to Industry 4.0: The Holonic Production Unit,” in *Service-Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future. Sohoma Latin America 2021*, 2021, pp. 1–12.

[14] G. Zapata M., “Propuesta Para la Planificación, Programación, Supervisión y Control de la Producción en Procesos Continuos Desde la Teoría del Control Supervisorio y el Enfoque Holónico,” PhD thesis, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, 2011.

[15] L. A. Cruz S., J. H. Carvajal, O. A. Rojas, and E. Chacon,

- “Cyber-Physical System for Industrial Control Automation Based on the Holonic Approach and the IEC 61499 Standard,” in *2018 Forum on Specification & Design Languages, FDL*, Sep. 2018, vol. 2018-Septe, pp. 5–16, doi: 10.1109/FDL.2018.8524082.
- [16] P. Leitão, S. Karnouskos, L. Ribeiro, J. Lee, T. Strasser, and A. W. Colombo, “Smart Agents in Industrial Cyber–Physical Systems,” *Proc. IEEE*, vol. 104, no. 5, pp. 1086–1101, May 2016, doi: 10.1109/JPROC.2016.2521931.
- [17] H. A. Nasir and A. Muhammad, “Control of very-large scale irrigation networks: A CPS approach in a developing-world setting,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 44, no. 1 PART 1, pp. 10739–10745, 2011, doi: 10.3182/20110828-6-IT-1002.03352.
- [18] C. M. Ahmed, V. R. Palleti, and A. P. Mathur, “WADI: A Water Distribution Testbed for Research in the Design of Secure Cyber Physical Systems,” in *Proceedings of the 3rd International Workshop on Cyber-Physical Systems for Smart Water Networks*, 2017, pp. 25–28, doi: 10.1145/3055366.3055375.
- [19] J. Lin, S. Sedigh, and A. Miller, “A general framework for quantitative modeling of dependability in cyber-physical systems: A proposal for doctoral research,” in *Proceedings - International Computer Software and Applications Conference*, 2009, doi: 10.1109/COMPASAC.2009.103.
- [20] L. A. Cruz Salazar, F. Mayer, D. Schütz, and B. Vogel-Heuser, “Platform Independent Multi-Agent System for Robust Networks of Production Systems,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1261–1268, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.359.
- [21] A. Nasir, B. H. Soong, and S. Ramachandran, “Framework of WSN based human centric cyber physical in-pipe water monitoring system,” in *11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2010*, 2010, doi: 10.1109/ICARCV.2010.5707941.
- [22] V. Lubomir, D. Viliam, and S. Tomas, “Heat production and distribution control system based on holonic concept,” *WSEAS Trans. Heat Mass Transf.*, vol. 9, no. 1, pp. 226–233, 2014.
- [23] J. Pinto, H. Varum, I. Bentes, and J. Agarwal, “A Theory of Vulnerability of Water Pipe Network (TVWPN),” *Water Resour. Manag.*, 2010, doi: 10.1007/s11269-010-9655-3.
- [24] J. Lin, S. Sedigh, and A. Miller, “Towards integrated simulation of cyber-physical systems: A case study on intelligent water distribution,” *8th IEEE Int. Symp. Dependable, Auton. Secur. Comput. DASC 2009*, pp. 690–695, 2009, doi: 10.1109/DASC.2009.140.
- [25] J. Marques, M. Cunha, and D. A. Savić, “Multi-objective optimization of water distribution systems based on a real options approach,” *Environ. Model. Softw.*, vol. 63, pp. 1–13, 2015, doi: 10.1016/j.envsoft.2014.09.014.
- [26] T. Kotsilieris and G. T. Karetos, “A mobile agent enabled wireless sensor network for river water monitoring,” *Proc. - 4th Int. Conf. Wirel. Mob. Commun. ICWMC 2008*, pp. 346–351, 2008, doi: 10.1109/ICWMC.2008.71.
- [27] R. Taormina, S. Galelli, N. O. Tippenhauer, E. Salomons, and A. Ostfeld, “Characterizing Cyber-Physical Attacks on Water Distribution Systems,” *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 143, no. 5, p. 04017009, 2017, doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000749.
- [28] L. A. Cruz S., *Automatización Industrial Inteligente: Una estructura de control desde el paradigma holónico de manufactura*, 1st ed. Beau Bassin, Mauritius: Editorial Académica Española, 2018.
- [29] L. A. Cruz S., O. A. Rojas A., and E. Chacón, “Implementing Industrial Control Automation for Holonic Manufacturing Systems based on the Production Unit Architecture,” in *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing: Proceedings of SOHOMA*, 1st ed., T. Borangiu, D. Trentesaux, A. Thomas, and S. Cavalieri, Eds. Bergamo, Italy: Springer International Publishing, 2018, pp. 1–14.
- [30] E. Chacón R., J. C. Cardillo, and L. A. Cruz S., “The Control of Water Distribution Systems as a Holonic System,” in *Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, 1st ed., T. Borangiu, D. Trentesaux, P. Leitao, A. Giret Boggino, and V. Botti Navarro, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 352–365.
- [31] iAgua, “Agua 4.0: hacia un nuevo ecosistema,” 2020. <https://www.iagua.es/noticias/grupo-inclam/agua-40-nuevo-ecosistema> (accessed Apr. 18, 2021).
- [32] N. S. Kakwani and P. P. Kalbar, “Review of Circular Economy in urban water sector: Challenges and opportunities in India,” *J. Environ. Manage.*, vol. 271, p. 111010, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111010.
- [33] J. Gao, Y. Yao, V. C. Y. Zhu, L. Sun, and L. Lin, “Service-oriented manufacturing: a new product pattern and manufacturing paradigm,” *J. Intell. Manuf.*, vol. 22, no. 3, pp. 435–446, Jun. 2011, doi: 10.1007/s10845-009-0301-y.
- [34] M. Herrera, S. Meniconi, S. o Alvisi, and J. Izquierdo, “Advanced Hydroinformatic Techniques for the Simulation and Analysis of Water Supply and Distribution Systems,” *Water*, vol. 10, no. 4, p. 440, 2018, doi: 10.3390/w10040440.
- [35] P. Tabuada, “Event-Triggered Real-Time Scheduling of Stabilizing Control Tasks,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 52, no. 9, pp. 1680–1685, Sep. 2007, doi: 10.1109/TAC.2007.904277.
- [36] E. Chacon, J. Cardillo, R. Chacon, and G. Zapata, “Planification en ligne pour les systèmes de production distribués : une approche par les systèmes holoniques,” in *9th International Conference on Modeling, Optimization & SIMulation*, Jun. 2012, [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00728682>.