

# FENIX Soft: Sistema de apoyo a la gestión de operaciones

## FENIX Soft: Operations Management support system

Chacón, Édgar\*<sup>1</sup>; Cardillo, Juan<sup>2</sup>; Chacón, Rafael<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Computación, Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería  
**Universidad de Los Andes**  
Mérida 5101, Venezuela

<sup>2</sup> Departamento de Control, Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería  
**Universidad de Los Andes**  
Mérida 5101, Venezuela

<sup>3</sup> **Rafael Chacón**  
Plainville, MA, USA  
\*echacon@ula.ve

### Resumen

*La Empresa Inteligente, es la evolución del precepto industrial de automatización plena dada en la tercera revolución industrial, que usa-requiere nuevos métodos y metodologías, técnicas y tecnologías para su aplicación, con el fin de lograr uno de sus principales objetivos que es el conocer cómo van los procesos de negocio, los procesos de manufactura y sus interacciones en tiempo real. El establecimiento de aplicaciones de Transformación Digital y su integración con las aplicaciones ya implementadas, en las empresas, tiene dos inconvenientes: 1) aplicaciones que no se adaptan a la empresa sino la empresa a la aplicación y 2) la integración de las aplicaciones resulta en complicadas interfaces humano-máquina, máquina-máquina. En ambos casos, muchas horas-hombre se requieren para la adaptación de la empresa a la aplicación y el desarrollo de las interfaces lo que implica altos costos adicionales al costo de la aplicación. En el presente trabajo se muestra una concepción de un sistema de apoyo a la gestión, en la que se puede establecer la Planificación-Programación-Seguimiento del proceso productivo, usando a los modelos de procesos y productos de la empresa. La implementación se reduce al interpretar dichos modelos, disminuyendo los tiempos de implantación con una aplicación (FENIX Soft) que sigue los procesos de la empresa.*

**Palabras clave:** Gestión de la producción, Planificación-Programación-Seguimiento del proceso de producción, Aplicación para la gestión de operaciones/producción.

### Abstract

*Smart Factory is the evolution of the industrial precept of full automation given in the third industrial revolution, which uses-requires new methods and methodologies, techniques and technologies for its application, in order to achieve one of its main objectives, which is knowing how business processes, manufacturing processes and their interactions are going in real time. The establishment of Digital Transformation applications and their integration with applications already implemented in companies has two drawbacks: 1) applications that are not adapted to the enterprise but rather the enterprise to the application and 2) the integration of applications results in complicated human-machine, machine-machine interfaces. In both cases, many man-hours are required for the adaptation of the enterprise to the application and the development of the interfaces, which implies high additional costs to the cost of the application. In the present work, a conception of a management support system is shown, in which the Planning-Programming-Monitoring of the productive process can be established, using the enterprise's process and product models. Implementation is reduced by interpreting these models, reducing implementation times with an application (FENIX Soft) that follows the enterprise's processes.*

**Key words:** Production Management, Plannig-Scheduling-Monitoring/Traking of the production process, Operation/Production Management Application.

## 1 Introducción

Smart Factory (Empresa Inteligente EI), es un enfoque, relativamente nuevo, asociado a la personalización de productos de producción masiva, consiste en una integridad de tecnologías, conceptos organizacionales y principios de gestión que subyacen a una red de producción rentable, receptiva, resiliente y sostenible (ecológica y financieramente), basada en datos, adaptable dinámica y estructuralmente a los cambios de la oferta y la demanda a través de una rápida reorganización y reasignación de sus componentes y capacidades, para lograr uno de sus principales objetivos que es el conocer cómo van los procesos de negocio, los procesos de manufactura y sus interacciones en tiempo real.

La instauración-aplicación del enfoque Smart Factory tanto en nuevas empresas como en las ya establecidas, requieren, entender el enfoque, donde la tecnología es consecuencia de aplicar los preceptos y conceptos del enfoque que dan el indicativo de que se debe mejorar en los procesos. En I4.0, los cambios están dados “No en lo que se hace sino en cómo se hace”, buscando la personalización de productos en masa por medio de procedimientos ágiles y procesos configurables, y realizando mejoras sucesivas hacia una empresa verde.

Condición previa para tener una EI es tener procesos automatizados, pero ¿Qué es estar automatizados?, ¿Cómo podemos evaluar que la automatización es plena, correcta y coherentemente instaurada?. La automatización, según algunos diccionarios se define como “el uso de máquinas y computadoras que pueden operar sin necesidad de control humano...”, según (ISA,2021) se define “la creación y aplicación de tecnología para monitorear y controlar la producción y entrega de productos y servicios”. En nuestro caso asumimos una definición alterna como es “la programación de procedimientos (habilidades-competencias) en entidades (recursos) que cumplen un fin, para la realización del proceso productivo”. Estas entidades interactúan para obtener un producto según la instanciación de la ruta de producto sobre la jerarquía de activos. Esta asignación se ha realizado siempre, lo que ha cambiado es la forma de cómo hacerla, esto es su evolución con cada etapa de la evolución industrial y está asociada precepto de cada época en donde la tecnología juega un rol primordial.

Es por ello que la viabilidad de la producción es establecida según una meta negociada de acuerdo a la capacidad, habilidad-competencia de las entidades involucradas y a la conectividad “física – lógica” que estas tienen con las otras entidades. Un premisa para correcta la automatización es la sistematización de los procesos, que es particular en cada proceso de producción, y que proporciona toda la información requerida para establecer la planificación. La sistematización puede ser manual, (solo con intervención humana), pero si se realiza una implantación apoyada por herramientas de automatización, coherente y correcta, parcial o total, en las entidades respectivas, se logra una tener una empresa ágil y en línea. Desde nuestra óptica, la viabilidad es una

extensión del concepto de viabilidad de los Sistema Híbridos, que involucra la viabilidad física, logística y económica, y la manera de garantizar una automatización plena y bien establecida es basada establecer a los sistemas de producción como Sistemas Ciber Físicos, obteniéndose Sistemas Ciber-Físicos de Producción, como veremos más adelante.

Para procesos de manufactura se requiere establecer las rutas para la producción (o de lotes) de productos según las configuraciones de las celdas, líneas y unidades de producción, establecida en la jerarquía de activos, según disponibilidad del equipamiento, materia prima e insumos asociada a la planificación de la producción.

Para procesos de producción continua, se requiere de un flujo permanente de producto en periodos (largos) de tiempo. Aquí las configuraciones están asociadas a los puntos de consigna (set-point) en el equipamiento regidos por la secuencia de operaciones para procesar el flujo de producto en cada etapa del proceso según las condiciones del mismo (calidad, cantidad). Que incluye los transientes de inicio y finalización del suministro del flujo de producto así como de sus variaciones en los periodos de tiempo respectivos.

### 1.1 Principios para una Empresa Inteligente

El concepto de Smart Factory engloba un conjunto de elementos que deben estar presentes para que una empresa manufacturera sea considerada como tal. Los principios han sido expuestos en distintos trabajos, algunos engloban varios principios en unos solo, otros van más en detalle. (Hermann y cols., 2016; Cañas y cols., 2021; Dikhanbayeva y cols., 2020; de Paula Ferreira y cols., 2020; Salkin y cols., 2018; Gilchrist, 2016). En la Tabla 1, se muestran los principios de Smart Factory, su descripción y los medios que utiliza.

### 1.2 Estado del arte en la implementación de I 4.0

La visión de los sistemas ciber-físicos y de los sistemas holónicos facilitan el logro de estos principios por el uso de modelos autónomos descentralizados integrados verticalmente, y mediante la cooperación lograr la integración horizontal mediante el flujo de materiales en los sistemas conectados físicamente, de acuerdo a los requerimientos expresados en los modelos de producto y a los procedimientos establecidos en cada holón para el cumplimiento de los servicios de manufactura.

La ejecución de las tareas físicas están condicionadas a la existencia de unidades con el equipamiento adecuado para prestar los servicios de manufactura y los sistemas de toma de decisiones (control interno del proceso de manufactura) con la conectividad física para la transferencia de materiales entre dichas unidades y la existencia de sistemas de gestión que permitan a dichas unidades negociar y coordinar la producción con otras unidades de una manera confiable.

La arquitectura de implementación para sistemas integrados verticalmente, implican el uso de Tecnologías de

**Tabla 1:** Principios de diseño en Industria 4.0

Principio	Descripción
Interoperabilidad	Capacidad de dos o más sistemas, equipos y gente de coexistir, intercambiar información y cooperar en la ejecución de tareas
Integración Horizontal, Vertical y Fin a Fin	Horizontal Corresponde a la integración inter empresas e intra-empresas sobre la cadena de valor para transferir información entre los participantes. Vertical corresponde a los flujos de información desde el piso de planta hasta los procesos del negocio y viceversa. Fin a Fin. La integración permite la interacción entre los distintos procesos que se realizan entre las distintas unidades de negocio, de producción existentes en la empresa, Garantiza la información sobre todo el ciclo de vida del producto, la cadena de valor, las funciones de: i) Planificación ágil por tener pleno conocimiento del proceso y suficiente automatización para establecer en línea agendas (equipamiento), reservas (materias primas e insumos), las configuraciones (ruta o consignas) en el proceso de fabricación de forma flexible, ii) Ejecución a tiempo sin desperdicio: Conocimiento pleno de los esquemas de coordinación-supervisión (rutas, configuraciones) para condición normal, anomalías, fallas, contingencias. Así como conocimiento pleno de esquemas de control y regulación en equipos y sus condiciones de operación, que junto con los modelos de comportamiento definen los supervisores y coordinadores en la operación del proceso, iii) Seguimiento del producto y del proceso, incluye definir, establecer, obtener indicadores en producto, procesos, traza de carbono, consumo energético (de qué tipo).
Capacidades de Tiempo-Real	Los sistemas deben tener los mecanismos de captura y análisis de los datos en tiempo real con el fin de tomar decisiones que permitan el correcto desempeño de los sistemas bajo control.
Virtualización	Capacidad de poder tener digitalizados los procesos y recursos para realizar simulaciones y seguimiento de los mismos de manera digital.
Descentralización - Autonomía	Es la capacidad de una unidad de negocio o de producción para la toma de decisiones y del control internos de la unidad y su interacción con otras unidades. Las decisiones no son realizadas de manera centralizada sino distribuidas entre las distintas unidades. Este principio asegura la eficiencia del proceso productivo, debido a que cada unidad conoce el estado de los recursos según la jerarquía de activos, estableciendo el estado del producto (flujo de producto) y el estado de las ordenes.
Orientada por servicios	Las distintas unidades en la organización prestan servicios de manufactura. Estos servicios van desde el desarrollo de productos hasta la realización de pruebas de conformidad.
Modularidad	Dos conceptos son asociados a la modularidad. Es la capacidad de los procesos a cambiar o adaptarse a distintas situaciones para obtener un objetivo. Implica la reconfiguración de los sistemas, garantiza la resiliencia del sistema. El otro concepto está asociado al producto; éste se describe por módulos, lo que permite la personalización en masa y la utilización eficiente de los recursos para las distintas variantes del producto.
Sostenibilidad-sustentabilidad y responsabilidad social	La empresa debe ser amigable con el ambiente, por lo tanto debe ser eficiente en el consumo de energía. Debe mantener el recurso humano con alto nivel de satisfacción, principio básico de un empresa inteligente.

Operaciones, Internet Industrial de las cosas (IIoT) en el piso de planta en el control y supervisión directa de equipos y procesos físicos, y Tecnologías de Información para el mantenimiento de la información y el establecimiento de mecanismos de cooperación entre las distintas unidades en el piso de planta (Qi y Tao, 2018; Urbina Coronado y cols., 2018).

El paradigma de orientación a servicios en manufactura considera dos aspectos: i la ejecución de tareas de manera autónoma por uno o más recursos inteligentes (Borangiu, 2009; Gamboa Quintanilla y cols., 2013; Giret y cols., 2016) y ii la visión de las Tecnologías de Información para el manejo de los servicios de manufactura como en Y. Wu y cols. (2018).

Con las consideraciones mostradas, en este trabajo presentamos la estructura e implantación de una aplicación que permite establecer la planificación, programación y seguimiento de procesos productivos siguiendo lo establecido en I4.0. El trabajo se organiza en la Unidad 2 La Unidad de Producción Holónica: Estructura de Fenix Soft. En la Unidad 3 Des-

pliegue la Unidad de Producción sobre la Infraestructura de automatización: Implementación de Fenix Soft. En la sección 4 las conclusiones donde se incluye algunas experiencias en donde se ha implantado FenixSoft.

## 2 La Unidad de Producción Holónica. La Unidad de Producción Holónica. Base de la aplicación FenixSoft

El enfoque holónico en la concepción de los sistemas de producción inteligentes es un paradigma que ha venido desarrollándose desde finales de la década de los noventa, y que actualmente se ha visto como un pilar para el desarrollo de I 4.0 (Derigent y cols., 2020; Valckenaers, 2020). Varias arquitecturas holónicas han sido consideradas para la implantación del paradigma holónico, entre ellas PRO-SA (Valckenaers y cols., 1998), Holonic Component Based Architecture (Covanich y McFarlane, 2009, 2011), Adacor (Leitão y Restivo, 2006). Una propuesta, basada en el recurso inteligente, fue presentada en (Chacón y cols., 2021; Chacón y cols., 2021) para el manejo integral del recurso como un elemento autónomo cooperante, denominado la Unidad de

Producción Holónica. Los Sistemas de Producción Ciberfísicos (CPPS) (Monostori, 2014; Lins y Rabelo Oliveira, 2020; Cardin, 2019; X. Wu y cols., 2020) es otro enfoque de automatización que está siendo aplicado a Industria 4.0.

La Unidad de Producción, como arquitectura de control, toma elementos de HCBA y Adacor para la jerarquía interna del componente Recurso y las definiciones de producto, orden similares a las de ARTI (anteriormente PROSA) (Valckenaers, 2020) y su arquitectura es similar a la mostrada por Gamboa Quintanilla y cols. (2016)

La Unidad de Producción es un recurso inteligente que posee 4 capas tal como se muestra en la Figura 1. La capa física formada por los equipos, desarrolla las actividades de almacenamiento, transporte, transformación de la materia. La capa de control asociada a la regulación y supervisión de procesos y equipos en la capa física incluyendo sensores, actuadores, controladores y sistemas de supervisión; esta capa está soportada por las Tecnologías de Operación. La tercera capa corresponde a la imagen ciber de la unidad y de sus procesos; esta capa mantiene los modelos de procesos y recursos de la unidad, así como la imagen de los procesos que se están ejecutando con el fin de supervisar su ejecución. La capa más alta, es la capa que posee la inteligencia para negociar con otras unidades, establecer compromisos, supervisar el avance de la orden de producción, evaluar el rendimiento de los procesos en las diferentes órdenes de producción.

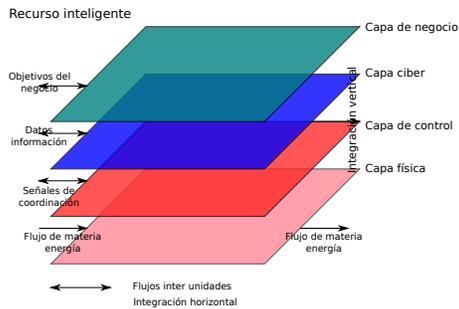


Fig. 1: El Recurso Inteligente (Holón Recurso)

La Unidad de Producción Holónica (UPH) es concebida como un proveedor de Servicios de Manufactura autónomo, por lo cual posee los conocimientos de los productos que puede elaborar con la participación de otros recursos inteligentes, y de los servicios necesarios para la participación en la elaboración de un producto y un conjunto de protocolos para la prestación de los servicios de manufactura. El conocimiento que posee la Unidad de Producción se muestra en la Figura 2, y permite estimar cual será el resultado de un producto, si es ejecutado completamente dentro de la UPH o la ejecución del servicio de manufactura solicitado.

2.1 Arquitectura de control para la UPH

Las arquitecturas de control clásicas han ido evolucionando de una visión totalmente jerárquica a una visión des-

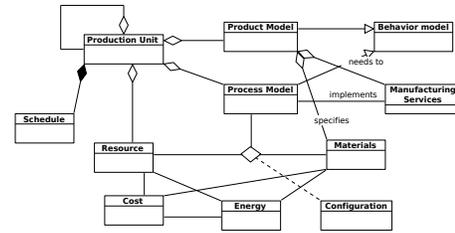


Fig. 2: Ontología de la Unidad de Producción Holónica

centralizada desde hace varias décadas tal como lo muestran publicaciones de los años 90 (Dilts y cols., 1991), y en este siglo (Trentesaux, 2009). La tendencia imperante es ahora la concepción de sistemas descentralizados siendo uno de los principios de I 4.0 (Santos y cols., 2017).

La arquitectura de control utilizada en UPH es una arquitectura descentralizada, que garantiza tanto la autonomía de la unidad, como la cooperación mediante el intercambio de mensajes a nivel de la capa de coordinación en el SCADA. La coordinación con las otras UPH se realiza mediante el intercambio de información con las otras UPH y un comportamiento asociado al intercambio de mensajes que es conocido entre ellas. Ver Figura 3

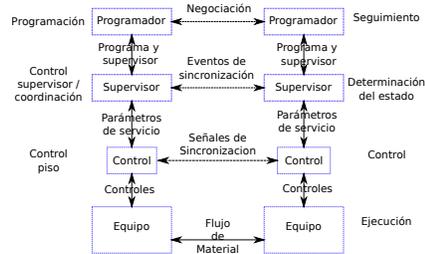


Fig. 3: Integración vertical del control en una arquitectura descentralizada

La integración vertical está asociada al flujo de control desde los niveles de procesos del negocio hacia las tareas ejecutadas en el piso de planta, y el flujo de información desde el piso de planta hacia los niveles de proceso de negocio. La toma de decisiones depende del conocimiento del estado de las capas inferiores y de la evaluación de alternativas que lleven el proceso a un estado deseado. El uso de mecanismos de supervisión para los procesos de piso de planta basados en modelos formales, que sean introducidos desde el diseño de la planta, garantizan una mayor eficiencia en los procesos (Baeten y cols., 2016; Moulton y Rudie, 2022). Los mecanismos de control supervisor forman parte la Unidad de Producción y aseguran el comportamiento deseado de la planta incluyendo los fallos que puedan ocurrir en los recursos. La ejecución de las actividades en el piso de planta son controladas internamente por un sistema de control

supervisor que asegura que su comportamiento corresponde a un comportamiento esperado. El modelo formal, que forma parte de la capa ciber, permite el seguimiento de las operaciones que se ejecutan en el piso.

Cada Unidad de Producción posee un conjunto de modelos formales que describen el comportamiento de cada uno de los servicios prestados por la Unidad de Producción. La capa ciber almacena los distintos modelos de cada servicio y se utilizan para la programación, seguimiento y evaluación de la producción. La abstracción representa una agregación de los pasos que ocurren para la prestación del servicio (Liu y Shen, 2003) y la abstracción debe tener una evolución equivalente desde el punto de vista de un observador externo. La abstracción busca la reducción de la complejidad resultante en los niveles más altos de los procesos de toma de decisión cuando se componen los distintos procesos que se ejecutan en las recursos, y pueden aplicarse a los sistemas híbridos (Tabuada, 2009; Chacón y cols., 1997).

Las redes de Petri han sido ampliamente utilizadas para la descripción y planificación de procesos de manufactura y procesos por lotes (Tittus y Lennartson, 1999; Falkman y cols., 2008; Lennartson y cols., 2015), así como en el desarrollo de esquemas de control en el piso de planta (Taholakian y Hales, 1997; Bender y cols., 2008; Feng y Wonham, 2008). Las redes de Petri serán la herramienta conceptual utilizada para la construcción de los modelos.

### 2.1.1 Construcción de los modelos

Las abstracciones en la capa ciber deben representar el comportamiento controlado de la unidad de producción, y se toma como premisa que el comportamiento del proceso en el caso de sistemas continuos e híbridos puede ser modelado mediante sistemas híbridos. El control supervisor del mismo se realiza usando esquemas descentralizados (Feng y Wonham, 2008; Leduc y cols., 2005).

El procedimiento para garantizar tener supervisores descentralizados libres de bloqueo, basado en Feng y Wonham (2008) presenta un grupo de premisas que son:

- 1) Dividir el esquema de control supervisor en dos niveles. El nivel más alto (maestro) asegura la planificación y coordinación, mientras que el más bajo garantiza la ejecución de los servicios de manufactura. Maestros y esclavos poseen unas *interfaces* bien definidas para garantizar la ejecución de las tareas.
- 2) Asociar a cada servicio de manufactura el sistema de control supervisor necesario para obtener el producto. La integración física entre los distintos procesos está dada por la transferencia de productos desde una unidad que ha ejecutado un servicio de manufactura a la unidad que realiza el próximo servicio necesario según el modelo del producto. Esto incluye procesos secuenciales y paralelismo en algunos servicios.
- 3) Los modelos de supervisión son basados en eventos. Así, el modelo resumen (reducido) de cada unidad debe

basarse en los eventos que pueden capturarse de manera natural desde el sistema físico. Esto es, que el supervisor local pueda colocar los eventos capturados en la *interfaz*.

- 4) El supervisor local debe asegurar el comportamiento esperado de la unidad que presta el servicio.

Los dos niveles de control supervisorio del ítem 1, se sintetizan a partir de dos niveles de modelos de comportamiento asociados a la Unidad, el primero es un modelo resumen de comportamiento de la unidad que permite establecer el estado de esta, cuya estructura es tal que al incorporarla (componerla) con el de las otras unidades conforman el modelo de producto, y genera el modelo de comportamiento del proceso de producción. El segundo, es el modelo de comportamiento detallado de la unidad, particularizado para cada servicio de manufactura ofrecido. Ambos modelos de comportamiento (detallado y reducido) son equivalentes para un observador externo.

### 2.1.2 La generación del modelo global por composición de procesos en el modelo del producto

El procedimiento para la generación de una orden de producción en un ambiente descentralizado, se basa en un proceso de negociación entre distintos componentes que pueden participar en la elaboración de un producto y el modelo del producto. Las distintas unidades tienen el conocimiento de como prestar servicios de manufactura. Estos servicios se presentan de una manera estandarizada.

El algoritmo para la generación de una orden de producción se da a continuación

El comportamiento general de una etapa asociada a un modelo de producto se da en la Figura 5, y el modelo del producto resulta del encadenamiento de las distintas etapas como se muestra en la Figura 6.

En la construcción de los modelos el comportamiento del proceso puede ser representado como “Flujos de Trabajo” (Lin y cols., 2009) simplificando la construcción de los modelos. WoPeD (Freytag y cols., 2017) es una herramienta orientada a la descripción de Procesos de Negocio y que por su facilidad de uso la utilizamos en el modelado de procesos de manufactura.

La composición del comportamiento global se consigue mediante la composición de las abstracciones construidas mediante WoPeD de los comportamiento de los servicios de manufactura. El modelo de comportamiento debe incluir las duraciones estimadas de los pasos, las salidas a los posibles fallos en la prestación del servicio.

### 2.1.3 Seguimiento de la orden de producción.

Cada orden de producción posee una imagen del procedimiento a ser ejecutado en cada uno de los recursos inteligentes y la integración de los distintos procesos que forman la orden de producción. El seguimiento de la orden de producción se realiza mediante la captura de eventos en

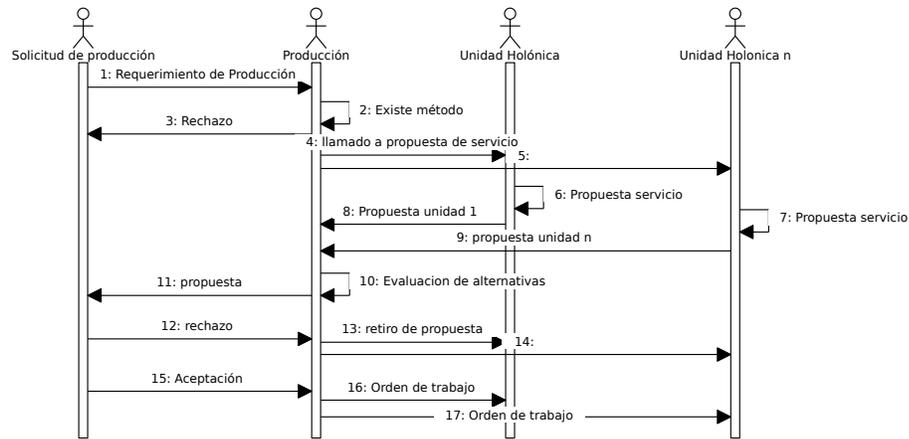


Fig. 4: Negociación de la Orden de producción entre los posibles participantes.

**Data:** Modelo de productos  
**Input:** Requerimiento de producción (Producto, cantidad)  
**Result:** orden de producción y órdenes de trabajo asociadas

verificar si se tiene el modelo de producto ;

```

if modelo disponible then
    Verificar existencia de insumos para las distintas etapas ;
    if insumos then
        Solicitar a unidades lapsos disponibles y costos ;
        componer las distintas alternativas viables logísticamente. (unidades conectadas y disponibles);
        Evaluar las distintas alternativas.;
        enviar al solicitante alternativas posibles (costos, tiempo);
        if solicitante acepta oferta then
            comprometer a unidades seleccionadas (orden de trabajo);
            liberar las unidades no seleccionadas;
        else
            liberar a todas las unidades
        end
    else
        rechazar solicitud
    end
else
    rechazar solicitud
end
    
```

Algoritmo 1: Algoritmo de generación de orden de producción

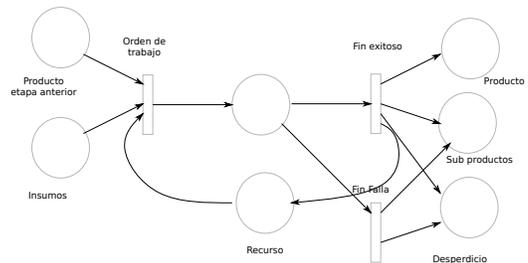


Fig. 5: Comportamiento de una etapa en el modelo de producto

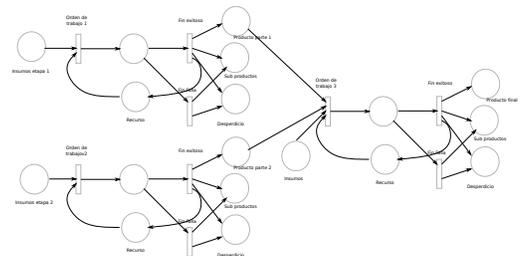


Fig. 6: Composición del modelo del producto a partir de los diagramas de cada servicio.

el piso de planta capas 1 y 2 de los recursos inteligentes que están trabajando en la orden de producción; estos eventos son transmitidos a la capa ciber donde un mecanismo actualiza la imagen. Para cada orden se tiene la traza y la trayectoria global y la particular en cada recurso como se muestra en la Figura 7.

El algoritmo para el seguimiento de la en la capa ciber se da en el algoritmo 2.

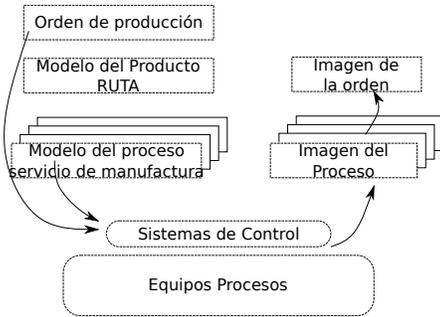


Fig. 7: Flujos de información para el seguimiento de la orden de producción

**Data:** Modelo de productos, modelo de servicios  
**Input:** eventos de piso de planta  
**Result:** Actualización estado de órdenes y recursos

```

repeat
  leer historial de eventos no procesados ;
  Determinar tipo de evento, recurso generador,
  orden de trabajo;
  repeat
    case evento de recurso do
      | actualizar estado del recurso
    end
    case Orden de trabajo do
      | Actualizar estado de la orden de trabajo;
      if evento genera disparador de orden de
      producción then
        | Actualizar orden de producción
      end
    end
  end
  Marcar evento como procesado
until para cada evento;
until para siempre;
    
```

Algoritmo 2: Seguimiento de la orden de producción

### 3 Despliegue de la Unidad de Producción sobre la Infraestructura de automatización: Implantación de Fenix-Soft

La arquitectura tecnológica para la automatización industrial incluye dos tipos de tecnologías: i) las tecnologías de información que soportan las aplicaciones correspondientes a los niveles 3 y 4 de PERA (Williams, 1994) y las tecnologías de operaciones para las capas 0, 1 y 2. Esta arquitectura es la base de los nuevos modelos de referencia como Ramí 4.0 e Internet Industrial (Li y cols., 2020), usando los estándares industriales (Felser y cols., 2019) La arquitectura propuesta para la implantación del sistema de gestión es la arquitectura estándar y el despliegue de las aplicaciones y sus funciones se muestran en la Figura 8. La capa ciber del recurso inteligente se despliega sobre la parte de la arquitectura que corresponde a las tecnologías de información, donde se tienen los modelos

de comportamiento para cada servicio de manufactura prestado por el recurso, y se realiza el seguimiento del proceso que es actualizado mediante el seguimiento de los eventos que ocurren en el piso de planta.

Los eventos capturados en el piso son almacenados en la base de datos de tiempo real del SCADA, desde donde son leídos por el sistema de seguimiento en la capa ciber.

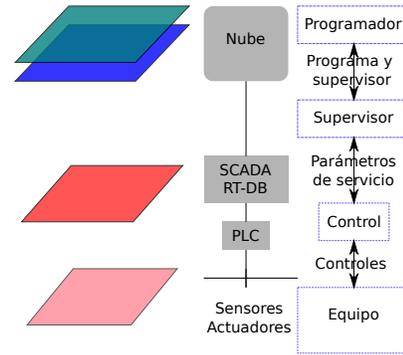


Fig. 8: Despliegue de la Arquitectura de Control sobre la arquitectura tecnológica

#### 3.1 Esquema de gestión de los recursos

La capa ciber posee toda la información de la parte física: ubicación, unidades vecinas con las cuales intercambia productos, recursos internos, y los modelos de comportamiento en la prestación de los servicios de manufactura. El conocimiento inicial es suministrado por la Unidad de Investigación y Desarrollo de la empresa, y este es actualizado mediante el análisis de los resultados de las distintas órdenes de producción para cada producto. La capa de procesos de negocio utiliza el conocimiento de la capa ciber para generar las distintas órdenes de producción. Las aplicaciones necesarias para estas capas se muestran en la Figura 9.

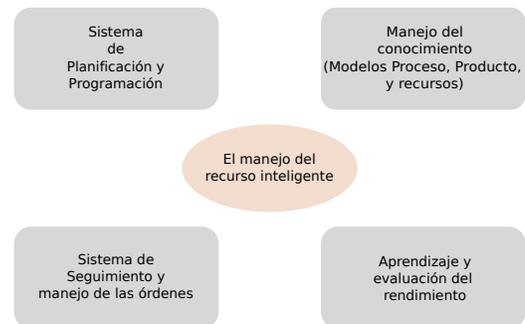


Fig. 9: Aplicaciones en las capas ciber y del negocio del recurso inteligente

### 3.2 Integración de los sistemas con el piso de planta.

La capa ciber se despliega sobre los servidores (Tecnología de Información) disponibles en la empresa, y el sistema de seguimiento y manejo de las órdenes se comunica con el servidor SCADA (Tecnología de Operaciones) utilizando OPC UA. El sistema de seguimiento e integración con el piso de planta transfiere envía al SCADA las órdenes programadas, crea una imagen del proceso a ser ejecutado en cada unidad y comienza el seguimiento. En el SCADA las órdenes se ejecutan de acuerdo a la disponibilidad real de operarios, equipos, llegada del material.

La imagen del proceso se crea con el estado inicial, y los eventos que son posibles de ocurrir en el sistema físico. Los eventos tienen un tiempo lapso de tiempo para que ocurran. La aparición de un evento implica la actualización del estado de la imagen al nuevo estado y la generación de los nuevos eventos posibles. Si un evento no ocurre en el tiempo máximo esperado se genera un alerta, al igual que la ocurrencia de un evento no esperado.

En la capa ciber queda registrada la historia del sistema con los tiempos de ocurrencia del evento, el tiempo transcurrido en cada estado, el consumo de insumos y energía para cada estado.

### 3.3 Evaluación del rendimiento y mecanismos de aprendizaje

El ciclo final en una orden de producción es su evaluación. Cada orden de producción es analizada para determinar su rendimiento, a la vez que se ajustan los parámetros de los modelos mediante el procesamiento estadístico de las distintas órdenes. Este procesamiento genera indicadores para cada paso de la ejecución de la orden de manera a poder mejorar la planificación de las siguientes órdenes, determinar las necesidades de mantenimiento, eliminar rutas para ciertos productos.

## 4 Conclusiones

Un sistema de apoyo a la gestión de operaciones debe, a partir de la planificación de la producción, contener los escenarios del manejo operacional del proceso (en toda circunstancia evaluable-conocida) para realizar el seguimiento del proceso y su evaluación-rendimiento establecida principalmente por indicadores y de indicar correcciones si fuera el caso. Es por ello que en este trabajo se presenta la estructura y la forma de implantación de Fenix Soft como aplicación para la gestión de operaciones, ya que muestra la interacción y la integración con las estructuras del negocio y proceso (incluye almacén, unidad de calidad) con el fin de generar la planificación, programación en el proceso y realizar su seguimiento conforme con los requerimientos de I4.0 - Smart Factory.

Hasta los momentos Fenix Soft ha sido utilizado para el seguimiento de operaciones en procesos batch en una

fábrica de pinturas, y en varios procesos de manufactura. Se ampliado el sistema de seguimiento inicial, al seguimiento de los consumos energéticos basados en ISO 50001.

La implementación de Fenix Soft, como aplicación de seguimiento, en primera instancia, no está limitada a una particular estructura IT/OT, ya que la interacción con está es por medio de interfaces (RPA, etc.) con los sistemas, mecanismos propios en cada empresa, que pueden incluir sensorica en el proceso y algunas interfaces M2M, H2M para la captura de variables y eventos. Lo que se instaura dentro de Fenix Soft es el modelo de producto y producción del proceso con las particularidades de cada empresa, por lo que no existe una programación “per se”, sino una implantación de modelos de conocimiento propio. Esto hace que la aplicación que se amolde-adapte a la empresa, estableciendo tiempos muy cortos para su puesta en marcha.

## Referencias

- Baeten, J. C. M., van de Mortel-Fronczak, J. M., y Rooda, J. E. (2016). Integration of supervisory control synthesis in model-based systems engineering. En G. M. Dimirovski (Ed.), *Complex systems: Relationships between control, communications and computing* (pp. 39–58). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-28860-4\_2
- Bender, D. F., Combemale, B., Crégut, X., Farines, J. M., Berthomieu, B., y Vernadat, F. (2008). Ladder metamodeling and plc program validation through time petri nets. En I. Schieferdecker y A. Hartman (Eds.), *Model driven architecture – foundations and applications* (pp. 121–136). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Borangiu, T. (2009). A service-orientated architecture for holonic manufacturing control. En *Towards intelligent engineering and information technology* (pp. 489–503). Springer.
- Cañas, H., Mula, J., Díaz-Madroñero, M., y Campuzano-Bolarín, F. (2021). Implementing industry 4.0 principles. *Computers & Industrial Engineering*, 158, 107379. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107379>
- Cardin, O. (2019). Classification of cyber-physical production systems applications: Proposition of an analysis framework. *Computers in Industry*. doi: 10.1016/j.compind.2018.10.002
- Chacón, É., Cardillo, J., y Zapata-Madrigal, G. (2021). The holonic production unit: An integrated automation architecture. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 42(3).
- Chacón, E., Cruz Salazar, L. A., Cardillo, J., y Paredes Astudillo, Y. A. (2021). A control architecture for continuous production processes based on industry 4.0:

- Water supply systems application. *Journal of Intelligent Manufacturing*. doi: 10.1007/s10845-021-01790-3
- Chacón, E., De Sarrazin, G., y Szigeti, F. (1997). Pseudo dynamic hybrid systems. *Nonlinear Analysis*, 30(4), 2533–2537. doi: 10.1016/S0362-546X(96)00143-5
- Covanich, W., y McFarlane, D. (2009). Assessing ease of reconfiguration of conventional and holonic manufacturing systems: Approach and case study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22, 1015 – 1024.
- Covanich, W., y McFarlane, D. (2011). Comparing the control structures of isa s88- and holonic component-based architecture. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS PART C: APPLICATIONS AND REVIEWS*, 41(1), 4 – 13.
- de Paula Ferreira, W., Armellini, F., y De Santa-Eulalia, L. A. (2020). Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106868. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106868>
- Derigent, W., Cardin, O., y Trentesaux, D. (2020). Industry 4.0: contributions of holonic manufacturing control architectures and future challenges. *Journal of Intelligent Manufacturing*. doi: 10.1007/s10845-020-01532-x
- Dikhanbayeva, D., Shaikholla, S., Suleiman, Z., y Turkyilmaz, A. (2020). Assessment of industry 4.0 maturity models by design principles. *Sustainability*, 12(23). doi: 10.3390/su12239927
- Dilts, D., Boyd, N., y Whorms, H. (1991). The evolution of control architectures for automated manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 10(1), 79 - 93. doi: [https://doi.org/10.1016/0278-6125\(91\)90049-8](https://doi.org/10.1016/0278-6125(91)90049-8)
- Falkman, P., Nielsen, J., Lennartson, B., y von Euler-Chelpin, A. (2008, Jan). Generation of step ap214 models from discrete event systems for process planning and control. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 5(1), 113-126. doi: 10.1109/TASE.2007.909632
- Felser, M., Rentschler, M., y Kleineberg, O. (2019, 6). Coexistence standardization of operation technology and information technology. *Proceedings of the IEEE*, 107(6), 962-976. doi: 10.1109/JPROC.2019.2901314
- Feng, L., y Wonham, W. M. (2008). Supervisory control architecture for discrete-event systems. *IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL*, 53(6), 1448–1461. doi: 10.1109/TAC.2008.927679
- Freytag, T., Allgaier, P., Burattin, A., y Danek-Bulius, A. (2017). Woped - a “proof-of-concept” platform for experimental bpm research projects. En *Online proceedings of the bpm demo track 2017*. (15th International Conference on Business Process Management, BPM 2017 ; Conference date: 10-09-2017 Through 15-09-2017)
- Gamboa Quintanilla, F., Cardin, O., y Castagna, P. (2013). Evolution of a flexible manufacturing system: From communicating to autonomous product. En *Service orientation in holonic and multi agent manufacturing and robotics* (pp. 167–180). Springer.
- Gamboa Quintanilla, F., Cardin, O., L'Anton, A., y Castagna, P. (2016, July). Implementation framework for cloud-based holonic control of cyber-physical production systems. En *2016 IEEE 14th international conference on industrial informatics (indin)* (p. 316-321). doi: 10.1109/INDIN.2016.7819179
- Gilchrist, A. (2016). Introducing industry 4.0. En *Industry 4.0* (pp. 195–215). Springer. doi: 10.1007/978-1-4842-2047-4\_13
- Giret, A., Garcia, E., y Botti, V. (2016). An engineering framework for service-oriented intelligent manufacturing systems. *Computers in Industry*, 81, 116–127. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2016.02.002>
- Hermann, M., Pentek, T., y Otto, B. (2016, 1). Design principles for industrie 4.0 scenarios. En *2016 49th hawaii international conference on system sciences (hicc)* (p. 3928-3937). doi: 10.1109/HICSS.2016.488
- Leduc, R., Lawford, M., y Wonham, W. (2005, Sep.). Hierarchical interface-based supervisory control-part ii: parallel case. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50(9), 1336-1348. doi: 10.1109/TAC.2005.854612
- Leitão, P., y Restivo, F. (2006). Adacor: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. *Computers in Industry*, 57, 121–130. doi: 10.1016/j.compind.2005.05.005
- Lennartson, B., Bengtsson, K., Wigström, O., y Riazi, S. (2015). Modeling and optimization of hybrid systems for the tweeting factory. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(1), 191–205. doi: 10.1109/TASE.2015.2480010
- Li, J., Qiu, J.-J., Zhou, Y., Wen, S., Dou, K.-Q., y Li, Q. (2020). Study on the reference architecture and assessment framework of industrial internet platform. *IEEE Access*, 8, 164950-164971. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3021719
- Lin, H., Fan, Y., y Newman, S. T. (2009). Manufacturing process analysis with support of workflow modelling and simulation. *International Journal of Production Research*, 47(7), 1773-1790. doi: 10.1080/00207540701644151
- Lins, T., y Rabelo Oliveira, R. A. (2020). Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106193. doi: 10.1016/j.cie.2019.106193
- Liu, D.-R., y Shen, M. (2003). Workflow modeling for virtual processes: an order-preserving process-view approach. *Information Systems*, 28(6), 505-532. doi: [https://doi.org/10.1016/S0306-4379\(02\)00028-5](https://doi.org/10.1016/S0306-4379(02)00028-5)

- Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and r&d challenges. *Procedia CIRP*, 17, 9–13.
- Moulton, R. H., y Rudie, K. (2022). Online control of discrete-event systems: A survey. *Annual Reviews in Control*. doi: 10.1016/j.arcontrol.2022.08.002
- Qi, Q., y Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, 6, 3585-3593. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2793265
- Salkin, C., Oner, M., Ustundag, A., y Cevikcan, E. (2018). A conceptual framework for industry 4.0. En *Industry 4.0: Managing the digital transformation* (pp. 3–23). Springer.
- Santos, C., Mehraei, A., Barros, A., Araújo, M., y Ares, E. (2017). Towards industry 4.0: an overview of european strategic roadmaps. *Procedia Manufacturing*, 13, 972–979. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.093>
- Tabuada, P. (2009). *Verification and control of hybrid systems a symbolic approach*. Springer.
- Taholakanian, A., y Hales, W. (1997). Pn plc: A methodology for designing, simulating and coding plc based control systems using petri nets. *International Journal of Production Research*, 35(6), 1743-1762. doi: 10.1080/002075497195245
- Tittus, M., y Lennartson, B. (1999). Hierarchical supervisory control for batch processes. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 7(5), 542–554. doi: 10.1109/87.784418
- Trentesaux, D. (2009). Distributed control of production systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7), 971–978. doi: 10.1016/j.engappai.2009.05.001
- Urbina Coronado, P. D., Lynn, R., Louhichi, W., Parto, M., Wescoat, E., y Kurfess, T. (2018). Part data integration in the shop floor digital twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 25-33. (Special Issue on Smart Manufacturing) doi: 10.1016/j.jmsy.2018.02.002
- Valckenaers, P. (2020). Perspective on holonic manufacturing systems: Prosa becomes arti. *Computers in Industry*, 120, 103226. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103226>
- Valckenaers, P., Van Brussel, H., Wyns, J., Bongaerts, L., y Peeters, P. (1998). Designing holonic manufacturing systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 14(5), 455-464. doi: [https://doi.org/10.1016/S0736-5845\(98\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0736-5845(98)00020-9)
- Williams, T. J. (1994). The purdue enterprise reference architecture. *Computers in Industry*, 24(2), 141-158. doi: [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(94\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0166-3615(94)90017-5)
- Wu, X., Goepp, V., y Siadat, A. (2020). Concept and engineering development of cyber physical production systems: a systematic literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-020-06110-2
- Wu, Y., He, F., Zhang, D., y Li, X. (2018, March). Service-oriented feature-based data exchange for cloud-based design and manufacturing. *IEEE Transactions on Services Computing*, 11(2), 341-353. doi: 10.1109/TSC.2015.2501981

**Recibido:** 15 de julio de 2022

**Aceptado:** 28 de octubre de 2022

**Chacón, Edgar:** Ingeniero de Sistemas ULA 1976, D.E.A esp. automatique Université Paul Sabatier, Tolosa, Francia 1979, Docteur Ingénieur esp. automatique Université Paul Sabatier – Laboratoire d’Automatique et Analyse des Systèmes 1981

 <https://orcid.org/0000-0001-5612-0368>

**Cardillo, Juan:** Profesor Titular del Dpto de Sistemas de Control. Doctor en Automática (Université Paul Sabatier Toulouse-France), Doctor en Ciencias Aplicadas (Universidad de Los Andes). Correo electrónico: [ijuan@ula.ve](mailto:ijuan@ula.ve).

 <https://orcid.org/0000-0001-8358-677X>

**Chacón, Rafael:** Electrical engineer Universidad de Los Andes, Venezuela, D.E.A. Productique. UPS, Toulouse France; MBA Hult University. correo electrónico: [rafa@rafaelchaconcolmenares.com](mailto:rafa@rafaelchaconcolmenares.com)

 <https://orcid.org/0000-0002-8568-1137>