

**DEFINICIÓN DE UN MÉTODO PARA LA PROGRAMACIÓN DE LA  
PRODUCCIÓN DESDE EL PARADIGMA DE LOS SISTEMAS HOLÓNICOS  
(HMS)**



**Diego Armando Burbano Quigua**

**John Darwin López Burgos**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL  
INGENIERIA EN AUTOMÁTICA INDUSTRIAL  
POPAYÁN – CAUCA**

**2014**

**DEFINICIÓN DE UN MÉTODO PARA LA PROGRAMACIÓN DE LA  
PRODUCCIÓN DESDE EL PARADIGMA DE LOS SISTEMAS HOLÓNICOS  
(HMS)**



**Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de Ingenieros  
en Automática Industrial**

**Diego Armando Burbano Quigua**

**John Darwin López Burgos**

**Director: PhD(C). Óscar Amaury Rojas A.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL  
INGENIERIA EN AUTOMÁTICA INDUSTRIAL  
POPAYÁN - CAUCA**

**2014**

## AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios, a mis padres, a mi familia, a mis amigos, a mi director de tesis, a mis tutores en general y a todas aquellas personas que posibilitaron este proyecto.

**Diego A. Burbano**

A Dios por ayudarme en cada momento de la vida y darme la fuerza para seguir adelante.

A mis padres, por su amor, apoyo incondicional, por sus valores y enseñanzas que han hecho de mí una mejor persona.

A mi hermana por su compañía, al igual que todas las personas que hicieron posible conseguir este logro.

**John D. López**

# TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	6
LISTA DE TABLAS .....	7
INTRODUCCION.....	8
<b>Capitulo I: Conceptualización de La Función de Programación de La Producción ...</b>	<b>11</b>
1.1 Definición de la programación de la producción.....	13
1.2 Retos de la programación de la producción.....	15
1.3 Técnicas de asignación de recursos .....	16
1.4 La programación de la producción desde estándares en automatización .....	18
1.4.1 Estándar ANSI/ISA-95 .....	18
1.4.2 Funcionalidades MES definidas por MESA.....	25
1.4.3 Correlación entre conceptos ISA-95 y MESA .....	27
1.5 Análisis funcional del método para la programación de la producción .....	27
<b>Capitulo II: Paradigma de los Sistemas Holónicos de Manufactura (HMS) .....</b>	<b>33</b>
2.1 Paradigmas en Automatización .....	33
2.1.1 Paradigma jerárquico.....	34
2.1.2 Paradigma heterárquico .....	34
2.1.3 Paradigma holárquico .....	35
2.1.4 Selección del paradigma de automatización.....	36
2.2 Sistemas holónicos de manufactura (HMS) .....	37
2.3 Arquitecturas de referencia para los sistemas holónicos de manufactura (HMS).....	39
2.3.1 PROSA (Product-Resource-Order-Staff Architecture) .....	39
2.3.2 ADACOR (Adaptive Holonic Control Architecture for Distributed Manufacturing Systems).....	40
2.3.3 UPH (Unidad de Producción Holónica) .....	40
2.4 Selección de la arquitectura holónica .....	42
<b>Capitulo III: Método para la Programación de la Producción desde los Sistemas Holónicos de Manufactura (HMS).....</b>	<b>43</b>
3.1 Tareas de la programación de la producción desde la perspectiva holónica .....	43
3.2 Flujos de información para la programación de la producción desde la perspectiva holónica .....	45

3.3 Desarrollo de la función de programación de la producción desde la perspectiva holónica .....	47
3.3.1 Sub-función de programación de la producción.....	53
3.3.2 Proceso de Asignación (Acuerdo).....	56
3.3.3 Configuración de la producción .....	63
3.3.4 Monitoreo y reconfiguración del programa detallado de producción .....	67
<b>Capítulo IV: Modelado Dinámico del Método para la Programación de la Producción.....</b>	<b>70</b>
4.1 Modelado WF-Net.....	70
4.1.1 WF-Net de la Sub-función de programación de la producción.....	71
4.1.2 WF-Net del proceso de asignación.....	73
4.1.3 WF-Net de la configuración de la producción.....	76
4.1.4 WF-Net del monitoreo y reconfiguración del programa detallado de producción .....	78
4.2 Validación de modelos WF-Net .....	81
<b>Capítulo V: Procedimiento para la Aplicación del Método para la Programación de la Producción.....</b>	<b>83</b>
5.1 Recolección de información .....	84
5.2 Familiarización con el estándar ISA.....	84
5.3 Verificación de tareas, interfaces y flujos de información de la función de programación de la producción .....	85
5.4 Difusión de la visión holónica.....	85
5.5 Reconocimiento del flujo de trabajo desarrollado por el método.....	86
5.6 Aplicación de los modelos definidos en el método para la programación de la producción .....	86
<b>Capítulo VII: Ejemplificación del Método para la programación de la producción ...</b>	<b>87</b>
CONCLUSIONES.....	95
REFERENCIAS .....	97

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Niveles de planificación jerárquica.....	14
Figura 1.2: Modelo jerárquico funcional.....	20
Figura 1.3: Modelo de flujo de datos funcional.....	21
Figura 1.4: Modelo de actividades de administración de operaciones de producción. ....	22
Figura 1.5: Interfaz de la actividad programación detallada de la producción.....	23
Figura 1.6: Interfaz de la actividad despacho de la producción. ....	25
Figura 1.7: Interfaz del método de programación de la producción.....	28
Figura 2.1: Noción Holón-Holarquía.....	38
Figura 2.2: Relaciones entre componentes básicos de la UPH. ....	41
Figura 3.1: Flujo de trabajo básico en la programación de la producción desde la perspectiva holónica. ....	48
Figura 3.2: Diagrama IDEF0 (A-0) para la función de programación de la producción desde el enfoque holónico. ....	48
Figura 3.3: Diagrama IDEF0 (A0) para la función de programación de la producción desde el enfoque holónico. ....	49
Figura 3.4: Diagrama de flujo del proceso productivo ejemplo.....	51
Figura 3.5: Regla de producción producto tipo C. ....	51
Figura 3.6: Regla de producción producto tipo A.....	52
Figura 3.7: Regla de producción producto tipo B. ....	52
Figura 3.8: Diagrama de secuencia sub-función programación de la producción.....	54
Figura 3.9: Explicación esquema de programa de producción.....	55
Figura 3.10: Esquema de programa de producción de la UPH. ....	56
Figura 3.11: Diagrama de secuencia Protocolo ContractNet. ....	58
Figura 3.12: Vector de estado de HR1, HR4 y HR6. ....	59
Figura 3.13: Diagrama de flujo de un algoritmo básico de asignación de recursos. ....	60
Figura 3.14: Explicación esquema de programa detallado de producción. ....	61
Figura 3.15: Esquema de programa detallado de producción de la UPH.....	62
Figura 3.16: Diagrama de clases de la UPH.....	63
Figura 3.17: Esquema de cronograma de producción del HR1, HR4 y HR6.....	64
Figura 3.18: Diagrama de secuencia configuración de la producción.....	65
Figura 3.19: Configuración de la producción en la UPH. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	66
Figura 3.20: Monitoreo y reconfiguración de la producción en la UPH. ....	69
Figura 4.1: WF-Net Programación de la Producción desde el enfoque holónico. ....	71
Figura 4.2: WF-Net de la Sub-función programación de la producción (A2).....	72
Figura 4.3: WF-Net del proceso de asignación (A3).....	75
Figura 4.4: WF-Net de la configuración de la producción (A4). ....	77
Figura 4.5: WF-Net del monitoreo y reconfiguración del programa detallado de producción (A5).....	80
Figura 4.6: Simulación de la WF-Net configuración de la producción (A4). ....	82
Figura 6.1: Programa de producción del caso de estudio. <b>¡Error! Marcador no definido.</b>	90

Figura 6.2: Vector de estado de los HR Tipo II del caso de estudio. ....	91
Figura 6.3: Programa detallado de producción del caso de estudio. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b> 92
Figura 6.4: Configuración de la UPH para el caso de estudio.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b> 94

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1: Flujos de información del método de programación de la producción. ....	32
Tabla 3.1: Flujos de información de la programación de la producción desde la perspectiva holónica. ....	46
Tabla 3.2: Relación operaciones-recursos para el proceso productivo ejemplo. ....	50
Tabla 3.3: Esquema Orden de Producción. ....	53
Tabla 4.1: Nomenclatura empleada en la WF-Net de la sub-función programación de la producción (A2).....	73
Tabla 4.2: Nomenclatura empleada en la WF-Net del proceso de asignación (A3). ....	74
Tabla 4.3: Nomenclatura empleada en la WF-Net de la configuración de la producción (A4).....	76
Tabla 4.4: Nomenclatura empleada en la WF-Net del monitoreo y reconfiguración del programa detallado de producción (A5). ....	79
Tabla 4.5: Propiedades de los modelos en WF-Net.....	81
Tabla 6.1: Ordenes de producción del caso de estudio.....	88

## INTRODUCCION

La sociedad está experimentando un cambio progresivo en su estilo de vida, especialmente en este comienzo de siglo. En años recientes, muchas tendencias han sido establecidas en la relación sociedad - manufactura, concretamente: globalización del mercado, creciente personalización del producto o servicio, aumento en la complejidad tecnológica, aumento del número de competidores, disminución del ciclo de vida del producto, y aumento en requerimientos de calidad, entre otras [1]. La globalización del mercado representa una ampliación en la visión de negocio de toda industria, el aumento del entorno empresarial constituye un reto en cuestión de competitividad pero a la vez una oportunidad de ingresar a nuevos mercados. Los mercados actuales definen los requerimientos de la industria, estos requerimientos reflejan un alto sentido de personalización, en la última década, el rápido cambio de los productos se está convirtiendo en un estilo de vida. Los clientes esperan una mejor calidad, mayor variedad y mejor rendimiento de los productos, todo esto como un valor agregado gratuito [2]. El ciclo de vida del producto debe reducirse, con el objetivo de satisfacer estas necesidades nacientes, además de fomentar la innovación y asegurar la calidad en cada uno de sus procesos de producción. La fabricación está experimentando un “cambio de paradigma”, de producción en masa a producción semi-personalizada o personalización en masa, para satisfacer la creciente diversidad en la demanda [2,3]. Para poder adaptarse a las tendencias del mercado global y de producción, la industria manufacturera necesita renovar su visión, configurar su estructura organizacional de tal manera, que se alcance un sistema de producción con alto grado de flexibilidad operacional. En la nueva generación de sistemas de manufactura, adaptables al entorno fluctuante y de incertidumbre del mercado global, se identifican como atributos principales las siguientes características:

- Alta flexibilidad y adaptabilidad: La industria manufacturera tiene que ser capaz de adaptarse rápidamente a las tendencias del mercado. Los sistemas de producción flexibles pueden mitigar el efecto de la incertidumbre en la demanda [4].
- Agilidad: Se debe prestar atención en reducir el tiempo del ciclo de vida del producto, para ser capaces de responder a las necesidades de los clientes de manera ágil [5].
- Integración empresarial: En el entorno económico actual, la integración empresarial en las industrias de manufactura es un aspecto fundamental para romper las barreras comerciales y cumplir las exigencias de los mercados globalizados [6].
- Reconfiguración: La característica más sobresaliente de los sistemas de manufactura reconfigurables es la capacidad de cambiar rápidamente su estructura, para permitir ajustes dinámicos en capacidad de producción y funcionalidad [7].
- Escalabilidad: La variación de la demanda hace que las compañías deban fabricar diferentes cantidades de productos en cada momento, lo que obliga a modificar la capacidad del sistema de fabricación. Esta flexibilidad en la capacidad, exige facilitar la posibilidad de añadir o sustraer recursos de producción [8].

- Comportamiento reactivo y proactivo: El sistema de manufactura debe estar en la capacidad de responder ante las perturbaciones que afecten los objetivos de productividad, así como también estar en la capacidad de prever y evaluar posibles fallas que alteren el normal comportamiento del proceso productivo.

En respuesta a estas exigencias, han surgido nuevos paradigmas de producción que se desarrollan dentro del enfoque de la nueva generación de manufactura, como lo son el paradigma heterárquico y holárquico. No obstante muchos de los esquemas de producción actuales aún se fundamentan en el paradigma jerárquico, el cual presenta una estructura de múltiples niveles, coordinados por una entidad de orden superior. Las principales ventajas de esta arquitectura son la robustez, predictibilidad y mayor eficiencia que en una arquitectura centralizada. Sin embargo la aparición de perturbaciones en el sistema reduce significativamente su rendimiento [8]. Al contrario de los paradigmas tradicionales, los sistemas heterárquicos prohíben cualquier tipo de jerarquía y otorgan total autonomía a unidades básicas llamadas agentes (*MAS*<sup>1</sup>), aunque mejora notablemente la respuesta ante perturbaciones debido a que cada entidad tiene la capacidad de tomar decisiones sin consultar con entidades de orden superior, se pierde de vista el cumplimiento del objetivo global y los criterios de optimización de todo el conjunto [9]. En el contexto actual, los sistemas tradicionales no cuentan con una estructura que les permita adaptarse a las tendencias del sector manufacturero debido a su naturaleza rígida. El paradigma heterárquico posee atributos que le permiten desempeñarse en un entorno de mercado inestable, pero debido a la falta de un ente coordinador, la eficiencia de los objetivos globales de producción se ve afectada considerablemente. Por eso, se hace necesario el desarrollo de una visión que combine los fundamentos tradicionales del paradigma jerárquico con el enfoque innovador del paradigma heterárquico.

Es así como surge la noción de sistemas holónicos de manufactura (*HMS*<sup>2</sup>), los cuales guardan un equilibrio entre distribución del conocimiento, las decisiones, la centralización del control y la optimización, adoptando características mixtas de los esquemas jerárquico y heterárquico, como se menciona en [9]. Los HMS están compuestos por entidades llamadas holones, un *holón* según el *HMS Consortium*<sup>3</sup> se define como: *un bloque de construcción autónomo y cooperativo de un sistema de manufactura para transformar, transportar, almacenar y/o validar información y objetos físicos. El holón consiste en una parte de procesamiento de información y una parte de procesamiento físico. Un holón puede ser parte de otro holón* [10]. Los holones se organizan en jerarquías temporales reconfigurables llamadas holarquías, mediante las cuales se provee flexibilidad y adaptabilidad, reaccionando ágilmente a perturbaciones, preservando la estabilidad y optimización global del sistema de manufactura, como se menciona en [9]. La naturaleza dinámica de los HMS constituye a este paradigma como una opción emergente para satisfacer las necesidades actuales del sector manufacturero.

---

<sup>1</sup> *MAS*: Del inglés Multi-agent system.

<sup>2</sup> *HMS*: Del inglés Holonic Manufacturing systems.

<sup>3</sup> *HMS Consortium*: La tarea del consorcio HMS es traducir los conceptos que desarrolló Koestler para las organizaciones sociales y los organismos que viven en un conjunto, a un grupo de conceptos adecuados para la industria manufacturera.

Por otra parte, una de las funciones principales de un sistema de manufactura, es la programación de la producción, la cual representa un elemento clave en la eficiencia productiva global. La programación de la producción se define como una función inmersa en el nivel de administración de operaciones de manufactura (según los modelos conceptuales definidos en la norma ISA 95.00.03 [11]), junto con los ámbitos de calidad, inventario y mantenimiento. Se pretende que las actividades de producción se ejecuten de manera conjunta a las dinámicas de los demás ámbitos funcionales, buscando integración horizontal y vertical dentro de la organización. Según [10], la programación de la producción se define como el proceso de optimización de las decisiones de asignación de recursos de antemano. La asignación de recursos es decidir, cuándo y en que recurso se ejecutan todas las tareas previamente programadas. Con base en la definición de producto (representada en una *receta*<sup>4</sup>, *SOP*<sup>5</sup>, *regla de producción*<sup>6</sup>, etc.), la disponibilidad y capacidad actual de los recursos, y otros factores de productividad, se realiza la asignación óptima y detallada en el tiempo de secuencia de operaciones a recursos de producción. Actualmente la programación de la producción representa un desafío estrechamente ligado a las tendencias del sector manufacturero, la asignación de recursos debe desarrollarse de forma flexible, de tal manera que se adecue a las necesidades de producción dinámicas consecuentes con la variabilidad del mercado global.

Teniendo en cuenta el planteamiento anterior, se evidencia la necesidad de desarrollar una nueva visión en los sistemas de manufactura, puntualmente en la función de programación de la producción. En el presente trabajo se desarrolla un método para la programación de la producción desde el paradigma de los sistemas holónicos, enfocándose en el cumplimiento de los requerimientos de las tendencias identificadas como claves en el sector manufacturero. El presente trabajo se estructura en 6 capítulos; en el primer capítulo se desarrolla la conceptualización de la función de programación de la producción en base a los fundamentos encontrados en la literatura en general y los conceptos definidos en estándares internacionales de automatización. En el segundo capítulo se presenta una descripción de los paradigmas en automatización, enfatizando en los sistemas holónicos de manufactura. En el tercer capítulo se efectúa el desarrollo formal del método para la programación de la producción desde el enfoque holónico, enfatizando en el proceso de modelado de las actividades, tareas y flujos de información identificadas para el método. En el cuarto capítulo se presenta el modelado dinámico del flujo de trabajo definido para el método. En el quinto capítulo se propone un procedimiento básico para la aplicación del método en un sistema de manufactura. En el sexto capítulo, se desarrolla el proceso de aplicación del método en un caso de estudio, y finalmente se presentan las conclusiones generales del trabajo.

---

<sup>4</sup> *Receta*: Según ISA-88, es la información necesaria que define los requerimientos de producción para un producto específico.

<sup>5</sup> *SOP*: Procedimiento de operación estándar.

<sup>6</sup> *Reglas de Producción*: Según ISA-95, son las instrucciones operacionales de manufactura sobre cómo elaborar un producto.

## Capítulo I

# Conceptualización de La Función de Programación de La Producción

*Como primera medida, este capítulo introduce aspectos básicos de un sistema de manufactura, para posteriormente centrarse en la conceptualización de la función de programación de la producción, se parte de las definiciones encontradas en la literatura en general, se resaltan los principales inconvenientes identificados para la función, así como también las técnicas enfocadas en la asignación de recursos dentro de dicha función. Por último se aborda la programación de la producción desde estándares en automatización, para finalmente concluir con la definición puntual de tareas y flujos de información que aplican el método de programación de la producción desarrollado en el presente trabajo.*

Un sistema de manufactura involucra actividades relacionadas con la producción de bienes usando recursos y prácticas de manufactura, de acuerdo a demandas externas sujetas al contexto del sector, por ejemplo, aspectos sociales y económicos. Hoy en día, el mercado demanda productos de mayor calidad a un menor costo, altamente personalizados y con un ciclo de vida corto [8]. La industria manufacturera es y continuará siendo en el futuro, uno de los principales generadores de riqueza en la economía mundial. De acuerdo con un reporte elaborado por la Comisión Europea (EC, 2004), el cual proyecta una visión en el sector manufacturero para el año 2020, habrán 26 millones de empresas en la Unión Europea (EU), donde el 10% estarán relacionadas al dominio manufacturero y representan aproximadamente un 22% del producto nacional bruto de la EU. Este informe refleja claramente la importancia de la actividad manufacturera en la economía mundial, y fundamenta la investigación enfocada en métodos y tecnologías, para mejorar los vectores de productividad y competitividad del sector [12].

Un sistema de manufactura puede ser clasificado de acuerdo al tipo de producción, tipo de proceso y volumen de producción. Los tipos de producción, en términos de órdenes de producción, se dividen usualmente en [8]:

- **Make-to-stock:** Donde la producción es elaborada en términos de inventario (stock), en base a pronósticos del mercado, ejemplos de esta clasificación se encuentran en la industria textil y de calzado, con altos volúmenes de producción.
- **Assembly-to-order:** Donde los productos finales comienzan su proceso de ensamblaje únicamente cuando se recibe el pedido de un cliente, como por ejemplo la industria automotriz.
- **Make-to-order:** Donde la producción comienza después de recibir el pedido de un cliente, como por ejemplo el caso de la producción de máquinas.

---

Según el tipo de proceso, un sistema de manufactura puede ser clasificado en:

- **Procesos Continuos:** En los cuales los materiales fluyen continuamente a través de los diversos equipos involucrados en el proceso.
- **Procesos Discretos:** En los cuales una cantidad especificada de producto se procesa como una unidad (grupo de partes) entre estaciones y cada parte mantiene su identidad.
- **Procesos Batch:** Los cuales conducen a la elaboración de cantidades finitas de un producto, sometiendo cantidades finitas de material de entrada a un conjunto ordenado de acciones de procesamiento, dentro de un periodo finito de tiempo, usando uno o más recursos.

Por último un sistema de manufactura también puede ser clasificado de acuerdo al volumen de producción, en [8]:

- **Job Shop:** Es caracterizada por la producción de bajos volúmenes de una gran variedad de productos, con frecuencia se fabrica una sola unidad de cada tipo.
- **Batch Production:** Involucra la producción de lotes de un tamaño mediano, del mismo producto, los cuales tienen una demanda regular pero no muy elevada.
- **Mass Production:** Está relacionado a la producción especializada de uno o un reducido número de productos. Cada uno con altas tasas de producción.
- **Mass Customization:** Significa hacer productos a la medida de cada comprador, donde incluso los componentes básicos pueden tener diversas características. El ensamble es personalizado, mientras que la fabricación no lo es. Es decir, el diseño básico no es personalizado, y los componentes son todos producidos en masa. Cada consumidor pone su propia configuración pero obligado por el rango de productos disponibles. El producto final es construido alrededor de un núcleo estándar central [2].

Dentro de los aspectos de mayor relevancia dentro de un sistema de manufactura se encuentra la programación de la producción, esta función tiene una alta influencia en el desempeño global del sistema. Desarrollar un proceso óptimo de asignación de recursos en la programación de la producción es cada vez más importante para las empresas de manufactura, con el fin de aumentar su productividad y rentabilidad, a través de una mayor agilidad en piso de planta, para sobrevivir en un mercado global cada vez más competitivo [13]. En este primer capítulo se pretende definir las características principales de la función de programación de la producción, especificando tareas, interfaces y flujos de información, con el objetivo de delimitar el alcance de esta función en un sistema de manufactura y en el contexto del presente trabajo.

## 1.1 Definición de la programación de la producción

En la literatura se encuentra diversas definiciones dadas por reconocidos autores respecto a la función de programación de la producción. En [10] se define la programación de la producción como el proceso de optimizar la decisión de asignación de recursos. La asignación de recursos decide cuándo y que recursos se necesitan para el desarrollo de una tarea en específico. En [9] se define la programación de la producción como la actividad de toma de decisiones, relacionada con la asignación óptima y detallada en el tiempo de operaciones a recursos de producción limitados y la determinación de la secuencia de operaciones de tal forma que las restricciones operacionales se cumplan. En [8] se define la programación de la producción como la asignación óptima de los recursos a operaciones en un horizonte temporal, donde estas asignaciones deben obedecer a un conjunto de restricciones que reflejan las relaciones temporales entre operaciones y la capacidad limitada de los recursos. Otras definiciones puntuales de la programación de la producción se encuentran en [14, 15, 16, 17].

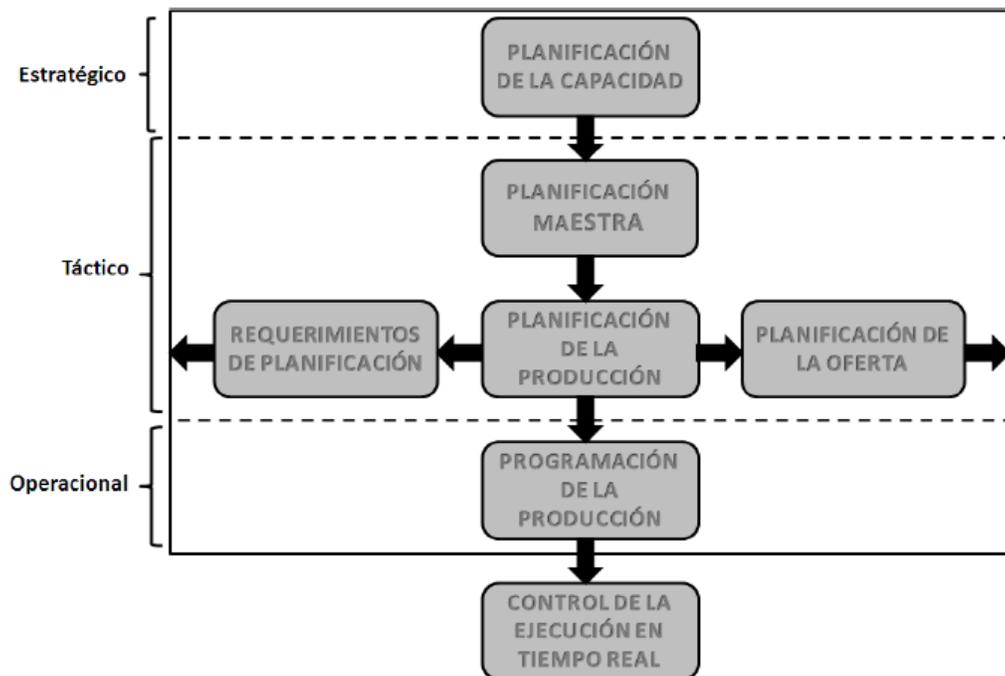
De las definiciones anteriores se puede concluir que a pesar de encontrar diferencias de términos entre los autores, la mayoría converge en tres ideas principales:

- La función de programación de la producción tiene como objetivo principal la optimización en la toma de decisiones alusivas a asignación de recursos.
- Aunque en la literatura, no todos los autores plantean la diferencia entre los términos de programación de la producción y la asignación de recursos, es importante resaltar este hecho. Esta tesis se desarrolla en el ámbito de la programación de la producción, y se centran esfuerzos en la tarea de asignación de recursos.
- Dentro de la función de la programación de la producción es trascendental considerar los aspectos relacionados a la capacidad finita operacional de los recursos del sistema productivo, al igual que el horizonte temporal de trabajo.

La función de la programación de la producción se ubica en un punto clave dentro de un sistema de manufactura. Los sistemas de producción convencionales son generalmente descritos por una jerarquía de tres niveles, como la que se presenta en la Figura 1.1, este esquema representa una visión de las funciones de planificación, programación y ejecución de la producción, haciendo énfasis en la diferencia de horizontes temporales intrínsecos para cada función. La toma de decisión se divide en 3 niveles, llamados *estratégico* (largo plazo), *táctico* (mediano plazo) y *operacional* (corto plazo).

De esta manera, la *planificación a nivel estratégico* corresponde a decisiones a largo plazo que determinan las políticas de competitividad en el mercado. En base a pronósticos de mercado, y otra información relacionada, en este nivel son determinadas las capacidades requeridas para los equipos, personal, medios de transporte, etc. Por otro parte las tareas de *planificación de nivel táctico* están directamente relacionadas con los pedidos del cliente. El módulo de planificación maestra es responsable por

aceptar las órdenes, así como también establecer los plazos de entrega. Luego la planificación de la producción proyecta las actividades de producción en una escala de tiempo. Finalmente la programación de la producción en el *nivel operacional* desarrolla los primeros segmentos del plan de producción en asignación de recursos y secuencias de operaciones. La programación es abordada como un problema detallado, para operaciones por individual, con respecto a capacidades finitas. Por debajo del módulo de programación de la producción se encuentra un sistema de control de la ejecución en tiempo real [18].



**Figura 1.1: Niveles de planificación jerárquica.**

Fuente: Novel Models and Algorithms for Integrated Production Planning and Scheduling, András Kovács.

De lo anterior, se puede establecer una primera aproximación respecto al esquema que estructura los niveles de toma de decisión dentro de un sistema de manufactura, la programación de la producción dentro del presente trabajo, se define como una función de nivel operacional, con un horizonte de tiempo corto y la cual se integra a los otros niveles mediante la adaptación de un plan de trabajo a un programa de producción que establece una relación entre la secuencia de operaciones y la asignación de recursos.

## 1.2 Retos de la programación de la producción

El desarrollo de la función de programación de la producción involucra múltiples aspectos dentro de un sistema de manufactura, para elaborar eficientemente un programa de producción se deben tener en cuenta ciertas situaciones y criterios, con el objetivo de concluir con un programa óptimo y factible. En la literatura se aborda el planteamiento de la programación de la producción desde distintos puntos de vista, cada autor enfatiza en los inconvenientes comúnmente presentados en dicha función.

Como se presenta en [19], la prioridad en las operaciones y el no tener en cuenta la capacidad finita de los recursos son unos de los problemas de mayor relevancia en la función de programación, por ejemplo en el primer caso se pueden presentar problemas de recurso compartido, en los cuales dos o más operaciones deben hacer uso de un recurso al mismo tiempo, de igual manera dos órdenes de producción pueden ocasionar problemas al sobreponerse en un mismo periodo, en esta situación se debe evaluar el grado de prioridad entre los clientes. El segundo caso, referente a la capacidad operacional representa uno de los mayores inconvenientes de los sistemas de planificación y programación actuales. Hoy en día, la mayoría de las fábricas aplican sistemas MRP<sup>7</sup> en la planificación de la producción a mediano y corto plazo. Estos sistemas no tienen en cuenta la carga real de la capacidad de producción. No es de extrañar que en una época caracterizada por las fluctuaciones del mercado, los planes de producción generados de esta manera puedan ser difícilmente desplegados en programas factibles [18]. Esto ocurre por muchas razones, entre las cuales se encuentran que los sistemas MRP asumen recursos infinitos, y las actualizaciones desde y hacia piso de planta no son en tiempo real [20].

Como se expuso en la Figura 1.1, la función de programación de la producción hace parte de un complejo sistema de toma de decisiones dentro de la empresa. Por tal motivo su integración a los niveles de planificación estratégica, ejecución y demás ámbitos, representa un reto para los sistemas de manufactura. Existe una gran desventaja en las estrategias tradicionales, debido a que no se presenta una interacción eficiente entre los niveles de decisión. Las decisiones de planificación pueden causar sub-problemas de programación no factible [21].

Existen múltiples situaciones que pueden afectar el normal funcionamiento del sistema de programación de la producción, dentro de una fábrica pueden suceder eventos aleatorios que impiden la ejecución de un programa de producción. Dentro de estos eventos se pueden destacar: el arribo continuo de nuevas tareas, mientras que tareas programadas son canceladas; algunos recursos no están disponibles, así como también recursos adicionales se introducen al sistema; ocurren eventos inesperados tales como, fallas de máquinas, ausencia de operadores o materias primas, arribo de órdenes

---

<sup>7</sup> MRP: Planificación de los requerimientos de material, sistema de control de inventarios y planificación de la producción, usado para administrar procesos de manufactura.

prioritarias; tareas programadas pueden consumir un tiempo diferente al esperado. El sistema de programación de la producción debe estar en la capacidad de adaptarse e inclusive anticiparse a estos incidentes con el fin de evitar fallas que afecten la productividad [22].

Se observa la necesidad de desarrollar un sistema de programación de la producción que haga frente a los inconvenientes que se puedan presentar en el entorno manufacturero. De ahí, el surgimiento de múltiples técnicas en la asignación de recursos que procuran el desarrollo de eficientes programas de producción. En la próxima sección se abordan las principales técnicas.

### 1.3 Técnicas de asignación de recursos

La función de programación de la producción en la industria continúa siendo comúnmente desarrollada de forma manual por personas con alta experiencia en planificación, mediante el uso de plantillas u otros métodos en papel, por ejemplo, Kanban u hojas de cálculo. A medida que el entorno productivo se torna más complejo, muchas empresas han identificado la necesidad de métodos sistemáticos y óptimos, con el fin de cumplir con las metas de productividad. La complejidad aumenta debido a mayores volúmenes de producción, personalización en los productos, y una alta presión para ahorrar en los costos de producción y energía [23]. Se han desarrollado diversos métodos o técnicas en la programación de la producción, enfocándose en el problema de asignación de recursos, entre estos podemos destacar:

- **Off-line Scheduling (*Programación fuera de línea*):** Es un método en el cual todos los parámetros de programación son conocidos previamente a su ejecución. Implica la elaboración de un único programa sin opción de reprogramación. En los casos más simples se calcula el programa antes que empiece la producción (por ejemplo en la noche o el fin de semana previo) [10]. En el entorno variable actual, este método no es eficiente debido a su falta de reactividad y capacidad de reprogramación en un tiempo adecuado.
- **Optimal Solutions and Mathematical Programming (*Programación matemática y soluciones óptimas*):** Para algunos problemas simples de programación, existe algoritmos eficientes para calcular soluciones óptimas. Por ejemplo, la regla de despacho EDD<sup>8</sup> provee una solución óptima para minimizar el máximo retardo [10]. Estos algoritmos pueden requerir una enorme cantidad de tiempo para alcanzar la solución óptima, y no son adecuados para problemas de gran dimensión y complejidad [8].

---

<sup>8</sup> EDD: The earliest due date rule, regla de prioridad que secuencia los trabajos de acuerdo a sus fechas de entrega.

- **Dispatching (*Despacho*):** Si se tiene un margen estrecho en el tiempo de cálculo requerido para encontrar soluciones óptimas en la programación, es necesario utilizar soluciones heurísticas, tales como *Dispatching*. La aplicación de *Dispatching* junto con reglas de prioridad es el método heurístico más conocido para programación. Las reglas de despacho sin embargo tienden a obtener un rendimiento bajo e impredecible [10]. Existen muchas reglas de prioridad tales como EDD, SPT (Shortest Processing Time), FIFO (First In First Out), SST (Shortest Setup Time) y LOR (List Operation Remaining) [8].
- **Artificial Intelligence (AI) Approaches for Scheduling (*Inteligencia artificial enfocada en programación*):** También llamado *knowledge-based scheduling*, este método basa su funcionamiento en conocimientos específicos del problema de programación. En comparación con el método *Dispatching*, los enfoques basados en AI para la programación pueden mejorar el desempeño de manera significativa. También requieren mayor tiempo de cálculo pero no más allá de los límites aceptables.
- **Neighbourhood Search Techniques (*Técnicas de búsqueda en la frontera*):** Son técnicas heurísticas que buscan la solución óptima de un problema de forma iterativa, calculando una nueva investigación en la frontera de una solución existente. Las técnicas, *Simulated Annealing* (SA) y *Algoritmos Genéticos* (AG) desarrollan una búsqueda estocástica, los AG se basan en el proceso de optimización en la naturaleza. Estos métodos de un desempeño casi óptimo pueden obtener mejores resultados que las reglas de despacho, pero utilizan una cantidad considerable de tiempo en el cálculo.
- **Lagrangian Relaxation (*Relajación de Lagrange*):** Un enfoque para programación en manufactura Job Shop se basa en el método de *Lagrangian Relaxation*, el cual tiene fundamento en bases matemáticas y restricciones de capacidad. Este enfoque proporciona un alto rendimiento, pero emplea tiempos de cálculo considerables.
- **Discrete Event System Control Theory (*Teoría de control de sistemas a eventos discretos*):** Algunas investigaciones en el área proponen la teoría de control de sistemas a eventos discretos, si bien este enfoque provee un marco de trabajo formal en el modelado del proceso productivo, no aborda la complejidad computacional del problema de programación. Como consecuencia se usa la teoría de control para modelar el problema y se recurre a otras técnicas de programación en la toma de decisiones [10]. Cabe resaltar que esta técnica hará parte del enfoque a utilizar en el presente trabajo, en el Capítulo 4 se profundiza en el tema.

## **1.4 La programación de la producción desde estándares en automatización**

Se observa una divergencia de enfoques respecto a la función de programación de la producción, la cual se ve reflejado en la heterogeneidad de tareas, modelos, métodos, procedimientos, etc. desarrollados para esta función en cada empresa. Por esta razón se hace necesaria la aplicación de estándares en automatización para su conceptualización. El desarrollo de muchos de los estándares actuales en el área, se justifica en la necesidad de integración en los sistemas de manufactura. La aplicación de estándares en una empresa cobra mayor importancia como consecuencia de diversos factores, tales como: falta de una terminología común (un término tiene distintos significados en áreas diferentes de la empresa, así como también, para una misma actividad se aplican diferentes términos); falta de una representación de la información coherente y consistente; divergencia en los puntos de vista acerca de lo importante para la empresa; los criterios de eficiencia dentro del sistema de manufactura difieren según el área de trabajo.

La función de programación de la producción es abordada por muchos de los estándares como uno de los puntos claves dentro de un sistema de manufactura. Entre esos estándares podemos resaltar la labor de organizaciones internacionales como ISA, Sociedad Internacional de Automatización, y MESA, Asociación de soluciones para empresas de manufactura. En específico, el estándar ISA 95, así como las funcionalidades para sistemas MES<sup>9</sup> definidas por MESA, serán usados como referencia para la conceptualización de la función de programación de la producción en el presente trabajo.

### **1.4.1 Estándar ANSI/ISA-95**

En años recientes, las compañías han tenido que enfrentarse al distanciamiento entre las capas ERP<sup>10</sup> y el sistema de control de la producción, cuando se trata de unificar estos niveles, han surgido problemas asociados a la comunicación entre las personas y los sistemas en sí, entre otros distintos factores. Es así, como ISA decide en los años noventa desarrollar el estándar ANSI/ISA-95, para integrar los sistemas de negocio y control, con el fin reducir los riesgos, costos y errores que conlleva la integración de dichos sistemas. Este estándar contiene modelos y terminología que se puede utilizar para analizar una empresa de manufactura de forma personalizada [24]. El estándar ISA-95 está compuesto por 5 documentos, en las partes 1 y 2 se definen las fronteras para el intercambio de información entre los niveles funcionales dentro de la estructura jerárquica de una empresa, enfocándose en la interfaz entre el nivel 4, nivel de logística y planificación de negocios, y el nivel 3,

---

<sup>9</sup> MES: Sistemas de Ejecución de Manufactura, proporciona información que permite la optimización de las actividades de producción desde el lanzamiento de una orden hasta la obtención del producto final.

<sup>10</sup> ERP: Planificación de recursos empresariales, sistema de gestión de información asociado a procesos de negocio.

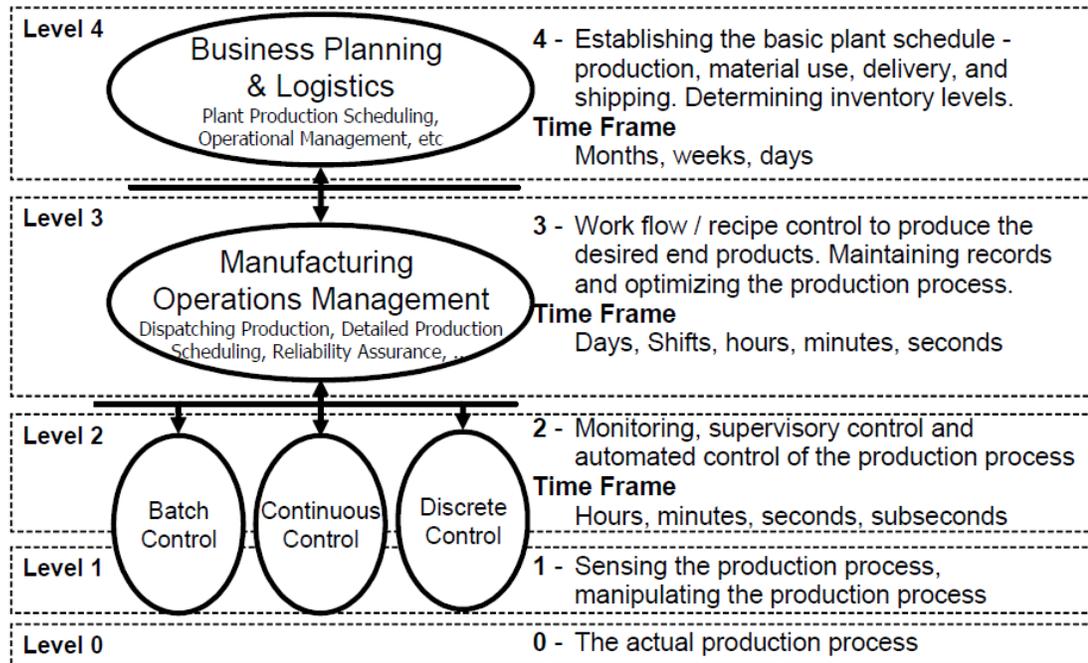
nivel de administración de operaciones de manufactura (ver Figura 1.2), posteriormente se desarrolla el respectivo análisis de este modelo. La parte 3, define las actividades detalladas para la administración de operaciones de manufactura (MOM), y las interrelaciones dentro del nivel 3. La parte 4, aun en desarrollo, definirá los modelos de objetos y atributos adicionales a los ya definidos en la parte 2, a fin de describir y organizar la información intercambiada entre las funciones MOM definidas en la parte 3. Por último, la parte 5 del estándar, la cual también se encuentra en desarrollo, define modelos de transacción B2M<sup>11</sup> para el intercambio de información [25]. En este trabajo se usa como referencia los conceptos de las partes 1 y 3 del estándar ISA-95, la primera parte se toma como base para definir la ubicación de la función de programación de la producción dentro de un sistema de manufactura, y la segunda parte proporciona conceptos y modelos necesarios para la definición de actividades y flujos de información internos y externos.

Como primera medida, se referencia el *Modelo jerárquico funcional* expuesto en la parte 3 del estándar ISA-95, la Figura 1.2 muestra los diferentes niveles definidos en este modelo: logística y planificación de negocios; administración de operaciones de manufactura, y el nivel de control batch, continuo o discreto. El nivel 0 hace alusión al proceso físico. En el nivel 1 se encuentran las actividades involucradas en la adquisición de datos y manipulación del proceso. En el nivel 2 se encuentran las actividades de monitoreo y control. En el nivel 3 se definen los flujos de trabajo para elaborar los productos finales deseados. Y por último en el nivel 4 se desarrollan los procesos de negocio necesarios en la gestión de un sistema de manufactura [26].

En el nivel 4 se define un programa de producción básico o primario (enmarcado en un horizonte de tiempo a largo plazo: meses, semanas o días), el cual se elabora con base en la capacidad de producción, niveles de inventario y materias primas, así como también plazos de entrega, costos y otros aspectos propios de este nivel. La función de programación de la producción se encuentra dentro de las actividades de nivel 3, y recibe del nivel 4 el programa básico de producción, y a partir de este genera un programa detallado de producción, enmarcado en un horizonte de tiempo a corto plazo (días, turnos de trabajo, horas, minutos y segundos), el cual tiene en cuenta la información actual de la planta, con el objetivo de realizar una asignación óptima de recursos. Posteriormente se envía a los niveles inferiores de control y monitoreo, el documento guía para la ejecución del programa detallado de producción previamente elaborado. Del modelo se puede resaltar la importancia de una correcta administración de los flujos de información intercambiados entre los diferentes niveles de un sistema de manufactura real.

---

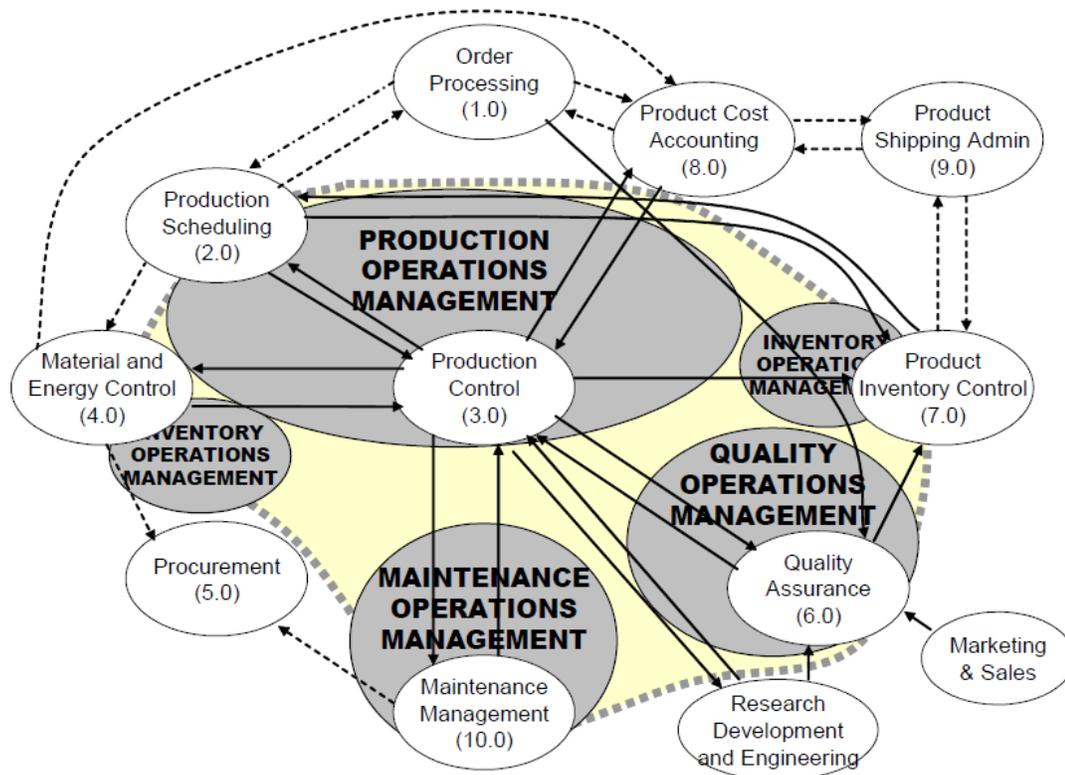
<sup>11</sup> B2M: Business-to-manufacturing.



**Figura 1.2: Modelo jerárquico funcional.**

Fuente: Estándar de automatización ANSI/ISA—95.00.03.

A continuación se enfatiza en las actividades de nivel 3, para ello se hace uso del *Modelo de flujo de datos funcional* (ver Figura 1.3) definido en la parte 3 de la norma ISA-95, este modelo describe la interfaz presente entre los niveles 3 y 4, profundizando en la definición de los flujos de información intercambiados en esta frontera, así como también flujos internos dentro del nivel 3. Dentro del modelo, los óvalos representan las principales funciones en una estructura organizacional, las flechas representan el flujo de información entre estas funciones y los rectángulos representan una entidad externa, fuera de los límites del modelo. Las funciones dentro de la línea punteada gris corresponden a las actividades de administración de operaciones de manufactura, cabe resaltar que esta línea intersecta funciones que tienen sub-funciones que pueden estar dentro del nivel 3 o 4, dependiendo de las políticas de la organización. Las áreas sombreadas corresponden a las 4 categorías del nivel de administración de operaciones de manufactura: administración de operaciones de producción, administración de operaciones de mantenimiento, administración de operaciones de calidad y administración de operaciones de inventario. Según la norma ISA-95, la administración de operaciones de manufactura son aquellas actividades de una empresa que coordinan el personal, equipo, material y energía con el fin elaborar productos a partir de materias primas. Incluye actividades de gestión de la información respecto a programación, capacidad, definición, historial y estado de todos los recursos (personal, equipo y materiales) utilizados en el sistema de manufactura [11].



**Figura 1.3: Modelo de flujo de datos funcional.**

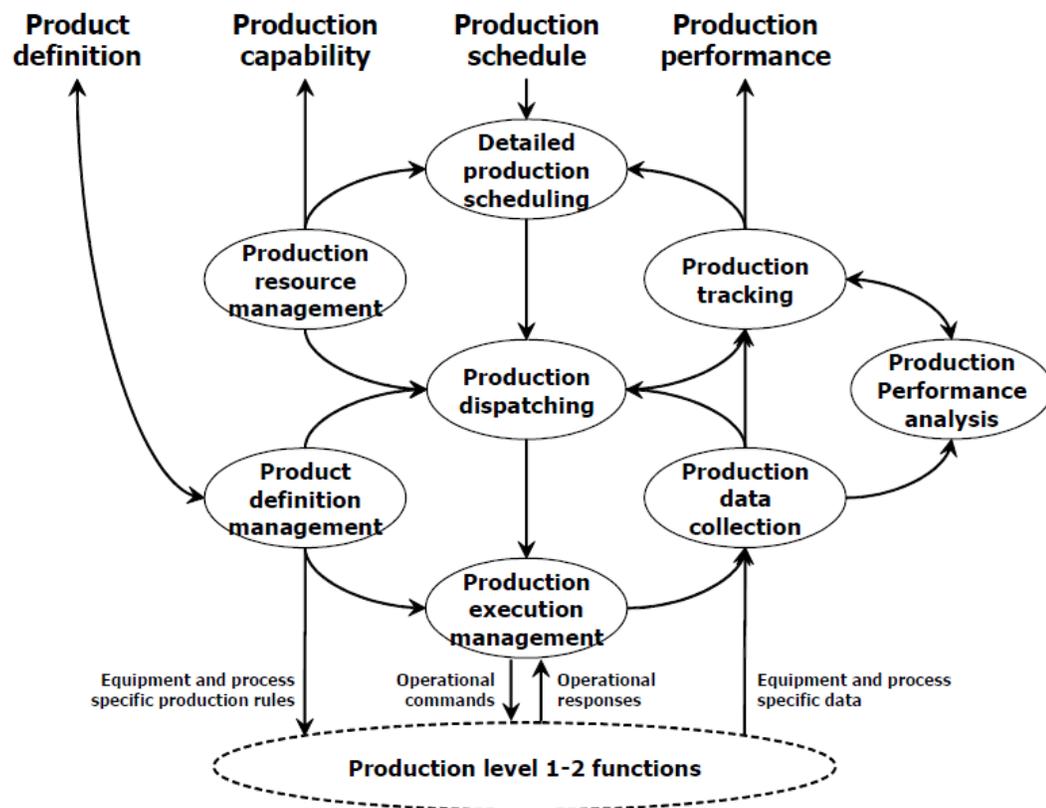
Fuente: Estándar de automatización ANSI/ISA—95.00.03.

En el modelo se define la programación de la producción como una sub-función del ámbito de administración de operaciones de producción, la cual tiene como tareas principales [26]:

- Determinar el programa de producción.
- Identificar requerimientos de materias primas a la largo plazo.
- Determinar productos disponibles para la venta.

Como se observa en el modelo de la Figura 1.3, la *programación de la producción* (2.0), intercambia flujos de información directos con la sub-función *control de la producción* (3.0), así como también con otros ámbitos como el de inventario a través de las sub-funciones *control de energía y material* (4.0) y *control de inventario de productos* (7.0), además sobresale el flujo de información directo con el nivel 4 mediante la recepción de órdenes de producción. En el **Anexo A** se resumen los principales flujos de información presentes en el modelo, los cuales están directamente asociados con la función de la programación de la producción.

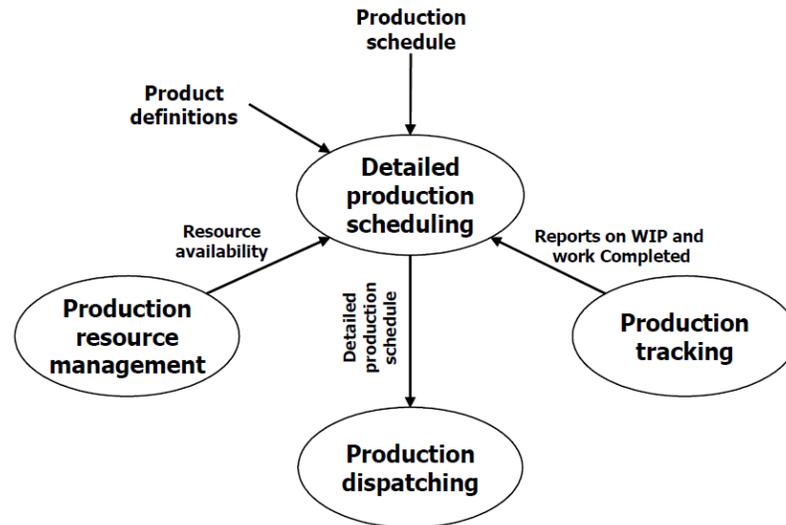
Por último se referencia el *Modelo de actividades de administración de operaciones de producción* (ver Figura 1.4) con el objetivo de identificar las principales tareas definidas por el estándar ISA-95 para la función de programación de la producción, y profundizar en los flujos de información internos intercambiados en las actividades del ámbito de producción. El ovalo en línea punteada representa la funciones de adquisición de datos y control de los niveles 1 y 2. Los cuatro elementos de información (*Product definition*, *Production Capability*, *Production Schedule* y *Production performance*) corresponden a la información intercambiada entre los niveles 3 y 4. Los óvalos en línea continua representan las actividades de dicho ámbito. Dentro de estas actividades podemos asociar directamente a la función de programación de la producción con programación detallada de la producción (*Detailed production scheduling*) y despacho de la producción (*Production dispatching*), en el presente trabajo se hace énfasis en estas dos actividades definidas en el estándar.



**Figura 1.4: Modelo de actividades de administración de operaciones de producción.**

Fuente: Estándar de automatización ANSI/ISA—95.00.03.

La *programación detallada de la producción* puede ser definida como el conjunto de actividades que reciben el programa de producción y determinan el uso óptimo de recursos locales para cumplir con los requerimientos de dicho programa. Para su desarrollo la programación detallada de la producción toma en cuenta la disponibilidad de recursos y otras situaciones locales de producción. La interfaz de esta actividad dentro del *Modelo de actividades de administración de operaciones de producción* se observa con mayor detalle en la Figura 1.5.



**Figura 1.5: Interfaz de la actividad programación detallada de la producción.**

Fuente: Estándar de automatización ANSI/ISA—95.00.03.

En el modelo de la Figura 1.5 se puede observar que la ejecución de la programación detallada de la producción inicia con la recepción del programa de producción (*Production Schedule*), proveniente de nivel 4 y el cual contiene información referente a que producto elaborar, cuanto producir y el plazo de entrega. Además de esto, se cuenta con información acerca de la disponibilidad y capacidad de los recursos (*Resource availability*), definición de reglas y/o recetas de producción (*Product definitions*), y reportes de inventario de productos en proceso o terminados, toda esta información es necesaria para la elaboración del programa detallado de producción (*Detailed production scheduling*), el cual es enviado a despacho de la producción y contiene la secuencia de órdenes de trabajo involucradas en la elaboración de una o más productos. Un programa detallado de producción asocia procesos físicos y/o químicos a clases o equipos específicos de producción, junto con tiempos específicos de ejecución. Este puede ser recalculado a partir de la ocurrencia de eventos imprevistos tales como fallos en los equipos, cambios en el personal y/o en la disponibilidad de materias primas.

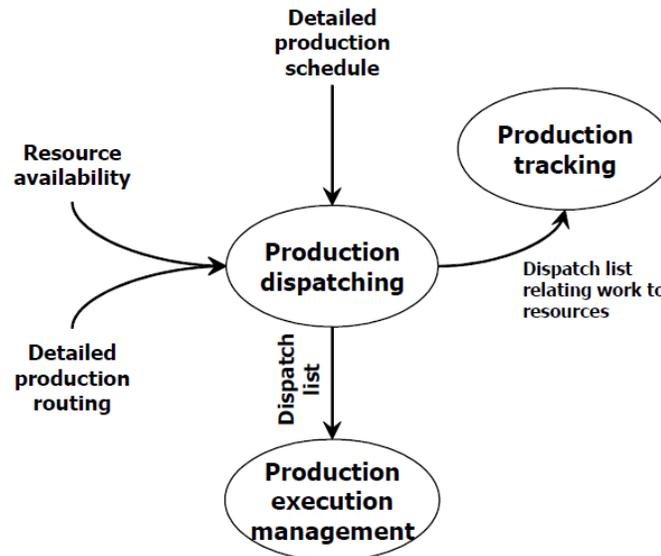
Las tareas definidas por el estándar ISA 95 para la programación detallada de la producción, incluyen:

- Crear y mantener el programa detallado de producción.
- Comparar la producción actual con la producción planificada.
- Determinar la capacidad comprometida de cada recurso.
- Obtener la información relevante proveniente de los ámbitos de mantenimiento, calidad e inventario.
- Ejecución de simulaciones what-if, las cuales permiten analizar los efectos de escenarios alternativos usando información actual o simulada.

Por su parte el *despacho de la producción* se encarga de emitir las órdenes de trabajo definidas en el programa detallado de producción. El modelo expuesto en la Figura 1.6 define la interfaz de esta actividad dentro del ámbito de producción. Partiendo del programa detallado de producción (*Detailed production schedule*) y con base en información referente a secuencia de operaciones (*Detailed production routing*) y disponibilidad de recursos (*Resource availability*) se elabora una lista de despacho (*Dispatch list*), la cual puede ser definida como el conjunto de órdenes de producción listas para ser ejecutadas, las órdenes de producción definen elementos de trabajo en específico que serán ejecutados en las unidades o centros de trabajo. Según el estándar ISA-95 las actividades de despacho de la producción, incluyen:

- Emitir las órdenes de trabajo identificadas en el programa de producción.
- Liberar recursos locales para su uso.
- Gestión del estado de las órdenes de trabajo (aprobada, en proceso o cancelada).
- Asegurar que las restricciones dispuestas en el programa detallado se cumplan en producción.
- Informar a programación detallada de la producción cuando eventos no anticipados resulten en la incapacidad de cumplir con los requerimientos de programación, asociados por ejemplo a aspectos de calidad o disponibilidad de recursos.
- Enviar y permitir la disponibilidad de la lista de despacho.

El estándar ISA-95 tiene un papel de suma importancia en el desarrollo del presente trabajo, puesto que representa un marco referencial para la conceptualización de la función de programación de la producción. El primer modelo, jerárquico funcional, permite visualizar la disposición de los niveles de toma de decisión dentro de un sistema de manufactura, en este se puede ubicar a la función de programación de la producción dentro del nivel 3 de administración de operaciones de manufactura.



**Figura 1.6: Interfaz de la actividad despacho de la producción.**

Fuente: Estándar de automatización ANSI/ISA—95.00.03.

El segundo modelo de flujo de datos funcional, profundiza en las funciones de dicho nivel 3, exteriorizando los principales flujos de información intercambiados, así como también la distribución de actividades efectuadas por cada función. Por último, el modelo de actividades de administración de operaciones de producción, enfatiza en las tareas y flujos de información directamente relacionados con la función de programación de la producción. Estos elementos detallados en el estándar se analizan con el fin de definir puntualmente la funcionalidad del método de programación de la producción desarrollado en el presente trabajo.

En el sector industrial y de automatización, se presentan conceptos paralelos a los del estándar ISA-95, entre ellos podemos encontrar las funcionalidades de nivel 3 o nivel MES especificadas por MESA, las cuales se abordarán a continuación con el fin de complementar e integrar concepciones respecto a la función de programación de la producción.

### 1.4.2 Funcionalidades MES definidas por MESA

MESA Internacional fue formada en 1992 como una asociación comercial, la cual representa a los proveedores y desarrolladores de software MES, servicios y productos relacionados. Un sistema MES tiene funciones de soporte, guía y seguimiento de cada una de las actividades de producción, MESA ha identificado once principales funciones de un sistema MES [27]:

- **Resource Allocation and Status (Estado y Asignación de Recursos):** Administra los recursos, incluyendo maquinas, mano de obra, materiales, y otros elementos tales como documentos que deben estar disponibles en el inicio de una operación. Provee un historial detallado de los recursos, asegura que los equipos estén correctamente configurados, y proporciona un estado en tiempo real de los mismos. La administración de estos, incluye reserva y despacho con el fin de cumplir los objetivos de las operaciones de programación.
- **Operations/Detail Scheduling (Operaciones/Programación detallada):** Provee una secuencia de operaciones basada en prioridades, atributos, características, y/o recetas asociadas a unidades de producción específicas. Una secuencia definida de forma óptima permite minimizar los tiempos de operación de los equipos. En base en la capacidad finita de los recursos se fija una secuencia de actividades que optimice el desempeño de la planta.
- **Dispatching Production Units (Despacho de Unidades de Producción):** Administra los flujos en las unidades de producción esquematizados en tareas, batch, lotes, y órdenes de trabajo. La información gestionada en despacho contiene la secuencia en la cual las operaciones deben ser efectuadas, al igual que los cambios en tiempo real a media que ocurren eventos en piso de planta.
- Document Control (Control de documentos).
- Data Collection/Acquisition (Recolección y adquisición de datos).
- Labor Management (Administración de Personal).
- Quality Management (Gestión de la calidad).
- Process Management (Gestión del proceso).
- Maintenance Management (Gestión del mantenimiento).
- Product Tracking and Genealogy (Seguimiento y trazabilidad del producto).
- Performance Analysis (Análisis de desempeño).

Debido a que los conceptos definidos por MESA, son mundialmente aplicados en la implementación de sistemas MES, en el presente trabajo se hace uso de estas nociones con el fin de aproximar a la función de programación de la producción a un entorno de fabricación real. De las 11 funcionalidades definidas por MESA, son de gran relevancia para el análisis del presente trabajo las primeras tres: *Estado y Asignación de Recursos*; *Operaciones/Programación detallada*; y *Despacho de Unidades de Producción*. Con el objetivo de integrar y consolidar conceptos, en la siguiente sección se propone un análisis que busca la correlación entre estas actividades definidas por MESA con los modelos definidos en el estándar ISA-95.

### 1.4.3 Correlación entre conceptos ISA-95 y MESA

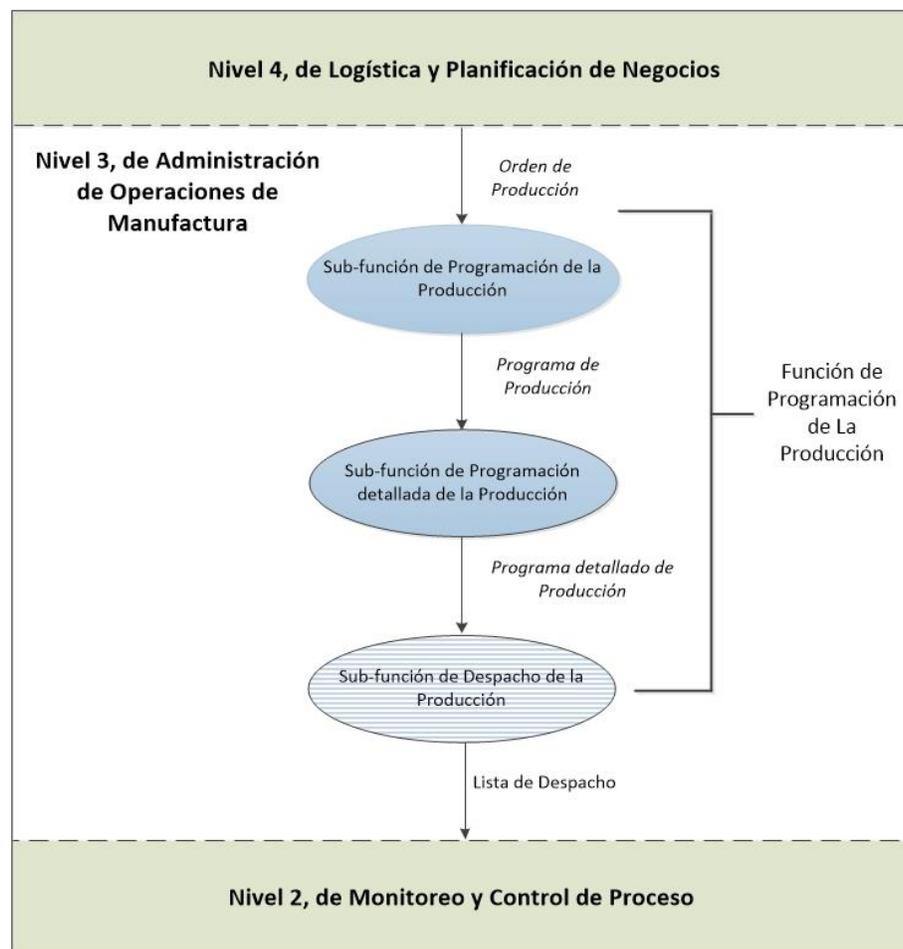
En esta sección se efectúa un análisis que busca establecer la correlación entre el *Modelo de actividades de administración de operaciones de producción* (Figura 1.4) con las funcionalidades definidas por MESA que están directamente relacionadas con la programación de la producción. La primera funcionalidad, *Estado y Asignación de Recursos* se relaciona con dos de las actividades presentes en dicho modelo, la tarea de gestión de recursos de producción se vincula directamente con *Administración de recursos de producción* (Production resource management), mientras que la asignación de recursos se desarrolla en la actividad de *Programación detallada de la producción* (Detailed production scheduling). Por su parte *Operaciones/Programación detallada* también se encuentra dentro del dominio de acción de la *Programación detallada de la producción*, en la cual se define la secuencia de operaciones para elaborar un producto. Por último *Despacho de Unidades de Producción*, como su nombre lo indica se asocia directamente con la actividad *Despacho de la producción* (Production dispatching), en donde se administra el flujo de trabajo ejecutado en piso de planta. En el análisis previo se observa la estrecha relación de los conceptos definidos en los estándares con los requerimientos reales de un entorno de manufactura, en este caso con las especificaciones funcionales de un sistema MES.

La terminología, modelos y conceptos abordados anteriormente, definidos tanto por estándares internacionales como por la literatura en general, constituyen la base para concretar las especificaciones del método para la programación de la producción desarrollado en el presente trabajo. A continuación se efectúa el análisis de las especificaciones puntuales para el método.

## 1.5 Análisis funcional del método para la programación de la producción

Basándose en los conceptos expuestos anteriormente, en esta sección se realiza un análisis funcional, el cual tiene como objetivo concretar interfaces, tareas y flujos de información que aplican para el método. En la Figura 1.7 se establecen las interfaces internas y externas de la función de programación de la producción con los niveles 2 y 4 del modelo jerárquico funcional, resaltando el flujo de información principal que se intercambia internamente entre las sub-funciones de programación, programación detallada y despacho de la producción, (cabe resaltar que de la sub-función despacho de la producción se enfatiza exclusivamente en las actividades asociadas a establecer una interfaz directa con el nivel 2, de monitoreo y control del proceso, pero la generación y gestión de la lista de despacho no aplica para el método del presente trabajo). Del nivel 4, se recibe una orden de producción, la cual contiene como información primordial el tipo de producto, la cantidad y el plazo de entrega. La sub-función programación de la

producción recibe dicha información, y con base en la regla de producción del tipo de producto de la orden está en la capacidad de generar un programa de producción, el cual contiene la secuencia de operaciones necesarias para la elaboración de dicho producto, definiendo tiempos de procesamiento, materias primas requeridas y otras especificaciones, en esta etapa aún no se asigna un recurso en específico para cada operación. La sub-función programación detallada de la producción recibe el programa de producción y de acuerdo a los requerimientos operacionales aquí definidos, desarrolla el proceso de asignación de recursos, generando un programa detallado de producción, el cual contiene la distribución óptima de operaciones en el tiempo junto con su respectiva asignación de recursos. Esta información es recibida por la sub-función despacho de la producción, y a partir de esta, se determinan las órdenes de trabajo que serán enviadas a piso de planta (esta última actividad no es abordada por el método de programación de la producción del presente trabajo).



**Figura 1.7: Interfaz del método de programación de la producción.**  
Fuente propia.

La especificación de tareas se fundamenta en las actividades de programación detallada y despacho de la producción, definidas en ISA-95, así como también las funcionalidades MESA señaladas como relevantes para el presente trabajo.

Las tareas que aplican para el método de programación de la producción desarrollado en el presente trabajo son:

- **Creación y gestión del programa detallado de producción:** El objetivo principal del método es establecer programas factibles, con base en la capacidad y disponibilidad de los recursos (equipos, materiales), reglas de producción (receta), y otros criterios como costos de producción y plazos de entrega. Un programa detallado de producción se compone de una secuencia de operaciones establecidas en el tiempo, las cuales tienen asignadas un recurso en específico para su ejecución, y tienen como objetivo primordial el cumplimiento de una orden de producción.
- **Estado y asignación de recursos:** Administra la información sobre el estado de los recursos, incluyendo la capacidad y disponibilidad de los mismos, asegurando que la función de asignación de recursos se desarrolle eficientemente. Determina reserva de recursos según el programa, así como también los libera para su uso posterior.
- **Monitoreo del programa detallado de producción:** El método permite realizar un seguimiento continuo del programa detallado de producción, verificando el estado actual y el cumplimiento de las fases u operaciones preestablecidas.
- **Manejo de eventos no anticipados y reprogramación:** En caso de ocurrir eventos que afecten el normal desarrollo del programa detallado de producción (fallas en equipos, inconvenientes con materias primas, ingreso y cancelación de órdenes de producción, etc.), el método está en la facultad de identificar estos incidentes y efectuar una función de reprogramación si es necesario.
- **Establecer los flujos de información necesarios con los ámbitos de mantenimiento, calidad e inventario:** Se requiere un flujo de información con el ámbito de mantenimiento con el fin de verificar la disponibilidad de equipos, basándose en el programa de mantenimiento. Con el ámbito de calidad se efectúa un intercambio de información con el fin de asegurar la calidad en productos, materias primas y el desarrollo de los procesos de producción. Con inventario se intercambia información referente al flujo de productos terminados. Cabe resaltar que también se establece flujo de información con los niveles 4 y 2, por medio de órdenes de producción y órdenes de trabajo respectivamente.

- **Generación de reportes de producción:** Posterior a la ejecución del programa detallado de producción, el método está en la capacidad de recolectar y transmitir información sobre el desempeño de la producción para el respectivo análisis en un nivel superior.

Para establecer los flujos de información se toma como referencia el modelo de flujo de datos funcional, la información presente en el **Anexo A**, la cual sintetiza la información intercambiada en dicho modelo, y las interfaces internas definidas en el modelo de actividades de administración de operaciones de producción.

En la Tabla 1.1 se especifican las interfaces y flujos de información que el método de programación de la producción precisa para su desarrollo. Las tareas, interfaces y flujos de información definidos en esta sección representan la base principal para el desarrollo de las posteriores fases de desarrollo y modelado del método de programación de la producción desde el paradigma de los sistemas holónicos.

INTERFAZ		FLUJO DE INFORMACION	
Función de Programación de la Producción	Nivel 4, de Logística y Planificación de negocios		<b>Orden de producción:</b> Contiene información de pedidos de clientes, previamente confirmados, define el tipo de producto a elaborar, la cantidad, el plazo de entrega y otras especificaciones necesarias.
			<b>Capacidad de la producción:</b> Contiene información referente a la <i>capacidad de producción</i> de la planta (inalcanzable, disponible y comprometida) para hacer frente a las diversas demandas.
			<b>Regla de producción:</b> Comprende la definición de una receta maestra, la cual contiene el procedimiento estándar para la elaboración de un tipo de producto en particular, detallado en una secuencia de operaciones con tiempos y demás especificaciones necesarias.
			<b>Objetivos de costos de producción:</b> Contiene información referente a objetivos de costos de producción en términos de uso de recursos.
	Nivel 2, de Monitoreo y Control del proceso		<b>Estado de los recursos:</b> Contiene información referente a la disponibilidad de equipos (disponible, en uso, en fallo o reservado) y la capacidad de producción (por ejemplo, el volumen de trabajo de una prensa por hora). Así como también la verificación de disponibilidad de materias primas.
	Nivel 3, Ámbito de Calidad		<b>Especificaciones de calidad:</b> Contiene la información necesaria para el aseguramiento de la calidad en materias primas, procesos y productos.

Función de Programación de la Producción	Nivel 3, Ámbito de Mantenimiento		<b>Programa de mantenimiento:</b> Contiene la información referente a las rutinas de mantenimiento programadas, con el fin de administrar eficientemente la asignación de recursos.
			<b>Solicitud de Mantenimiento:</b> Solicitud para realizar una función de mantenimiento.
	Flujo Interno		<b>Programa de producción:</b> Contiene la secuencia de operaciones necesarias para elaborar un producto en específico, sin la asignación de recursos respectiva.
	Nivel 2, de Monitoreo y Control del proceso		<b>Programa detallado de producción:</b> Contiene la secuencia de operaciones necesarias para elaborar un producto en específico, junto con la asignación de recursos respectiva. Estableciendo prioridades, tiempos de ejecución, reserva de equipos y requerimientos de materias primas a corto plazo, y otros aspectos relevantes de productividad.
	Nivel 3, Ámbito de Inventario		<b>Inventario de productos terminados:</b> Contiene la recopilación de productos terminados, disponibles para su comercialización.
			<b>Requerimientos de materia prima y energía:</b> Contiene requerimientos de materia prima y energía, necesarios en la ejecución de un programa de producción.
	Nivel 4, de Logística y Planificación de negocios		<b>Desempeño de la producción:</b> Contiene la información referente a los resultados de producción, especificando los datos reales obtenidos en la ejecución del programa de producción.

**Tabla 1.1: Flujos de información del método de programación de la producción.**

## Capítulo II

# Paradigma de los Sistemas Holónicos de Manufactura (HMS)

*Este capítulo presenta una descripción de los principales paradigmas en automatización, posteriormente se realiza un análisis de las ventajas que ofrecen cada uno de estos respecto a los requerimientos del mercado actual. En la sección 2.2 se profundizan conceptos de los sistemas holónicos de manufactura (HMS), luego se describen las principales arquitecturas de referencia para los HMS, finalmente se selecciona la arquitectura que se tomará como referencia en este trabajo para desarrollar el método para la programación de la producción.*

La competitividad global y las necesidades fluctuantes de los clientes están forzando múltiples cambios en los estilos de fabricación y configuración de los sistemas de manufactura. Con el paso del tiempo, los mecanismos de planificación, programación y control tradicionales, se consideran poco flexibles para responder a estilos de fabricación cambiantes y ambientes de producción con bajos volúmenes y alta variabilidad [5]. Los esquemas convencionales de control jerárquico presentan dificultades para responder adecuadamente a cambios en el ambiente de producción, debido a que en los niveles superiores de toma de decisiones, la visibilidad de las perturbaciones es reducida y está sujeta a retardos; sin embargo, su estructura garantiza que se preserven criterios de operación óptimos de todo el sistema. Un esquema alternativo, denominado heterárquico, distribuye las funciones de control en entidades autónomas en las cuales se pierde de vista el cumplimiento del objetivo global y los criterios de optimización de todo el conjunto, aunque mejora notablemente la respuesta a las perturbaciones debido a que cada entidad tiene la capacidad de tomar rápidamente las decisiones sin consultar con entidades de orden superior [9]. Los sistemas holónicos de manufactura (HMS) combinan las características deseables de los sistemas anteriores, preservando la estabilidad del enfoque jerárquico y a la vez conservan la flexibilidad dinámica del enfoque heterárquico.

## 2.1 Paradigmas en Automatización

Durante el último siglo, múltiples paradigmas y conceptos organizacionales fueron introducidos con el objetivo de brindar mayor competitividad a las empresas de producción. Dentro de la literatura, un paradigma de manufactura puede ser definido como un marco teórico y filosófico dentro del cual se formulan teorías, principios, leyes, generalizaciones y experimentos [8]. A continuación se presentan los conceptos básicos para establecer diferencias entre los principales paradigmas aplicados en el entorno de manufactura.

### **2.1.1 Paradigma jerárquico**

Esta arquitectura se caracteriza por la existencia de múltiples niveles de control distribuidos en una estructura de árbol, que permite la distribución en la toma de decisiones entre los niveles jerárquicos. La relación entre estos niveles se basa en el concepto maestro-esclavo. Las principales ventajas de esta arquitectura son la robustez, previsibilidad y mayor eficiencia en comparación con arquitecturas centralizadas. Sin embargo, la aparición de perturbaciones en el sistema reduce significativamente su rendimiento [8]. Este paradigma es útil y robusto para procesos dentro de los cuales los productos sufren pocas o ninguna modificación durante su ciclo de vida, pero ofrecen poca adaptabilidad, flexibilidad y escalabilidad del sistema cuando son necesarios cambios dentro del proceso, bien sea a nivel de programación o de ejecución. De acuerdo a los requerimientos del entorno manufacturero se presentan como principales ventajas y desventajas del paradigma jerárquico:

#### **Ventajas**

- Robustez y confiabilidad en estado estable.
- Visión global del sistema de manufactura.
- Aplicación en la estructura organizacional de muchas industrias.

#### **Desventajas**

- Poco adaptables a las incertidumbres y variaciones del entorno.
- Poco escalables, al momento de introducir nuevas tecnologías, productos y/o funciones, así como también falta de flexibilidad, reconfiguración estructural y funcional.
- Susceptibles a errores y fallos en el sistema.
- Presentan costos elevados, dificultad en la implementación y mantenimiento.
- Complejidad en el manejo de la información y toma de decisiones en tiempo oportuno.

### **2.1.2 Paradigma heterárquico**

El paradigma prohíbe cualquier tipo de jerarquía, y entrega total autonomía a unidades básicas llamadas agentes. Los agentes son capaces de acometer acciones autónomas de forma flexible. La flexibilidad implica que estos agentes están dotados de un carácter reactivo, ya que pueden responder de forma instantánea a los cambios, y también de un carácter proactivo, dado que su comportamiento está dirigido a lograr los objetivos mediante la toma de iniciativas. Por otra parte, la autonomía reside en su capacidad de controlar y modificar su estado interno y su comportamiento, pudiendo tomar decisiones de forma unilateral. Además de su

autonomía, los agentes cuentan con habilidades sociales ya que son capaces de interactuar entre sí planteando procesos de negociación y coordinación para alcanzar los objetivos [28]. Pese a esto, en dichos procesos no se definen ninguna clase de restricciones, lo que puede desencadenar en falta de eficiencia en la ejecución de las actividades dentro del sistema de producción. No es posible alcanzar una optimización global, y el sistema puede llegar, bajo circunstancias específicas, a estados “inestables, donde la respuesta a perturbaciones conlleva a mayores disturbios en el sistema [29]. Dentro del paradigma heterárquico se pueden resaltar como principales ventajas y desventajas:

### **Ventajas**

- Reactividad y flexibilidad frente a disturbios.
- Agilidad para realizar modificaciones.
- Tolerancia a fallos.

### **Desventajas**

- Falta de previsibilidad en el comportamiento de agentes.
- Incompetencia para definir cargas óptimas de trabajo.
- Debido a la ausencia de restricciones en la autonomía de los agentes, en muchas ocasiones no se cumplen los objetivos globales del sistema.

## **2.1.3 Paradigma holárquico**

Se basa en una organización de entidades dinámicas y distribuidas llamadas holones, que son autónomas pero ven restringidas sus decisiones por los objetivos que se plantean dentro de jerarquías temporales, en las cuales se establecen reglas de cooperación para los holones con las que se busca asegurar desempeños controlables y predecibles en búsqueda de la optimización de recursos y respuesta en el tiempo que exigen las empresas de manufactura [30]. Este nuevo paradigma de control de manufactura distribuida tiene la habilidad para responder ágil y eficientemente a cambios externos, en base a ciertas capacidades heredadas del paradigma heterárquico, como la autonomía y flexibilidad. Así mismo, el paradigma holárquico mantiene la idea de que la jerarquía es necesaria para garantizar la solución de conflictos entre entidades, a la vez que mantiene la coherencia y objetividad global del sistema [8]. Se observa así, que el paradigma holárquico es una visión fundamentada en la unión de conceptos de sistemas heterárquicos y jerárquicos, extrayendo las capacidades necesarias para satisfacer las características del entorno actual de manufactura. Del paradigma holárquico se resaltan como principales ventajas y desventajas:

## Ventajas

- Autonomía restringida al cumplimiento de los objetivos globales del sistema.
- Reactividad y proactividad dentro del sistema, en base al monitoreo continuo del estado actual de las metas definidas para cada holón dentro de una holarquía.
- La capacidad de cooperación y comunicación entre holones asegura el cumplimiento de los objetivos globales del sistema.

## Desventajas

- No existe una metodología estándar para su implementación en las empresas.
- Debido a la ausencia de ejemplos reales de aplicación en la industria, así como también la resistencia al cambio de las organizaciones y las personas que están vinculadas con ellas, se torna difícil la pronta implementación de este paradigma en los sistemas de manufactura.

### 2.1.4 Selección del paradigma de automatización

Como se mencionó anteriormente, la industria está cambiando de forma progresiva en búsqueda de satisfacer las necesidades de los consumidores, integrando todos los componentes de la empresa en un sistema cuyas características le permitan adaptarse al entorno cambiante del mercado, entre otras variaciones que afectan en gran medida el proceso de producción.

El paradigma jerárquico que actualmente se aplica en muchas industrias, no satisface en gran medida los requerimientos exigidos para tener una alta competitividad, por ende nuevos enfoques se han desarrollado bajo el nombre de sistemas flexibles (FMS) y sistemas inteligentes de manufactura (IMS) en búsqueda de desarrollar nuevos esquemas que se adapten a las características del sector manufacturero. Estudios en FMS indican que la estructura jerárquica impone limitaciones en la reconfiguración, fiabilidad, y escalabilidad debido a la estrecha conexión entre los módulos de decisión en la jerarquía. Además, la complejidad de estos sistemas aumenta conforme su tamaño [3]. De esta forma, los paradigmas emergentes, heterárquico y holárquico, constituyen la solución más óptima frente a las tendencias y requerimientos del mercado, las cuales, los sistemas jerárquicos no están en la capacidad de soportar en términos de productividad. Es así, como se centran los esfuerzos en establecer un paralelo entre los sistemas holónicos de manufactura (HMS) y los sistemas multi-agentes (MAS), principales exponentes de estos paradigmas emergentes.

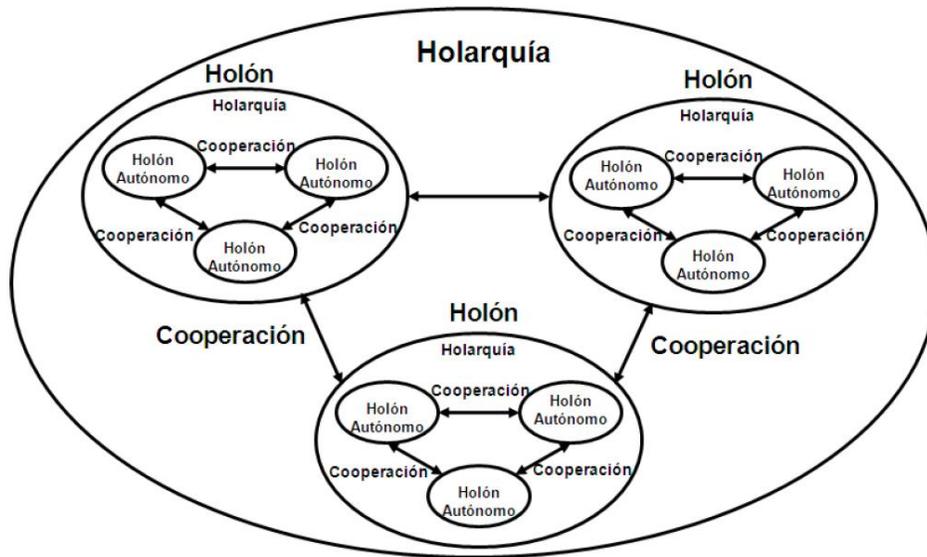
Aunque existen similitudes entre estos dos sistemas, se identifican aspectos claves que los diferencian, los cuales serán resaltados y evaluados con el fin de analizar el mejor enfoque para abordar la programación de la producción. En el **Anexo B** se

resumen las diferencias que para el caso de estudio toman gran relevancia, y se expone explícitamente las ventajas que tienen los sistemas holónicos de manufactura (HMS) frente a los sistemas multi-agentes, dentro del contexto de los requerimientos actuales de los sistemas de manufactura. Propiedades como la autonomía limitada bajo un sentido de cooperación, la noción de auto-similaridad, la inclusión de un componente físico, los tiempos de procesamiento condicionados, entre otros, hacen del paradigma holárquico el enfoque apropiado para abordar la función de programación de la producción. Se concluye así con la selección del enfoque holónico como base conceptual para el desarrollo del presente trabajo, sin descartar nociones de los otros paradigmas, que pueden aportar en cierta medida a resolver el problema del caso de estudio.

## 2.2 Sistemas holónicos de manufactura (HMS)

El término “holónico” es derivado de la palabra “holón”, la cual fue introducida por Koestler en 1967. La palabra holón es una combinación del griego *holos*, el cual significa todo, y el sufijo *-on*, el cual sugiere una partícula o parte. Koestler señala también que los holones son unidades autónomas y autosuficientes, los cuales tienen cierto grado de independencia y manejan imprevistos, sujetos a un control de autoridades superiores. La primera propiedad asegura la estabilidad en los holones, frente a los disturbios del entorno. La segunda, asegura un correcto funcionamiento del sistema global [10]. Una holarquía es definida como un conjunto de holones organizados en una estructura jerárquica, los cuales cooperan para alcanzar los objetivos del sistema, al combinar sus conocimientos y habilidades, como se ilustra en la Figura 2.1. Un holón puede pertenecer a múltiples holarquías al mismo tiempo, lo cual representa una diferencia significativa frente a los conceptos tradicionales de jerarquía. Los holones pueden integrarse a una holarquía, y al mismo tiempo, preservar su autonomía y singularidad [8].

Los sistemas holónicos de manufactura (HMS) se originan dentro del marco de investigación de los sistemas inteligentes de manufactura (IMS), los HMS son un paradigma que lleva los conceptos holónicos definidos por Koestler al ámbito de manufactura. Un holón puede representar una entidad física o lógica, tal como un robot, una máquina, una orden de producción, un sistema de manufactura flexible, o un operador humano. El holón tiene información acerca de su propio estado y del ambiente, está constituido de una parte de procesamiento de información y una parte de procesamiento físico [8]. Dentro de los HMS se conforman jerarquías temporales para lograr metas específicas, en estas se definen reglas de cooperación entre los holones que restringen sus decisiones autónomas para asegurar desempeños controlables y predecibles en búsqueda de la optimización de recursos y respuesta en el tiempo que exigen las empresas de manufactura [30]. Una vez se cumple la meta establecida para la holarquía esta se descompone para dar paso al establecimiento de nuevas jerarquías.



**Figura 2.1: Noción Holón-Holarquía.**

Fuente: Propuesta para la planificación, programación, supervisión y control de la producción en procesos continuos desde la teoría del control supervisorio y el enfoque holónico, German Zapata.

Según el *HMS Consortium* los principales atributos de los sistemas holónicos de manufactura son:

- **Autonomía:** La capacidad de una entidad para crear y controlar la ejecución de sus propios planes y/o estrategias.
- **Cooperación:** Proceso por el cual los holones desarrollan planes mutuamente aceptados, tras un proceso de acuerdo de misiones.
- **Proactividad:** Capacidad de anticiparse a cambios en sus planes y objetivos.
- **Reactividad:** Capacidad de reaccionar a estímulos del entorno.

Además de estos atributos, otras características presentes en los sistemas holónicos de manufactura, que son fundamentales para su adaptación a los requerimientos del mercado actual, son:

- **Recursividad y auto-similaridad:** Un HMS es por definición recursivo, debido a que un conjunto de holones conforman una holarquía, pero a su vez dicha holarquía hace parte de una holarquía mayor, estableciendo jerarquías temporales entre los sub-sistemas. La auto-similaridad como característica de los sistemas holónicos, es

en parte la responsable de reducir la complejidad de los sistemas, esto implica tener entes homogéneos, que tengan interfaces y comportamientos similares, aunque los holones tengan diferentes funciones [31].

- **Escalabilidad y reorganización:** Un HMS se ajusta ante la incorporación de nuevos holones, la eliminación de holones, o la modificación de las capacidades funcionales de los holones existentes [9].

## 2.3 Arquitecturas de referencia para los sistemas holónicos de manufactura (HMS)

Una *arquitectura de referencia* es una abstracción de una solución genérica, que provee un conjunto de modelos, principios de diseño e ingeniería, y eventualmente herramientas y una metodología aplicada a un dominio en específico. Su objetivo es estructurar el diseño de un sistema específico mediante la definición de una terminología común, una estructura genérica, las clases de componentes del sistema, sus responsabilidades, dependencias, interfaces, información, comportamiento, restricciones, reglas de diseño y modelos para representar todos estos aspectos [10].

Las principales arquitecturas de referencia para sistemas holónicos de manufactura se describen a continuación:

### 2.3.1 PROSA (Product-Resource-Order-Staff Architecture)

La estructura de la arquitectura PROSA está construida alrededor de 3 tipos básicos de holones: holón orden, holón producto y holón recurso. Cada uno de ellos es responsable por un aspecto de control de manufactura, referente a logística, planeación tecnológica, o capacidad de recursos. El holón Staff ayuda a los holones básicos con la visión global del sistema y puede entregar planes óptimos para situaciones especiales de manufactura. Los 3 holones básicos de PROSA definidos en [16] son:

- **Holón Recurso (HR):** Se compone de un parte física, referente a un recurso de producción del sistema manufactura, y una parte de procesamiento de información, la cual controla dicho recurso. Contiene los métodos para asignar los recursos de producción y los procedimientos para organizar, usar y controlar dichos recursos. Un HR es una abstracción de un elemento de producción tal como una fábrica, taller, maquinas, hornos, bandas transportadoras, materias primas, herramientas, almacén, personal, etc.

- **Holón Producto (HP):** Contiene la información necesaria del producto y del proceso para asegurar la correcta elaboración de un producto de calidad. Los HP contienen información actualizada del ciclo de vida del producto, requerimientos de usuario, diseño, planes de proceso, lista de materiales, procedimientos estándares de calidad, etc.
- **Holón Orden (HO):** Representa una tarea dentro del sistema de manufactura. Es responsable de la correcta ejecución de una tarea asignada dentro de un tiempo predefinido.

### 2.3.2 ADACOR (Adaptive Holonic Control Architecture for Distributed Manufacturing Systems)

La arquitectura ADACOR está compuesta por los holones: Holón Operacional (HO), Holón Tarea (HT), Holón Producto (HP) y Holón Supervisor (HS), los cuales se definen en [8], así:

- **Holón Producto (HP):** Contiene todo el conocimiento relacionado con el producto y es responsable del proceso de planificación a corto plazo, para ello tiene la información sobre la estructura del producto y el plan de procesos necesarios en su fabricación.
- **Holón Tarea (HT):** Es responsable del control y supervisión de la ejecución de la orden de producción, así como también de la asignación de recursos.
- **Holón Operacional (HO):** Representa los recursos físicos disponibles en piso de planta, tales como operadores, robots y máquinas de control numérico, gestionando su comportamiento de acuerdo a las habilidades y objetivos de los recursos.
- **Holón Supervisor (HS):** Introduce coordinación y optimización global en enfoques de control descentralizado, es responsable por la formación de grupos y su coordinación.

### 2.3.3 UPH (Unidad de Producción Holónica)

El concepto de UPH se fundamenta en el modelo de Unidad de Producción (UP). En este modelo, la UP se concibe como un conjunto de unidades elementales o recursos que son organizados y configurados de tal manera que permitan realizar los procesos de transformación en la cadena de valor, con el objetivo de obtener los productos exigidos. De esta forma, un proceso productivo puede ser visto como la agregación de unidades de producción cooperantes. Si la UP y sus componentes se dotan de las características holónicas, se tiene una Unidad de Producción Holónica. La UPH toma sus propias decisiones respecto al cumplimiento de su objetivo, pero

está obligada a informar su estado en relación al cumplimiento de una meta, o si ésta no se puede cumplir debido a una falla o errores en su comportamiento [9]. En la Figura 2.2 se observa la relación entre los componentes básicos de la unidad de producción holónica, los cuales se describen en [9]:

- **Holón Recurso (HR):** Es el componente principal de la UPH, representa un recurso de producción, asociado a un equipo en específico. Está provisto de un sistema de toma de decisiones que le permite cooperar con otros y negociar sus metas a partir de su estado, competencias, capacidad y disponibilidad. También le permite supervisar su comportamiento y ajustarlo para responder a las perturbaciones. La agregación de holones recurso forma la unidad de producción, que dentro de la concepción holónica está definida como una holarquía.
- **Misión:** Representa la secuencia de operaciones programadas, asociadas a la elaboración de un producto durante un periodo de tiempo, las cuales han sido negociadas y aceptadas por la unidad. Se encarga de la negociación de metas y su seguimiento.
- **Ingeniería:** Representa el conocimiento del holón para desarrollar los productos. Contiene los métodos de producción que indican cómo se obtiene un producto y los recursos requeridos.



**Figura 2.2: Relaciones entre componentes básicos de la UPH.**

Fuente: Adaptación de Propuesta para la planificación, programación, supervisión y control de la producción en procesos continuos desde la teoría del control supervisorio y el enfoque holónico, German Zapata.

## 2.4 Selección de la arquitectura holónica

En el presente trabajo se toma como referencia la arquitectura de la UPH para abordar la función de programación de la producción, se consideran como aspectos principales para la elección de la UPH:

- La arquitectura de la UPH se enfoca en el Holón Recurso (HR) como componente principal para el desarrollo de sus actividades, el énfasis en los recursos conlleva a una mejor gestión de los mismos, permitiendo efectuar una asignación de forma eficiente dentro del programa de producción, se tiene también un monitoreo constante del estado del recurso, en términos de disponibilidad, capacidad, y cumplimiento de tareas asignadas. El HR, como eslabón principal en la formación de holarquías, representa una gran ventaja en términos de escalabilidad y reconfiguración dentro del sistema de manufactura, lo que favorece el desarrollo de la programación de la producción de forma ágil y flexible.
- La UPH se basa en el concepto de unidad de producción dentro de un sistema de manufactura, este fundamento facilita los procesos de modelado y desarrollo de HMS en casos prácticos, puesto que se encuentra una estrecha relación entre las entidades físicas de una empresa de producción con los componentes básicos de la UPH.
- El vector de estados, es una noción establecida dentro de la arquitectura UPH, la cual se refiere a la agrupación de los estados parciales relacionados con el comportamiento de los elementos que conforman una holarquía. En base al constante monitoreo del estado de los recursos y las misiones asignadas a cada uno de estos, se tiene un sistema reactivo y proactivo ante situaciones que afectan el normal desarrollo del programa de producción.
- Se resalta también como fundamento para la elección de la UPH, el hecho de que en el entorno académico cercano, grupos de investigación en el área han desarrollado múltiples trabajos basados en dicha arquitectura, obteniendo resultados favorables a nivel de investigación. Este trabajo se presenta como un aporte y una continuación en los HMS y en la arquitectura UPH dentro de dicha investigación.

## Capítulo III

# Método para la Programación de la Producción desde los Sistemas Holónicos de Manufactura (HMS)

*Este capítulo representa el principal fundamento del método propuesto en el presente trabajo, para ello se busca unificar los conceptos holónicos con las especificaciones de la función de programación de la producción concluidas en el análisis funcional del primer capítulo, como primera medida se trasladan las tareas y flujos de información definidos en la sección 1.5 al ámbito holónico. Posteriormente se desarrolla la función de programación de la producción desde la perspectiva holónica, para ello se desarrolla el modelado estructural y se define el flujo de trabajo de las actividades y sub-actividades involucradas en el método. Se hace uso también de un proceso productivo ejemplo y de técnicas de modelado como IDEF0, y los diagramas de clases y de secuencia UML.*

En el primer capítulo del presente trabajo se concluye con la definición de tareas, interfaces y flujos de información para el método de programación de la producción en base estándares en automatización e información encontrada en la literatura en general, en el segundo capítulo se introducen los conceptos básicos respecto a los sistemas holónicos de manufactura (HMS), así como también se enfatiza en la arquitectura UPH, en este capítulo se busca unificar los conceptos holónicos con las especificaciones del método para la programación de la producción concluidas en el análisis funcional del primer capítulo. Al mismo tiempo que se desarrolla la programación de la producción bajo la arquitectura UPH, se realiza el modelado estructural, el cual permite visualizar las relaciones e interacción entre los componentes de dicho sistema. Se concluye así, con las actividades y tareas que el método desarrolla para cumplir con la función de programación de la producción desde el enfoque holónico, así como también el flujo de información e interfaces que las soportan.

### 3.1 Tareas de la programación de la producción desde la perspectiva holónica

En la sección 1.5 se definen 6 tareas básicas que aplican para el método de programación de la producción, a continuación se trasladan dichas tareas al ámbito holónico.

- **Creación y gestión del programa detallado de producción:** El objetivo principal del método es establecer programas factibles, los cuales en términos holónicos se traducen en la definición de misiones para holarquías y holones por individual, para ser más específico, una etapa dentro de un programa detallado de producción está

relacionada directamente con una misión asignada a un holón recurso, al igual que una secuencia de etapas se relacionan con la misión de una holarquía. El programa detallado de producción se establece en base a la capacidad y disponibilidad de recursos, dicha información se encuentra almacenada en el *vector de estados* asociado a cada holón recurso (posteriormente se profundiza en dicho aspecto), el programa también se fundamenta en reglas de producción, y otros criterios como costos y plazos de entrega, la primera información respecto a reglas de producción y costos, se gestiona dentro del componente ingeniería. Un programa detallado de producción se compone de una secuencia de operaciones establecidas en el tiempo, el accionar de una holarquía se orienta al cumplimiento de dicho programa, mediante la asignación de tareas en específico a los holones que la componen.

- **Estado y asignación de recursos:** El holón recurso representa un equipo en específico, cada HR gestiona la información referente a la capacidad y disponibilidad actual de tal equipo. Esta información es consultada por el componente misión con el objetivo de efectuar la asignación de recursos de forma eficiente, este componente también realiza reserva y liberación de equipos cuando se necesite.
- **Monitoreo del programa detallado de producción:** La UPH se orienta al cumplimiento de objetivos, un programa detallado de producción representa el objetivo o la misión para una holarquía, así como una etapa dentro de dicho programa representa la misión para un holón, el seguimiento del programa se lleva a cabo de forma local por cada HR para cada misión en específico que se le ha asignado, verificando continuamente su respectivo estado y avance.
- **Manejo de eventos no anticipados y reprogramación:** Esta tarea se ejecuta conjuntamente entre el holón recurso, y los componentes misión de la holarquía y la UPH, la ocurrencia de fallas se ve reflejada en el incumplimiento de una misión definida para un holón u holarquía, el componente misión está en la capacidad de identificar dicha situación y su causa, con el fin de efectuar un proceso de reconfiguración para asegurar el cumplimiento de las órdenes de producción. En base a la noción de holarquías como jerarquías temporales, la reconfiguración dentro de los HMS se efectúa de forma ágil y eficiente. Por su propiedad de cooperación, los holones están en la capacidad de contribuir al cumplimiento de una misión dentro de otra holarquía. Con gran facilidad los holones dentro una UPH se reagrupan, formando nuevas holarquías que se estructuran de tal manera, que las fallas en el sistema se solucionan.
- **Establecer los flujos de información necesarios con los ámbitos de mantenimiento, calidad e inventario:** El componente ingeniería administra la información referente a mantenimiento de equipos, con el fin de que el componente misión efectúe eficientemente la asignación de recursos, el holón recurso está en la

capacidad de identificar solicitudes de mantenimiento asociado a fallas en un equipo. La información referente a atributos de calidad para un producto es administrada por el componente ingeniería, por su parte el holón recurso debe cumplir con dichas especificaciones al momento de efectuar una tarea. Después de ejecutar el programa detallado de producción, el componente misión de la UPH notifica a inventario el volumen de productos terminados, por su parte el componente ingeniería identifica requerimientos de materia prima y energía para la ejecución del programa de producción, información que es suministrada al ámbito de inventario. Por último, la interfaz con el nivel 4, de logística y planificación de negocios, se establece a través del procesamiento de órdenes de producción ejecutado por el componente misión de la UPH.

- **Generación de reportes de producción:** Posterior a la ejecución de un programa detallado de producción, el componente misión de la UPH entrega los reportes correspondientes al desempeño de la producción, en base al cumplimiento de los objetivos definidos para cada holarquía y holón en específico.

### 3.2 Flujos de información para la programación de la producción desde la perspectiva holónica

Al igual que en la sección anterior, a continuación se exponen en la Tabla 3.1 los flujos de información puntualizados en la sección 1.5 para el método de programación de la producción, desde la perspectiva de los sistemas holónicos de manufactura (enfaticando en el manejo que se le da a cada flujo por parte de un componente en específico dentro de la UPH, por ejemplo, para el primer caso el componente misión procesa una orden de producción, el procesamiento comprende recibir, evaluar y confirmar dicha orden, el holón recurso cumple dicha orden, mientras que el componente ingeniería no interactúa directamente con este flujo de información).

Flujo de Información	Componentes Unidad de Producción Holónica (UPH)		
	Misión	Ingeniería	Holón Recurso
Orden de producción	Procesa: Recibe Evalúa Confirma	X	Cumple
Capacidad de la producción	Notifica	X	Notifica

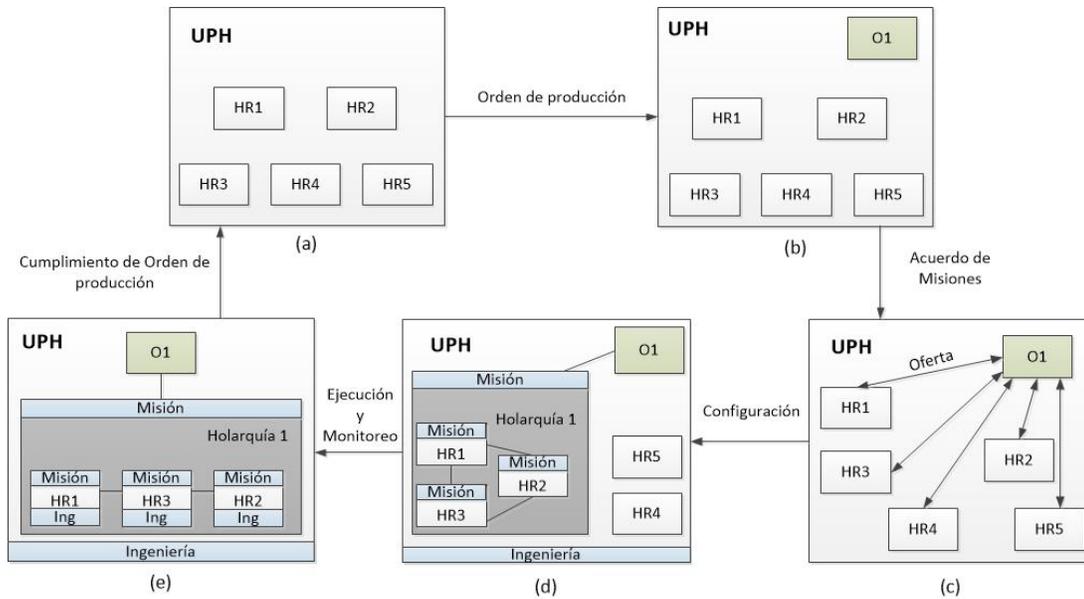
Regla de producción	Consulta	Administra: Recibe Utiliza	Sigue
Objetivos de costos de producción	X	Notifica	Consulta
Estado de los recursos	Consulta	X	Notifica
Especificaciones de calidad	X	Recibe	Cumple
Programa de mantenimiento	Consulta	Recibe	x
Solicitud de Mantenimiento	Reporta	x	Identifica
Programa de producción	Recibe	Establece	Consulta
Programa detallado de Producción	Administra: Establece Descompone en misiones Notifica	x	Sigue
Inventario de productos terminados	Notifica	x	x
Requerimientos de materia prima y energía	Reporta	Identifica	x
Desempeño de la producción	Reporta	X	x

**Tabla 3.1: Flujos de información de la programación de la producción desde la perspectiva holónica.**

### 3.3 Desarrollo de la función de programación de la producción desde la perspectiva holónica

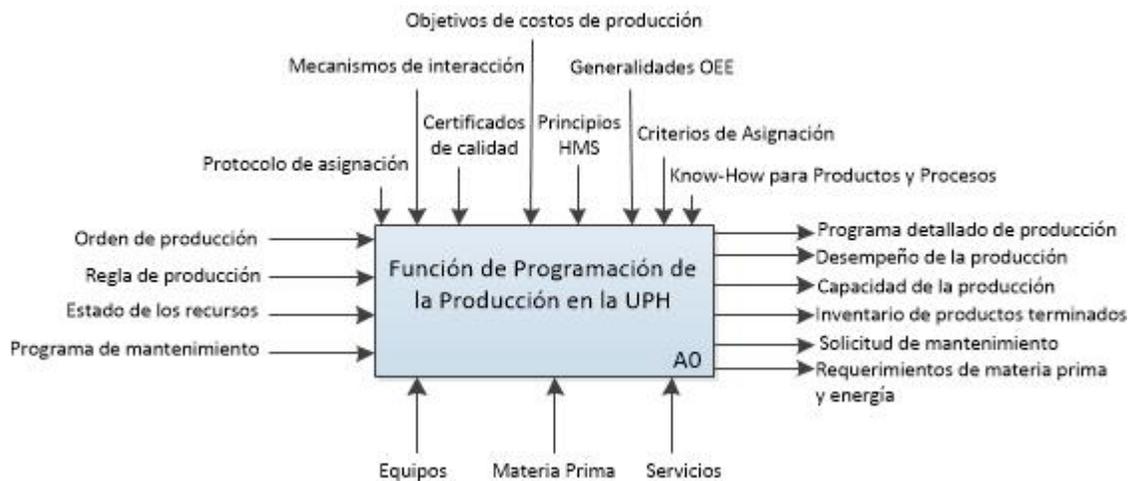
Desde el enfoque holónico, el método de programación de la producción tiene la función de asignar las misiones a las holarquías y holones, mediante procesos de optimización que se basan en las capacidades y disponibilidades de recursos [9]. Como primera etapa en el proceso de desarrollo de la programación de la producción desde el enfoque holónico, se establece un flujo de trabajo básico para el método propuesto en el presente trabajo. En la Figura 3.1 se expone dicho flujo, en el cual se puede apreciar las actividades básicas en la programación de la producción, asociadas a la interacción entre los componentes de la UPH, en la Figura 3.1(a) se tiene una unidad de producción holónica, compuesta de múltiples holones recursos (HR) sin organización alguna. La recepción de una orden de producción (O1) (Figura 3.1b), representa el flujo de información que activa el comportamiento de la UPH, iniciando un proceso de acuerdo de misión con los HR, en la Figura 3.1(c) se representa dicho proceso, en el cual los holones recurso disponibles presentan sus respectivas ofertas con el fin de satisfacer las demandas asociadas a dicha orden de producción. Cuando se concluye la etapa de acuerdo de misiones, se procede a desarrollar la configuración de holarquías, definir su respectiva misión, así como la distribución y definición de misiones locales de holones dentro de dicha holarquía (Figura 3.1d). Continuando con el flujo de trabajo, se procede a ejecutar los procesos designados dentro de cada una de las misiones locales y globales, paralelo a su ejecución, se monitorea el avance de dichas misiones con el fin de asegurar el cumplimiento de la orden de producción (Figura 3.1e). Finalmente al cumplir con éxito la misión designada para la holarquía, esta se disuelve, volviendo al escenario inicial del flujo de trabajo.

Con el fin de profundizar en el intercambio de información y la interacción entre las actividades del flujo de trabajo definido previamente, se aplica la técnica de modelado IDEF0 (en el **Anexo C** - Sección 1, se profundizan conceptos de esta técnica), la cual permite visualizar con mayor detalle la estructura del método de programación de la producción holónico. En la Figura 3.2 se expone el modelo IDEF0 global para la función de programación de la producción, y en la Figura 3.3 se desagrega dicho modelo en sub-actividades, las cuales se toman como base en el desarrollo de la presente sección.



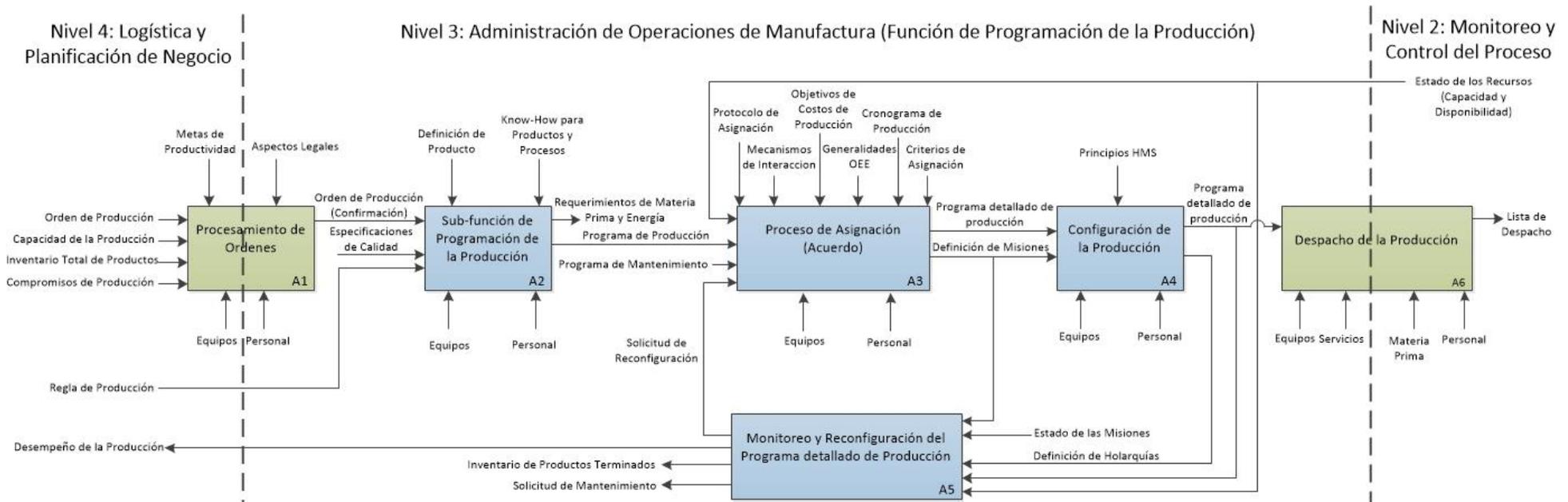
**Figura 3.1: Flujo de trabajo básico en la programación de la producción desde la perspectiva holónica.**

Fuente: Adaptación de Anemona, Una metodología Multi-Agente para Sistemas Holónicos de Fabricación, Adriana Giret.



**Figura 3.2: Diagrama IDEF0 (A-0) para la función de programación de la producción desde el enfoque holónico.**

Fuente propia.



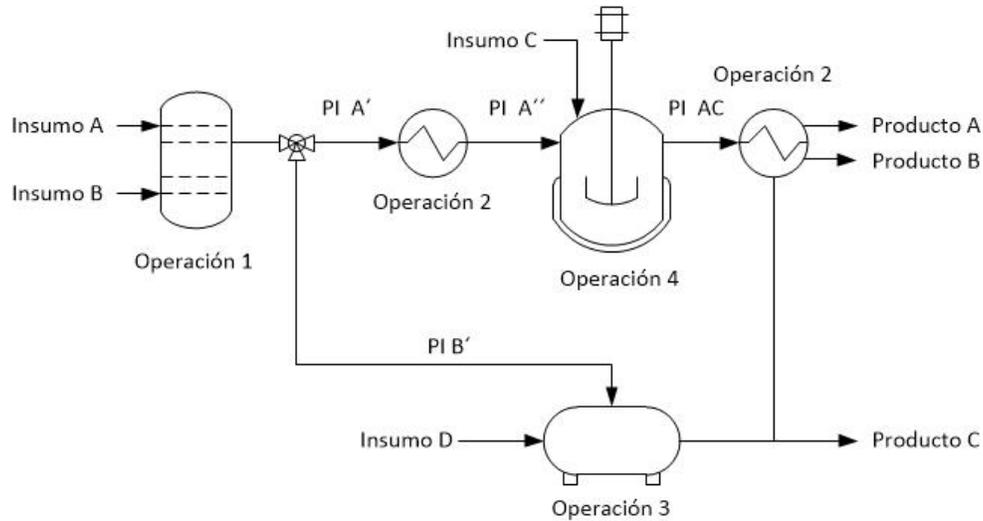
**Figura 3.3: Diagrama IDEF0 (A0) para la función de programación de la producción desde el enfoque holónico.**  
Fuente propia.

El diagrama A-0 de la Figura 3.2 representa la mayor abstracción que se tiene de la función de programación de la producción, en dicho esquema se definen los principales flujos de información de entrada y salida del sistema, los recursos utilizados para el desarrollo de esta función, así como también ciertos elementos de control o regulación para esta actividad. Este modelo se basa en los flujos de información definidos para el método de programación de la producción de la sección 1.5, al tiempo que se introducen conceptos holónicos. En la Figura 3.3 se modelan las sub-actividades que componen la función global de programación de la producción (A0). En este modelo se especifican los flujos internos de información necesarios para el desarrollo de dicha función, en un entorno de fabricación holónico (UPH). En el modelo se observa, además de las actividades involucradas en la programación de la producción, la interfaz con el nivel 4, de logística y planificación de negocios, mediante la actividad *Procesamiento de órdenes*, y la interfaz con nivel 2 a través de la actividad de *Despacho de la Producción*. En el modelo se identifican 4 actividades principales asociadas al método para la programación de la producción desde el enfoque de los sistemas holónicos de manufactura (HMS): ***Sub-función de Programación de la Producción; Proceso de Asignación (acuerdo); Configuración de la Producción; Monitoreo y Reconfiguración del Programa detallado de Producción***, en las secciones posteriores se profundiza en el modelo y el flujo de trabajo que desarrolla cada una de estas actividades.

Para explicar de forma práctica las 4 actividades mencionadas anteriormente, se propone el siguiente ejemplo de un proceso productivo genérico: En la Figura 3.4 se observa el diagrama de flujo de dicho proceso, del cual se pueden obtener tres tipos de productos finales (A, B, C), a partir de una serie de secuencias, compuestas de 4 tipos de operaciones, las cuales se pueden llevar a cabo en 6 recursos diferentes (como se define en la Tabla 3.2), el proceso productivo consume además en su desarrollo 4 tipos de insumos o materias primas (A, B, C, D), y se elaboran una serie de productos intermedios (etiquetados como PI A', PI A'', PI B', PI AC).

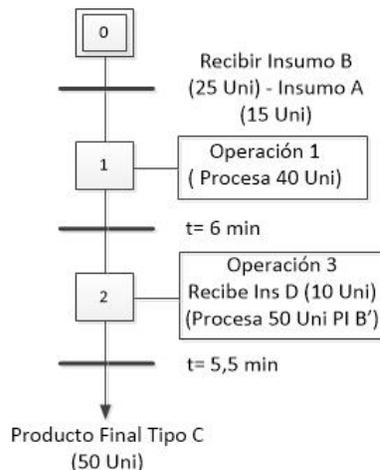
<b>Recursos</b>	<b>Competencias</b>	<b>Capacidad Máxima</b>
R1 (HR1)	Operación 1	60 Unidades/min
R2 (HR2)	Operación 2	55 Unidades/min
R3 (HR3)	Operaciones 2,3	75 Unidades/min
R4 (HR4)	Operaciones 1,4	70 Unidades/min
R5 (HR5)	Operaciones 1,2	20 Unidades/min
R6 (HR6)	Operaciones 1,3	35 Unidades/min

**Tabla 3.2: Relación operaciones-recursos para el proceso productivo ejemplo.**

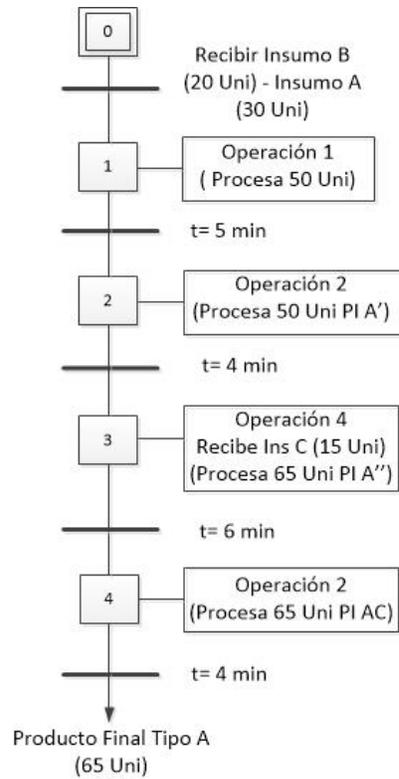


**Figura 3.4: Diagrama de flujo del proceso productivo ejemplo.**  
Fuente propia.

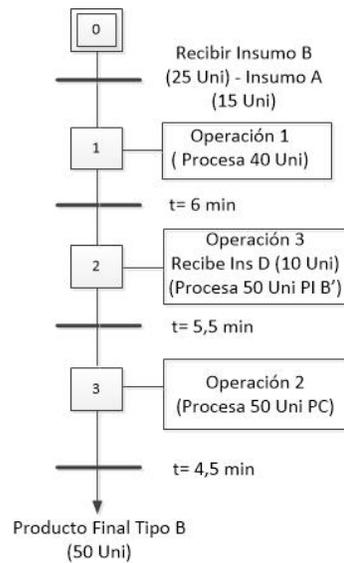
La elaboración de los productos tipo A, B y C se lleva a cabo mediante una secuencia de operaciones en específico, según lo planteado en el capítulo uno, esta información está contenida en la regla de producción, en el proceso productivo ejemplo existen tres reglas de producción de acuerdo a los tres tipos de producto. Para el caso, estas reglas de producción son definidas de forma gráfica mediante Grafcet, el cual es un método de modelado que representa la sucesión de fases o estados en un proceso. Estas fases son llamadas etapas (representadas por un cuadro con un número que las identifica), tienen asociadas unas acciones (representadas por rectángulo) que se ejecutan cuando la correspondiente etapa está activa. Entre dos etapas hay una transición (representada por una línea), estas indican la posibilidad de evolución entre etapas. Así, en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se expone las reglas de producción para los productos tipo C, A y B respectivamente:



**Figura 3.5: Regla de producción producto tipo C.**  
Fuente propia.



**Figura 3.6: Regla de producción producto tipo A.**  
Fuente propia.



**Figura 3.7: Regla de producción producto tipo B.**  
Fuente propia.

### 3.3.1 Sub-función de programación de la producción

La *sub-función de programación de la producción* (A2) es la primera actividad que se identifica en el modelo IDEF0 del método de programación de la producción de la Figura 3.3, el objetivo principal de esta actividad es la elaboración del **programa de producción** para la UPH a partir de la recepción de una orden de producción entregada por el nivel 4. Es así como el flujo de trabajo de esta actividad comienza con la llegada de una *orden de producción* (previamente confirmada y la cual es procesada en el componente misión de la UPH), este flujo de información se lleva a cabo entre la actividad *Procesamiento de órdenes* (A1), la cual se encuentra en la frontera entre el nivel 4, de logística y planificación de negocios y el nivel 3, de administración de operaciones de manufactura, y la actividad Sub-función de programación de la producción. En base a la *capacidad de la producción, inventario total de productos y compromisos de producción*, la actividad A1 está en la capacidad de aceptar o rechazar el pedido de un cliente, con el objetivo de confirmar la realización de una orden de producción. Para el caso del proceso productivo ejemplo, un esquema de una *orden de producción (confirmación)* se observa en la Tabla 3.3, en la cual se detalla el código, el tipo de producto y la cantidad a elaborar, así como la fecha de recepción y de entrega de la orden de producción, información necesaria para la ejecución de la actividad A2.

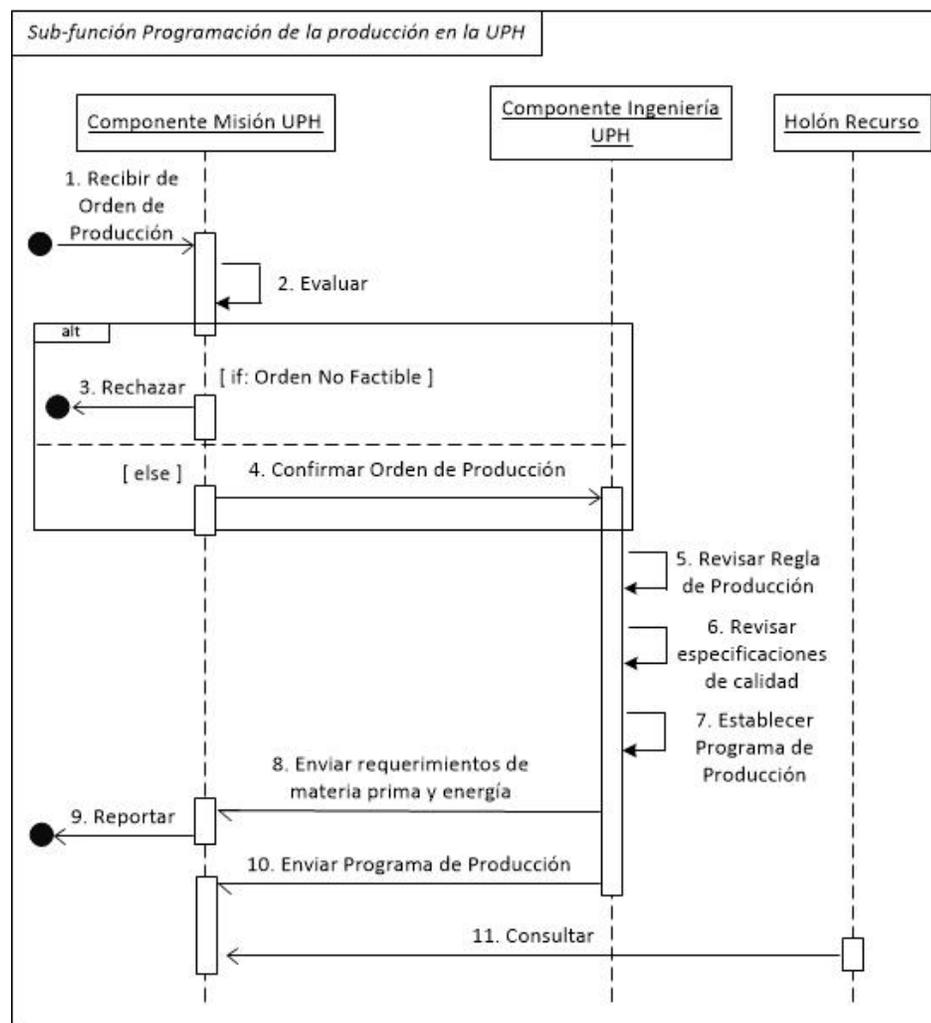
Además de la información anterior, la actividad A2 recibe del nivel 4 la *regla de producción* (el componente ingeniería de la UPH administra dicha regla) asociada a cada tipo de producto (para el proceso productivo ejemplo, en las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se exponen la reglas de producción para 3 tipos de producto específicos), es allí donde se almacena la información respectiva a la secuencia de operaciones necesarias para elaborar un tipo de producto en específico, junto con datos de tiempos de procesamiento y requerimientos de materia prima.

	<b>Código</b>	<b>Tipo de Producto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Prioridad</b>	<b>Fecha de Recepción</b>	<b>Fecha de Entrega</b>
<b>Orden de Producción 1</b>	O1	PA	65 Uni.	Alta	1/10/2014 7:45 am	1/10/2014 5:00 pm
<b>Orden de Producción 2</b>	O2	PB	50 Uni.	Media	1/10/2014 7:50 am	1/10/2014 5:00 pm
<b>Orden de Producción 3</b>	O3	PC	50 Uni.	Media	1/10/2014 7:55 am	1/10/2014 5:00 pm

**Tabla 3.3: Esquema Orden de Producción.**

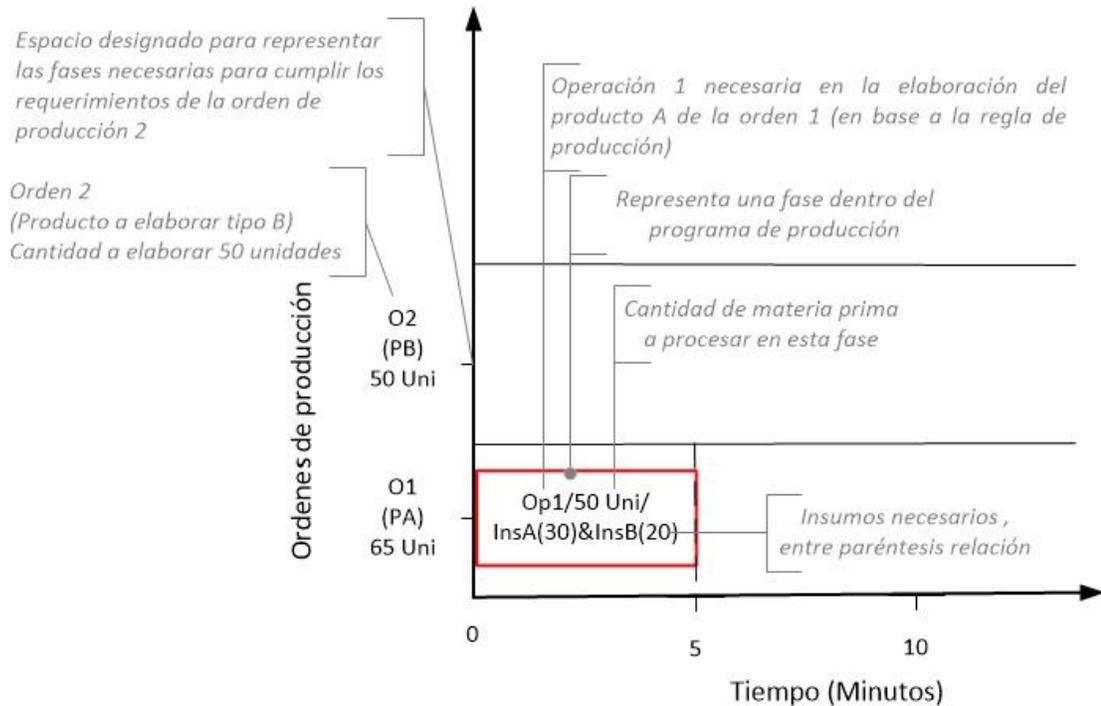
Para lograr un *programa de producción* factible y eficiente, la actividad A2 utiliza, además de la información definida anteriormente, aspectos relacionados con *especificaciones de calidad* (el componente ingeniería administra la información relacionada a calidad dentro de la UPH) y definición de procedimientos estándar en el desarrollo de procesos y fabricación de productos (*Know-How*). Además de la elaboración del *programa de producción*, en la actividad A2 se define los *requerimientos de materia prima y energía* (identificados por el componente ingeniería y reportados a inventario por el componente misión de la UPH), necesarios para el cumplimiento de las órdenes de producción recibidas.

Para mostrar la interacción entre los componentes de la UPH mientras se desarrolla la *sub-función de programación de la producción*, se aplica la técnica de modelado de UML, diagrama de secuencia (en el **Anexo C** - Sección 2.2, se profundizan conceptos de esta técnica). En la Figura 3.8 se expone dicho modelo.



**Figura 3.8: Diagrama de secuencia sub-función programación de la producción.**  
Fuente propia.

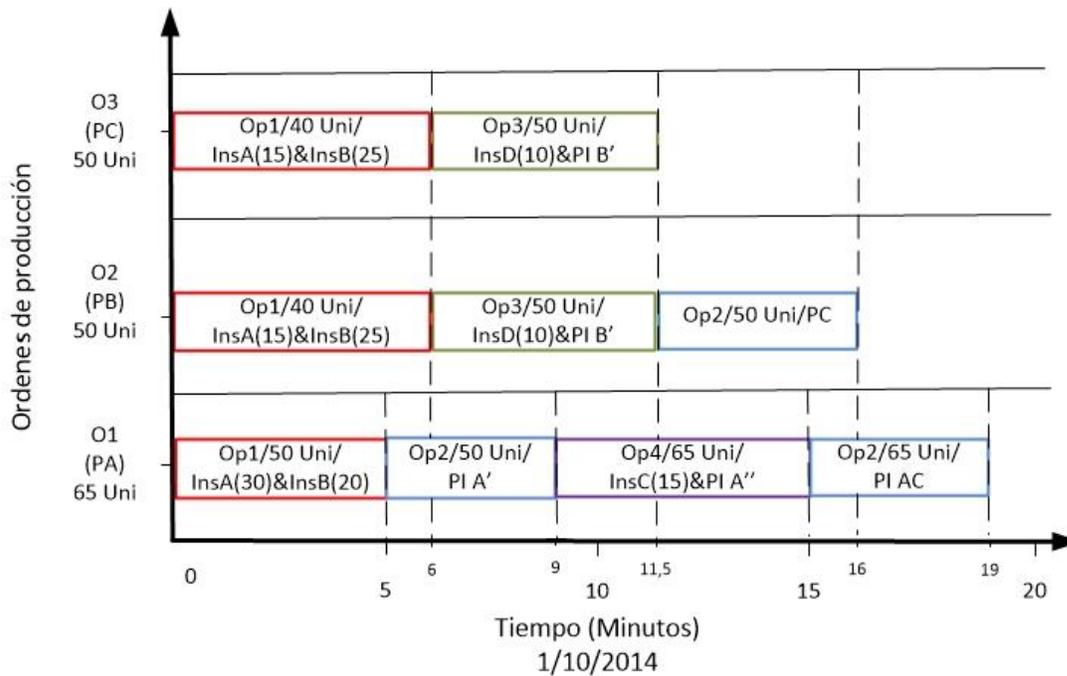
Por último, un esquema de un *programa de producción* elaborado por la actividad A2 para el proceso productivo ejemplo (en la UPH, el componente ingeniería es el responsable principal en la elaboración de dicho programa), y entregado a la actividad posterior A3, *asignación de recursos*, se expone en la Figura 3.10. Para facilitar la comprensión de dicho esquema se expone en la Figura 3.9 su respectiva explicación.



**Figura 3.9: Explicación esquema de programa de producción.**

Fuente propia.

El programa de producción de la UPH contiene la secuencia de operaciones necesarias para la elaboración de las 3 órdenes de producción, dichas operaciones están distribuidas en el tiempo en un diagrama de Gantt, y poseen información adicional referente a cantidad de materia prima a procesar e insumos requeridos (cabe resaltar que el método propuesto en el presente trabajo, está en la capacidad de identificar requerimientos de materia prima, pero no participa directamente en la administración de insumos en el sistema de manufactura). Este programa de producción es la base para el desarrollo del proceso de asignación de misiones para holones y formaciones de holarquías, llevado a cabo en las siguientes actividades.



**Figura 3.10: Esquema de programa de producción de la UPH.**

Fuente propia.

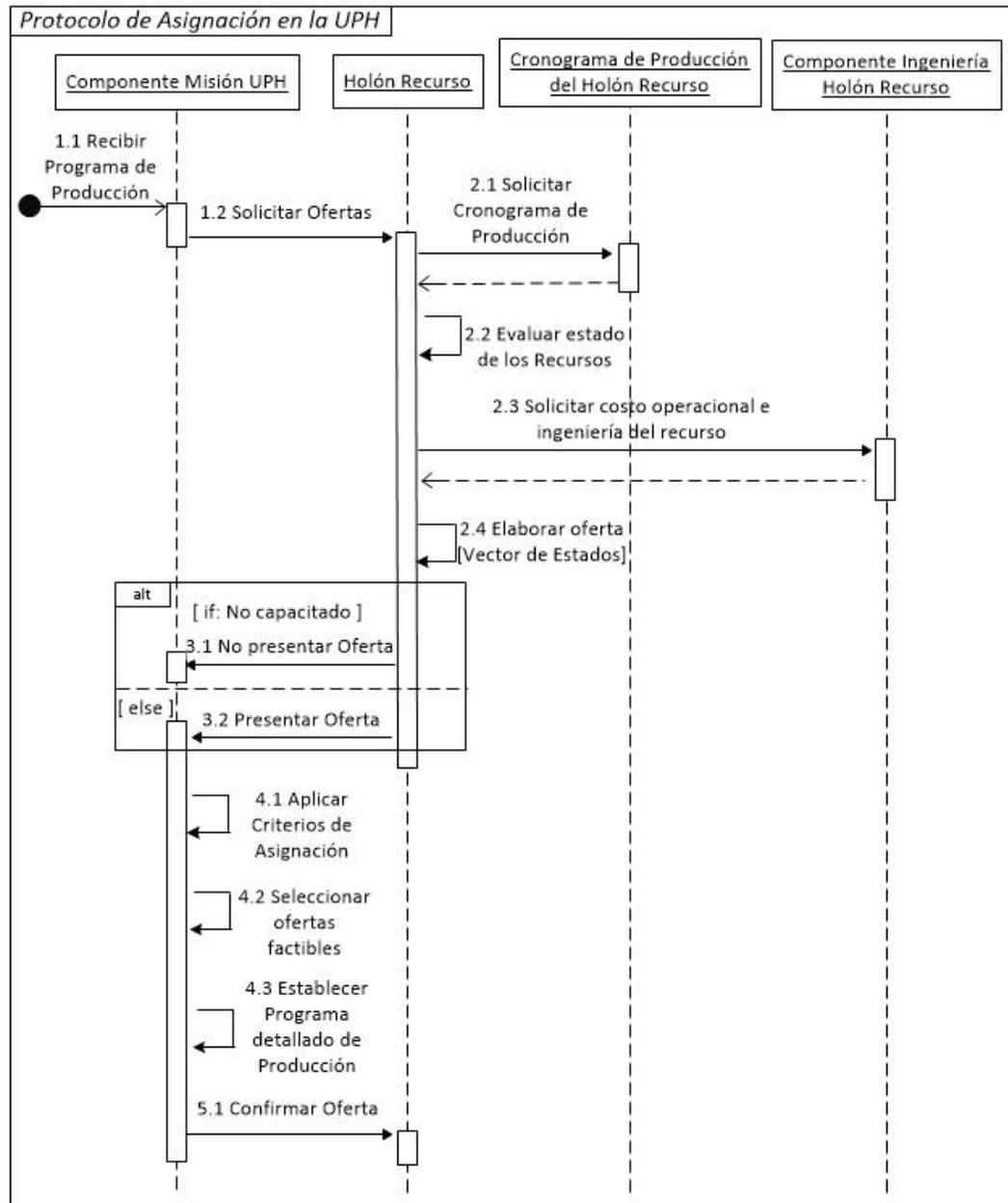
### 3.3.2 Proceso de Asignación (Acuerdo)

El *proceso de asignación (Acuerdo)* (A3) es la segunda actividad dentro del modelo IDEF0 de la Figura 3.3, su objetivo principal es asignar recursos al *programa de producción*, dentro de la UPH este proceso consiste en la definición de una misión local para cada HR y su respectiva holarquía tras un proceso de acuerdo de operaciones. Como se mencionó anteriormente el flujo de trabajo de la actividad A3 inicia con la recepción del programa de producción proveniente de la *sub-función programación de la producción*, este programa contiene los requerimientos operacionales necesarios para la fabricación de un producto específico, a partir de esta información el componente misión de la UPH inicia un proceso de solicitud a los holones para cumplir con estos requerimientos, en base al estado actual de los mismos. Con el objetivo de desarrollar este proceso de forma eficiente, la UPH sigue un *protocolo de asignación*, el cual define las fases, el orden y los actores involucrados en dicho proceso. *ContractNet* es uno de los protocolos más utilizados en el proceso de asignación de recursos en un sistema de manufactura distribuido, fue propuesto por Reid Smith [32] y ha sido empleado para negociación y formación de holarquías en sistemas holónicos en múltiples trabajos. En *ContractNet*, los holones juegan dos roles: *iniciador* y *participante*. El iniciador es el administrador de la negociación, y los participantes los contratistas de la misión, es decir, los holones. El protocolo está compuesto por cinco etapas en las que se establece el contrato entre el iniciador y el participante [9]. La primera etapa

corresponde a *solicitud de ofertas* (1.1-1.2 en la Figura 3.11), en esta etapa el iniciador (componente misión UPH) solicita ofertas a los participantes (holones recurso) en base a los requerimientos operacionales definidos en el programa de producción. La segunda etapa, *elaboración de la propuesta* (2.1-2.4), se activa en respuesta a la solicitud de ofertas por parte del iniciador, los participantes evalúan su capacidad para cumplir los requerimientos expuestos en dicha solicitud. En base al *cronograma de producción local*, el estado actual del recurso, costos y otros aspectos operacionales, el holón recurso elabora su respectiva oferta operacional. En la tercera etapa, *presentación de ofertas* (3.1-3.2), el holón recurso envía (o no presenta, si es el caso) su respectiva oferta al componente misión de la UPH a través del *vector de estados*. En la cuarta etapa, *análisis de ofertas* (4.1-4.3), el componente misión revisa los *criterios de asignación* con el fin de *seleccionar las ofertas factibles* para cada uno de los requerimientos solicitados previamente, es así como se establece el *programa detallado de producción* para la UPH. Por ultimo en la quinta etapa, *aprobación de misión* (5.1-5.2), el iniciador trasmite a cada holón la confirmación respectiva a su oferta. En la Figura 3.11 se expone el diagrama de secuencia del protocolo ContractNet aplicado en el proceso de asignación de recursos en la programación de la producción desde el enfoque holónico.

El protocolo de asignación orienta las tareas desarrolladas dentro de la actividad A3, dentro del protocolo ContractNet definido anteriormente se introdujeron nuevos conceptos, asociados a flujos de información y de control internos y externos. Para explicar de forma práctica dichos conceptos se hace uso del proceso productivo ejemplo.

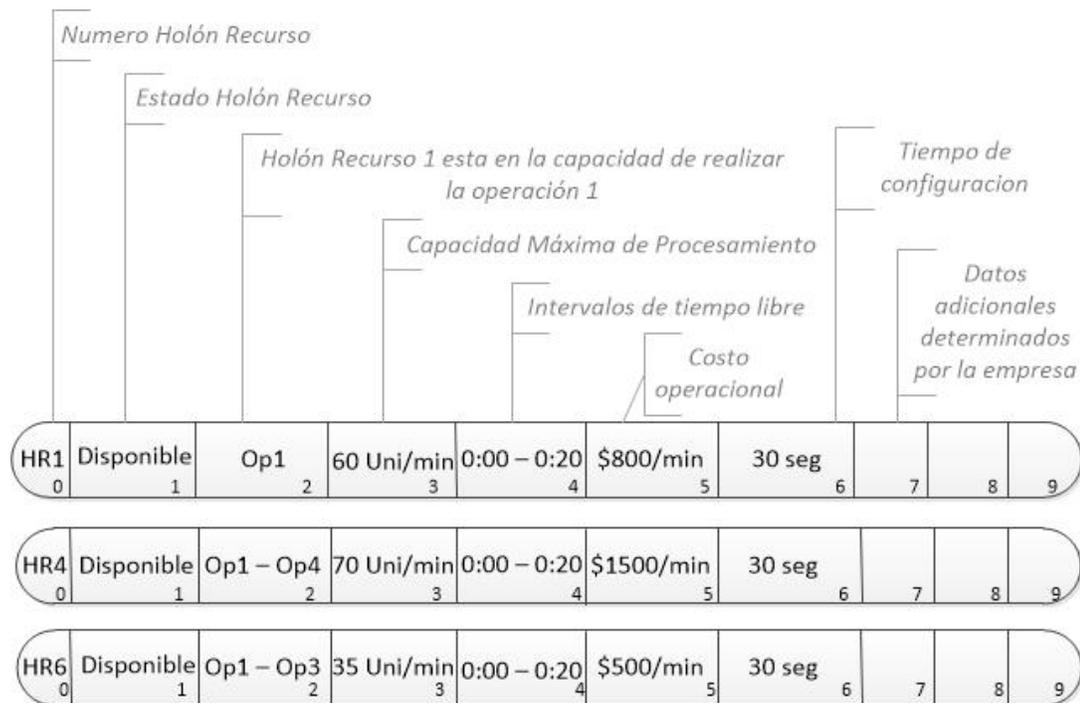
Como se mencionó previamente, el protocolo inicia con la recepción del programa de producción proveniente de la actividad A2, de dicho programa el componente misión de la UPH identifica los requerimientos operacionales necesarios para llevar a cabo una orden de producción, en base a esto solicita ofertas a los holones recurso que estén en la capacidad de cumplir estos requerimientos. Para el programa de producción del proceso productivo ejemplo (Figura 3.10) se identifican 9 requerimientos puntuales asociados a tres órdenes de producción, es así como para dicha situación, el componente misión solicitará ofertas a los HR para cumplir operaciones como: [Op1/50 Uni], [Op1/40 Uni], [Op1/40 Uni], por ejemplo, para el caso de la orden 1 se solicita efectuar la operación 1 a 50 unidades, y así para los otros requerimientos asociados a las órdenes de producción O2 y O3 respectivamente. El holón recurso recibe dichas solicitudes y efectúa una serie de tareas para elaborar una propuesta, como respuesta al componente misión de la UPH. Como primera medida, se solicita el cronograma de producción local de cada HR con el fin de conocer la distribución en el tiempo de las operaciones que han sido pre-asignadas para dicho recurso, para el caso de los holones recurso (HR1 – HR6) del proceso productivo, inicialmente este cronograma está vacío, partiendo del hecho de que para el ejemplo se establece un escenario en donde la jornada de producción parte de cero.



**Figura 3.11: Diagrama de secuencia Protocolo ContractNet.**  
Fuente propia.

Una vez conocidos los intervalos de tiempo libre que el HR dispone para ejecutar la operación que se solicita, se evalúa el estado actual de dicho recurso en términos de capacidad y disponibilidad, así como también se solicita información adicional al componente ingeniería referente a costos operacionales, funcionalidad del recurso, y programas de mantenimiento. Con base a la información previamente recolectada, el holón recurso elabora una oferta operacional y la transmite al componente misión de la UPH mediante el vector de estados, el HR tiene la autonomía para decidir si presenta o no su oferta en base a su capacidad operacional.

El vector de estados es un elemento en donde se almacena y se organiza la información relevante del HR en aras de desarrollar satisfactoriamente el proceso de asignación de recursos a operaciones por parte del componente misión. Para el caso del proceso productivo ejemplo, las ofertas que se dan en respuesta a las 3 solicitudes de ejecución de operación 1 que se definieron anteriormente, se pueden observar en los vectores de estado de los holones HR1, HR4 y HR6 (Figura 3.12). El número de datos almacenados en el vector depende de los lineamientos de cada empresa, así como los criterios de asignación de recursos que dichas empresas aplican en su proceso de programación de la producción.

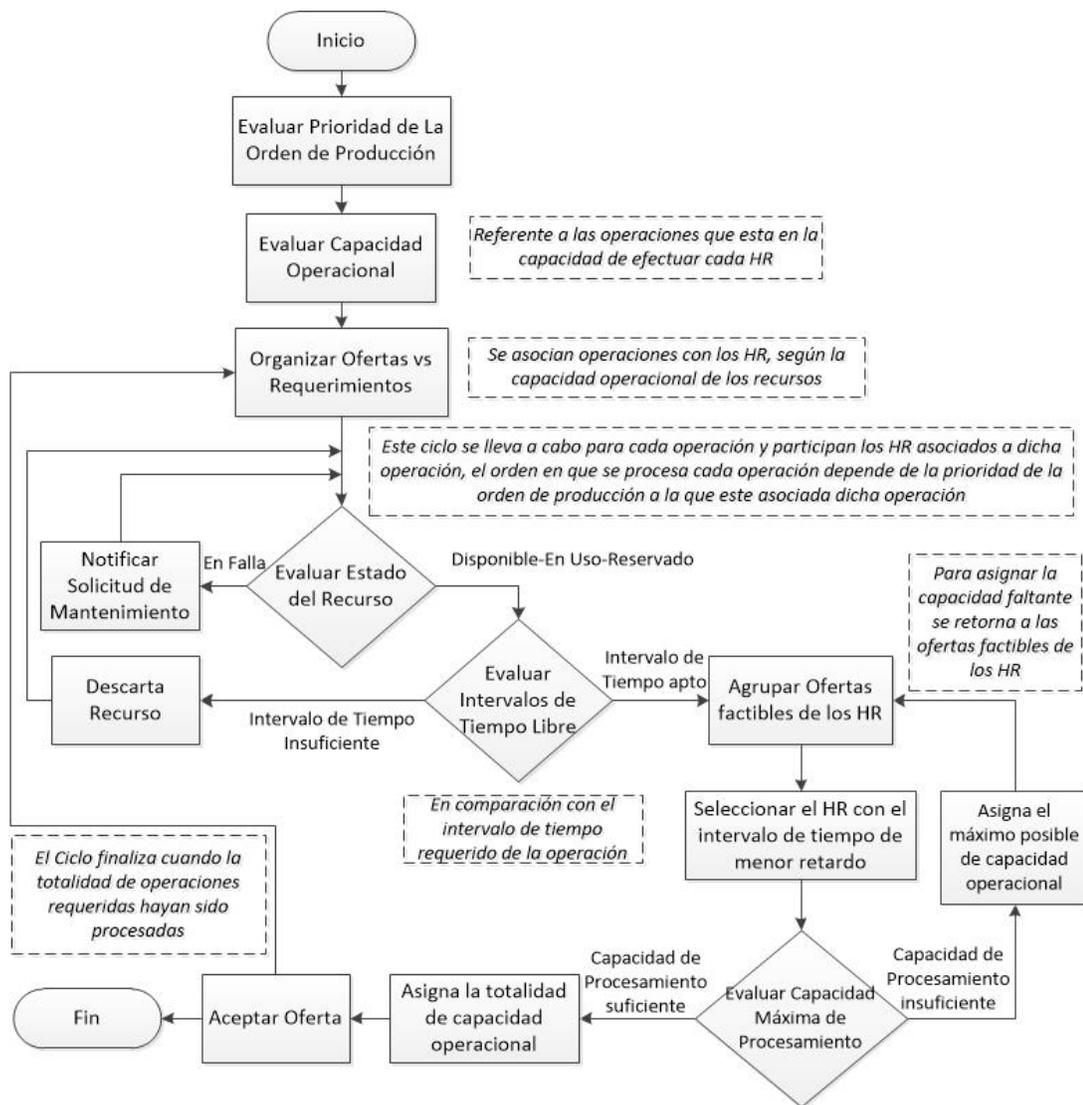


**Figura 3.12: Vector de estado de HR1, HR4 y HR6.**

Fuente propia.

En la siguiente etapa del protocolo, el componente misión recibe los vectores de estado con las respectivas ofertas operacionales de los HR, en base a la información allí contenida, así como también información adicional de la orden de producción y de otros ámbitos del sistema de manufactura, selecciona las mejores ofertas para cumplir los requerimientos del programa de producción, y así completar las órdenes de producción. Para ello el componente misión posee atributos de toma de decisión, fundamentados en los criterios de asignación que han sido designados por los niveles estratégicos de la empresa. En las técnicas de asignación de recursos expuestas en la sección 1.3 se aplican dichos criterios, en muchas de estas técnicas se emplean algoritmos de optimización para desarrollar la respectiva asignación de recursos. La definición de criterios de asignación, así como también la

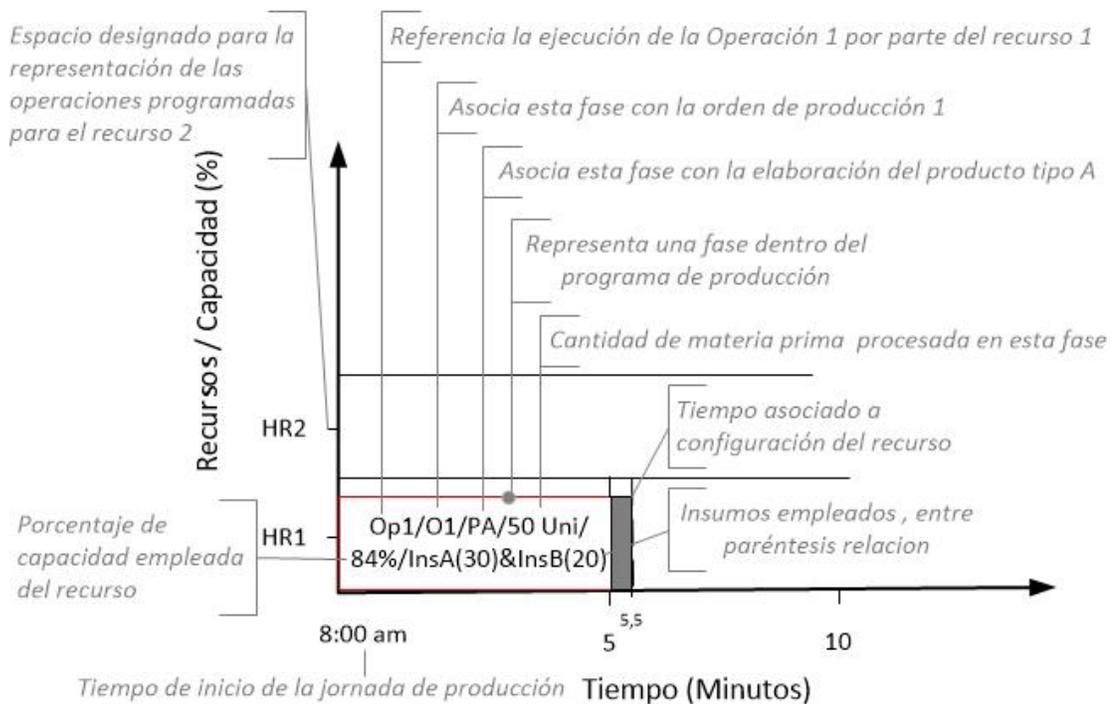
especificación de las técnicas empleadas, depende de los lineamientos y estrategias de cada empresa. Dentro del alcance de esta tesis no se encuentra la elaboración de una propuesta de criterios de asignación de recursos, ni tampoco de una técnica o algoritmo de optimización, pero con el fin de ilustrar este proceso de asignación y exponer como se emplean los datos contenidos en el vector de estados se presenta en la Figura 3.13, el diagrama de flujo de un algoritmo básico en donde se establecen como criterios de asignación de mayor prioridad; el factor tiempo y el aprovechamiento máximo de la capacidad operacional del recurso.



**Figura 3.13: Diagrama de flujo de un algoritmo básico de asignación de recursos.**

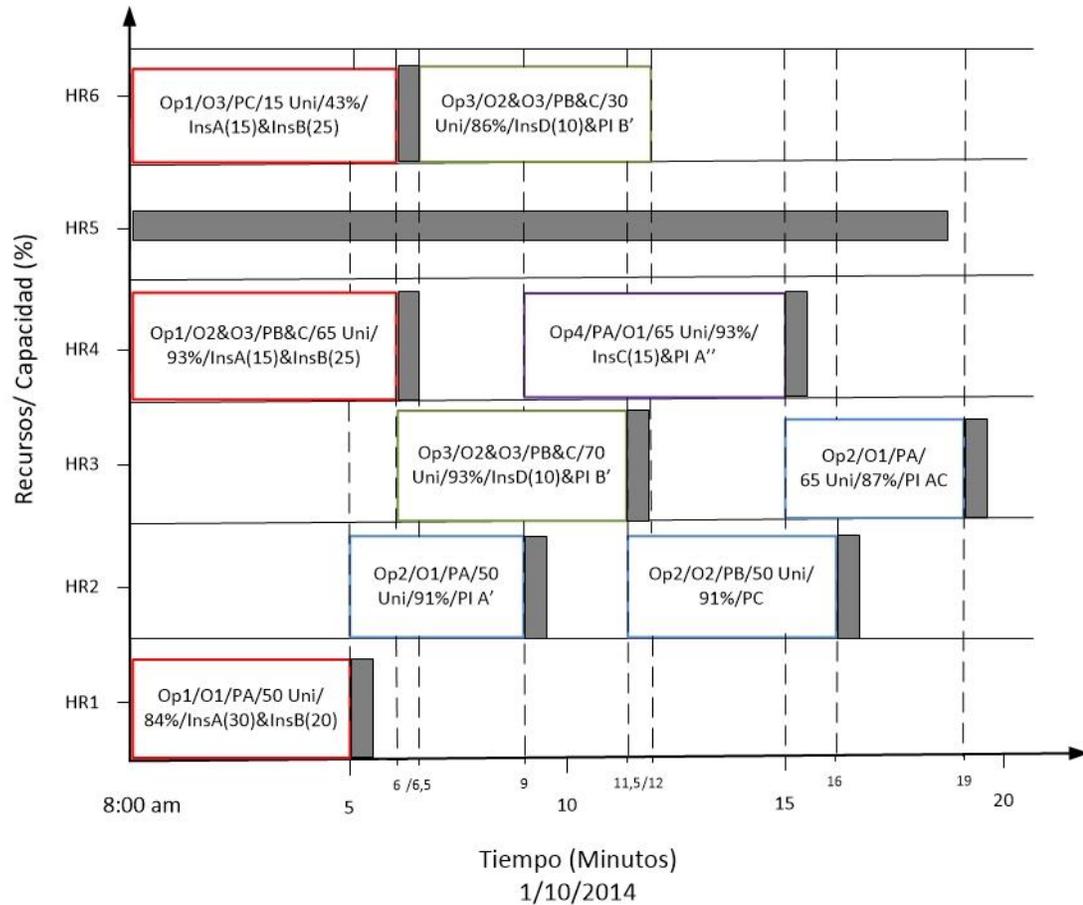
Fuente propia.

La ejecución del algoritmo de asignación de recursos concluye en la selección de ofertas factibles para cada uno de los requerimientos predispuestos, dichas ofertas se distribuyen en el tiempo y se representan de forma gráfica mediante el *programa detallado de producción* de la UPH, el cual contiene la secuencia de operaciones asignadas a cada HR, estructuradas en el tiempo de forma tal que se garantice su ejecución y el cumplimiento de las órdenes de producción, este documento se genera como respuesta final a los requerimientos definidos en el programa de producción. En la Figura 3.15 se expone el programa detallado de producción para el caso del proceso productivo ejemplo, en este diagrama se puede apreciar la asignación de recursos a operaciones en específico, en el programa se puede observar cómo se procesó el caso de las 3 solicitudes de ejecución de operación 1 anteriormente nombradas, para la primera solicitud [Op1/50 Uni] se aceptó la oferta del HR1 y se asignó el total de capacidad de procesamiento a dicho recurso (50 Uni), las siguientes solicitudes [Op1/40 Uni], [Op1/40 Uni], asociadas a las órdenes de producción 2 y 3 respectivamente, se unificaron debido a que representaban una misma fase dentro de la regla de producción y se aceptaron las ofertas de los HR4 y HR6, distribuyendo la capacidad de procesamiento (65 Uni para HR4 y 15 Uni para HR6), es así como se efectúa una administración óptima de la capacidad de los recursos. Para facilitar la comprensión del esquema del programa detallado de producción se expone en la Figura 3.14 su respectiva explicación.



**Figura 3.14: Explicación esquema de programa detallado de producción.**

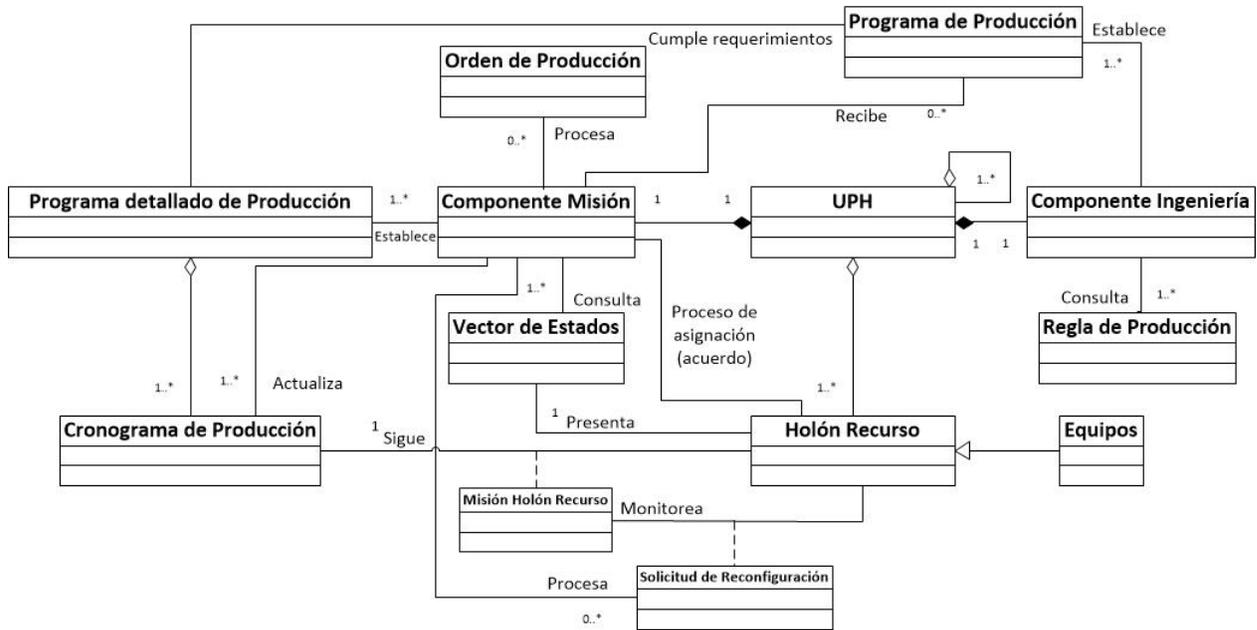
Fuente propia.



**Figura 3.15: Esquema de programa detallado de producción de la UPH.**  
Fuente propia.

En la última etapa del protocolo, en base al proceso de asignación previo y al programa detallado de producción, el iniciador notifica a cada holón recurso la confirmación de su respectiva oferta, concluyendo así con el protocolo de asignación en la UPH

Por último, en la A3 se introduce el concepto de *mecanismos de interacción* como un flujo de control para dicha actividad en el modelo IDEF0, esta noción hace referencia a la capacidad de cooperación que tienen los componentes de la UPH, en los diagramas de secuencia definidos anteriormente se puede observar por ejemplo, la interacción entre el componente misión y los HR para desarrollar una función en específico como la asignación de recursos, entre otras. A continuación se propone aplicar los diagramas de clase de la técnica de modelado UML (explicado con mayor detalle en el **Anexo C** - Sección 2.1), con el objetivo de observar las relaciones estáticas entre los componentes de la UPH y modelar los mecanismos de interacción (Figura 3.16).



**Figura 3.16: Diagrama de clases de la UPH.**

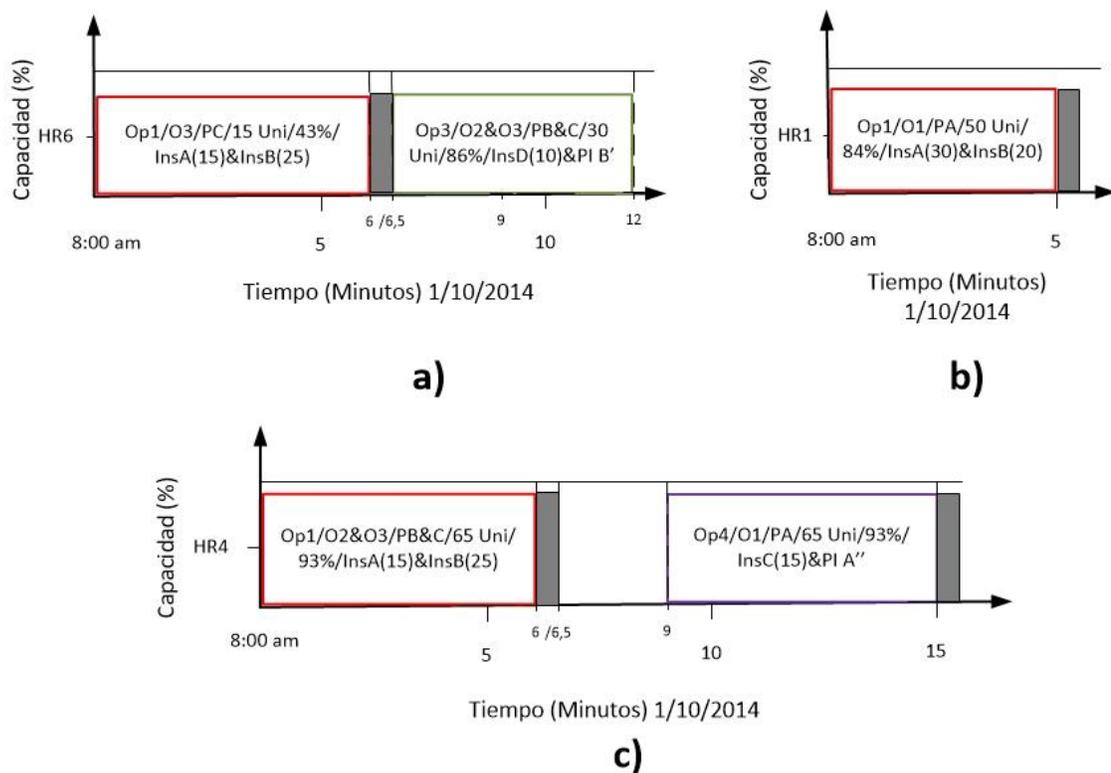
Fuente propia.

El *programa detallado de producción*, entre otros elementos definidos en la actividad A3, representan la base principal para el desarrollo de la actividad *configuración de la producción*, en la cual se desarrolla como principal elemento la creación de holarquías.

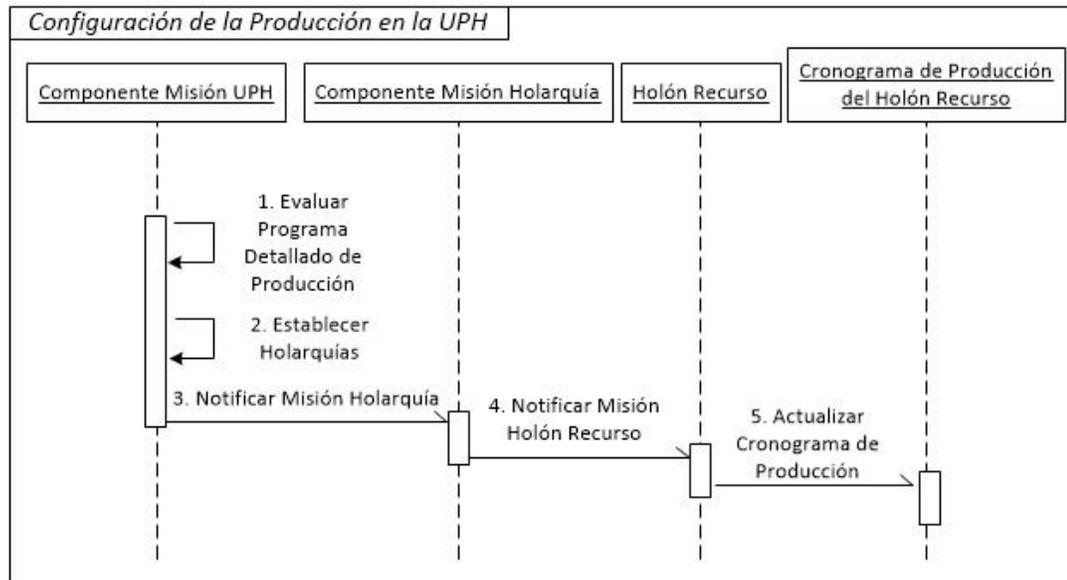
### 3.3.3 Configuración de la producción

La *configuración de la producción* (A4) es la tercera actividad dentro del modelo IDEF0 de la Figura 3.3, su objetivo principal es la formación de holarquías y configuración de los recursos de la UPH. En la actividad previa, se establece el programa detallado de producción como elemento concluyente del protocolo de asignación, en dicho programa se definen y se distribuyen en el tiempo las misiones para cada uno de los holones recurso de la UPH. Una vez confirmada la misión para cada HR, se procede a desarrollar el proceso de formación de holarquías, como se definió anteriormente una *holarquía* es una agrupación de holones recurso, estructurados en una jerarquía temporal, orientados al cumplimiento de una misión, para el caso de la función de programación de la producción, la agrupación de HR en una holarquía se efectúa en base a las órdenes de producción, de esta forma, la Holarquía 1 está compuesta por todos los HR que participan en el cumplimiento de las operaciones definidas para la orden de producción 1 (O1), para el caso del proceso productivo ejemplo, la Holarquía 1 está compuesta por los holones recurso HR1, HR2, HR3 y HR4, la Holarquía 2 por HR2, HR3, HR4 y HR6, y la Holarquía

3 por HR3, HR4 y HR6, esta distribución está fundamentada en el hecho de que un holón recurso puede hacer parte de múltiples holarquías a la vez y en la capacidad de cooperación de los mismos. Cada HR dentro de la holarquía tiene un cronograma de producción local, el cual es una representación gráfica del componente misión interno del mismo HR, el cronograma contiene la distribución en el tiempo de las operaciones (misiones) programadas para el HR, en el caso del proceso productivo ejemplo, la Figura 3.17.a, 3.17.b y 3.17.c muestra el cronograma de producción actualizado de los HR6, HR1 y HR4 respectivamente. Si se agregan los cronogramas de producción locales de todos los HR dentro de una holarquía, se tiene el cronograma de producción de la holarquía (componente misión de la holarquía). En el proceso productivo ejemplo, se forman 3 holarquías, cada una de ellas con su propio cronograma de producción, la agregación de dichos cronogramas resulta en el programa detallado de producción de la UPH (Figura 3.15), como se mencionó anteriormente este programa detallado cumple con los requerimientos del programa de producción, y este a su vez, satisface la demanda de productos especificada en las órdenes de producción. En la Figura 3.18 se observa el diagrama de secuencia que modela la interacción de los componentes de la UPH en el desarrollo de la actividad A4.



**Figura 3.17: Esquema de cronograma de producción del HR1, HR4 y HR6.**  
Fuente propia.



**Figura 3.18: Diagrama de secuencia configuración de la producción.**

Fuente propia.

En la Figura 3.19 se expone la configuración final de la UPH para el caso del proceso productivo ejemplo, se observa la agrupación de cinco holones recurso en tres holarquías, compartiendo recursos entre ellas. La Holarquía 1, delimitada por la línea punteada roja, está conformada por cuatro HR, cada HR es representado por un ovalo, el cual está compuesto de una parte física (equipo) y un componente de información (cronograma de producción). Cada holarquía tiene internamente un cronograma de producción y su respectiva “configuración física” (secuencia de equipos en piso de planta) para la elaboración del tipo de producto especificado en la orden de producción. Por su parte, los componentes de la Holarquía 2 están delimitados dentro de la línea punteada azul, y los asociados a la Holarquía 3 se encuentran dentro de la línea verde, cabe resaltar que la intersección entre las líneas punteadas se debe a la capacidad de cooperación entre holarquías. Las 3 holarquías están contenidas dentro de la UPH, la agrupación de los cronogramas de dichas holarquías da como resultado el programa detallado de producción, la UPH contiene todos los recursos (HR) del sistema, incluyendo el HR5, el cual no se define dentro de ninguna holarquía debido a su estado actual (en falla).

En la figura se pueden identificar los atributos holónicos definidos en el capítulo 2, en primer lugar se identifica la autonomía de los HR, fundamentada en el hecho de que cada HR basa su comportamiento en un cronograma de producción propio o local. La propiedad de cooperación se observa en el trabajo conjunto de HR, y entre holarquías, así como también la respectiva colaboración cuando un fallo ocurre (como se detalla en la actividad A5). Se observa también auto-similaridad entre HR, atributo que les permite agruparse fácilmente en holarquías, y las propiedades de recursividad y escalabilidad se observan en la estructura de la UPH, compuesta por holarquías, que a su vez se componen de holones recurso.

**Figura 3.19: Configuración de la producción en la UPH.**  
Fuente Propia.

### 3.3.4 Monitoreo y reconfiguración del programa detallado de producción

La cuarta actividad en el modelo IDEF0 (Figura 3.3) reúne los procesos de monitoreo y reconfiguración de la producción (A5), el principal objetivo de esta actividad es asegurar el cumplimiento de las metas de producción. Para ello se monitorea constantemente el avance de las misiones designadas para cada holón recurso, cada HR efectúa internamente este seguimiento y está en la responsabilidad de notificar al componente misión de su holarquía cualquier falla o evento no anticipado que ponga en riesgo el cumplimiento de su cronograma.

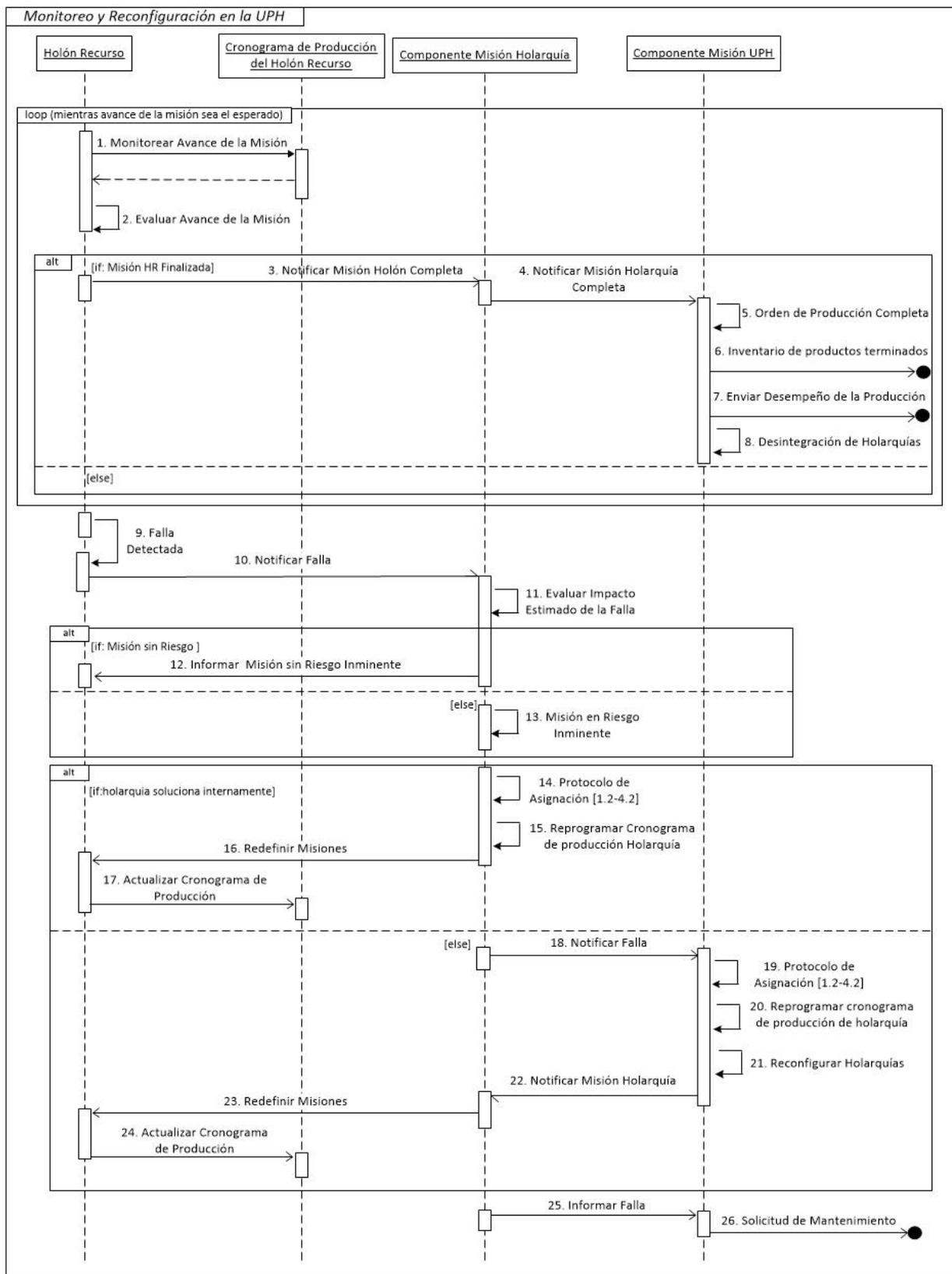
En la Figura 3.20 se observa el diagrama de secuencia para el monitoreo de la producción en la UPH, haciendo énfasis en el manejo de fallas en el sistema, y en el procesamiento final que se le da a una orden de producción completa. El holón recurso se encuentra en un proceso continuo de monitoreo del avance de las misiones definidas en su cronograma de producción, con el fin de prevenir y reaccionar ante situaciones que alteren el normal desarrollo de sus operaciones, este proceso le otorga atributos de reactividad y proactividad al sistema. Cuando se finaliza con éxito las misiones designadas para los HR, se notifica al componente misión de la respectiva holarquía, y este a su vez notifica el cumplimiento total de los objetivos designados para dicha holarquía al componente misión de la UPH, como cada holarquía se asocia directamente a una orden de producción, el cumplimiento de la misión de la holarquía representa la elaboración total de productos definidos para una orden de producción específica. El componente misión de la UPH notifica al ámbito de inventario la cantidad de productos terminados, disponibles para su comercialización. Al tiempo, se informa al nivel 4, de logística y planificación de negocios, el desempeño de la producción, con datos reales, resultantes del desarrollo de las operaciones de producción, disponibles para su respectivo análisis. Una vez la orden de producción ha sido finalizada, se desintegran las holarquías y los HR que la conforman actualizan su cronograma de producción, y dependiendo de su capacidad y disponibilidad están prestos a aceptar nuevas misiones y componer nuevas holarquías.

Si se presenta un evento que impide el normal desarrollo del avance de la misión del HR, se activa el flujo de trabajo concerniente al manejo de fallas en el sistema, una vez se identifica un fallo, el HR lo notifica al componente misión de la holarquía, el cual efectúa un proceso de evaluación, el cual tiene como objetivo estimar el impacto que puede generar la falla en el cronograma de producción. Si la falla identificada pone en riesgo la misión, se procede a efectuar un proceso de reconfiguración. Inicialmente la holarquía intenta solucionar el inconveniente internamente, reprogramando operaciones entre los HR que la componen, para ello aplica las etapas 1.2 hasta 4.2 del protocolo de asignación definido anteriormente en la Figura 3.11. Si la holarquía no puede solucionar el inconveniente, notifica la falla al componente misión de la UPH, el cual efectúa nuevamente las etapas del

protocolo de asignación con todos los HR del sistema, una vez se solucione el problema se reprograman los cronogramas de producción y se reconfiguran las holarquías. Por último, se notifica al ámbito de mantenimiento la falla, con el fin de efectuar la respectiva función de mantenimiento en el equipo.

De esta forma, se concluye con las 4 actividades principales del modelo IDEF0 de la función de programación de la producción en la UPH (Figura 3.3), al abordar cada una de estas actividades se explica detalladamente las tareas, actores y responsabilidades que cada una de estas tiene dentro del método para la programación de la producción, presentando además como se llevará a cabo los respectivos procesos desde el enfoque holónico.

Lo planteado en este capítulo representa el principal aporte en el desarrollo del método de programación de la producción, para ello se proponen modelos genéricos con tareas y flujos de información aplicables en cualquier organización, el método en el presente trabajo se entiende como la definición de una secuencia estructurada de tareas realizadas por los componentes de la UPH con el fin de desarrollar la función de programación de la producción de manera eficiente, soportado además en la definición de flujos de información, interfaces, modelos y demás nociones de los sistemas holónicos de manufactura. En los capítulos posteriores se efectúa el respectivo modelado dinámico de los flujos de trabajo definidos previamente, con el objetivo de visualizar el comportamiento de la UPH. Así como también se propone una serie de procedimientos para aplicar el método de programación de la producción en una empresa.



**Figura 3.20: Monitoreo y reconfiguración de la producción en la UPH.**

Fuente propia.

## Capítulo IV

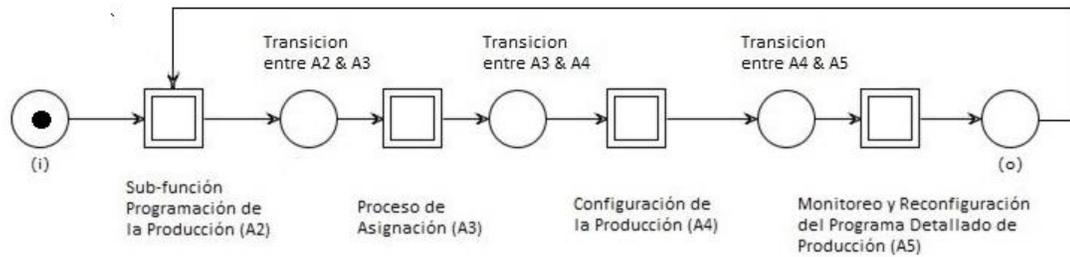
# Modelado Dinámico del Método para la Programación de la Producción

*Este capítulo presenta el modelado dinámico de las actividades definidas en el capítulo anterior para el método de programación de la producción. Como objetivo se pretende modelar mediante la técnica WF-Net, la interacción entre los componentes de la UPH, en base a los diagramas de secuencia y los modelos IDEF0 desarrollados en el capítulo 3. Posterior a ello se validan dichos modelos con el fin de certificar su correcto funcionamiento.*

El desarrollo del presente capítulo tiene como objetivo visualizar la dinámica en la UPH, cuando se efectúan los flujos de trabajo definidos en el capítulo previo, para el método de programación de la producción. Para ello se utiliza la técnica de modelado Workflow-Net (en el **Anexo C** – Sección 3 se profundizan conceptos de WF-Net), la cual combina los conceptos de workflow con las bases de modelado de sistemas a eventos discretos de las redes de Petri. Esta técnica permite, además de exponer de forma gráfica el comportamiento del método, efectuar una validación formal de los modelos obtenidos, y en general del desempeño del método. El modelado dinámico permite visualizar la interacción entre los componentes de la UPH (constituyendo así una forma de representar dinámicamente los mecanismo de interacción de la UPH), observando la evolución en el tiempo de las tareas asignadas para cada uno de ellos, detallando el procesamiento de una orden de producción desde su recepción hasta su ejecución, pasando por las distintas actividades de programación de la producción holónica definidas para el método.

### 4.1 Modelado WF-Net

El modelado dinámico se desarrolla en base a los modelos estructurales obtenidos en el capítulo previo, como primera medida se toma como referencia el modelo IDEF0 (Figura 3.2-3.3), con el fin de recapitular las 4 actividades principales identificadas en el método para la programación de la producción desde el enfoque holónico. En la Figura 4.1 se observa el modelo WF-Net de la función global de programación de la producción, se puede apreciar la secuencia en el desarrollo de estas 4 actividades, las cuales en el modelo WF-Net son representadas como sub-actividades, y tienen un modelo WF-Net interno (dichos modelos internos se exponen en secciones posteriores). En la figura se observa como el sistema evoluciona desde el estado (i), donde se recibe una orden de producción (representando por un token o marca), hasta su culminación (o), pasando por cada una de las actividades, interfaces y estados de transición entre dichas actividades. Cabe resaltar que en los modelos WF-Net, las tareas (cuadros) tienen mayor importancia que las condiciones o estados (círculos), los cuales se interpretan en su mayoría como conexiones básicas entre tareas.



## UPH

---

**Figura 4.1: WF-Net Programación de la Producción desde el enfoque holónico.**

Fuente propia.

Como se mencionó anteriormente, para cada una de las tareas de la Figura 4.1 se desarrolla un WF-Net interno, a continuación se presentan dichos modelos. Cabe resaltar que la mayoría de las tareas modeladas fueron explicadas en el capítulo anterior, por tal motivo se detalla exclusivamente la dinámica relevante para entender los modelos.

### 4.1.1 WF-Net de la Sub-función de programación de la producción

El objetivo principal de esta actividad es la elaboración del programa de producción en base a los requisitos predefinidos en una orden de producción. En la Figura 4.2 se observa el modelo WF-Net para la sub-función de programación de la producción (A2), allí se visualiza la interacción entre el componente misión de la UPH y su componente ingeniería. El flujo de trabajo modelado en la figura se basa en el diagrama de interacción presentado en la Figura 3.8, e inicia con la recepción de una orden de producción (*Rec\_Ord\_Prod*), la cual pasa por un proceso de evaluación (*Eval\_Ord\_Prod*), donde se decide si dicha orden se acepta o se rechaza en base a la capacidad actual de producción; si se confirma la orden, el componente ingeniería efectúa tareas, tales como revisar reglas de producción (*Rev\_Reg\_Prod*) y especificaciones de calidad (*Rev\_Esp\_Cal*) con el fin de establecer el programa de producción (*Est\_Prog\_Prod*), posteriormente se envía este programa al componente misión de la UPH, junto con otra información referente a requerimientos de materia prima y energía, concluyendo así con el flujo de trabajo de la actividad A2. El modelo tiene inicialmente dos marcas en los estados (*i1*) e (*i2*), las cuales representan el punto de partida para la ejecución de tareas por parte de cada uno de los componentes de la UPH, la marca en estos estados simboliza la disponibilidad de dichos componentes para intervenir en el procesamiento de un nuevo caso u orden de producción. A su vez, la WF-Net concluye en los estados (*o2*) y (*Lugar A Transición entre A2 & A3*), el primero representa la intervención final del componente ingeniería en el proceso, el segundo representa un estado de transición entre la actividad A2 y A3, es decir el componente misión de la UPH interviene nuevamente en la actividad A3, y este estado sirve para sincronizar dicha interfaz.

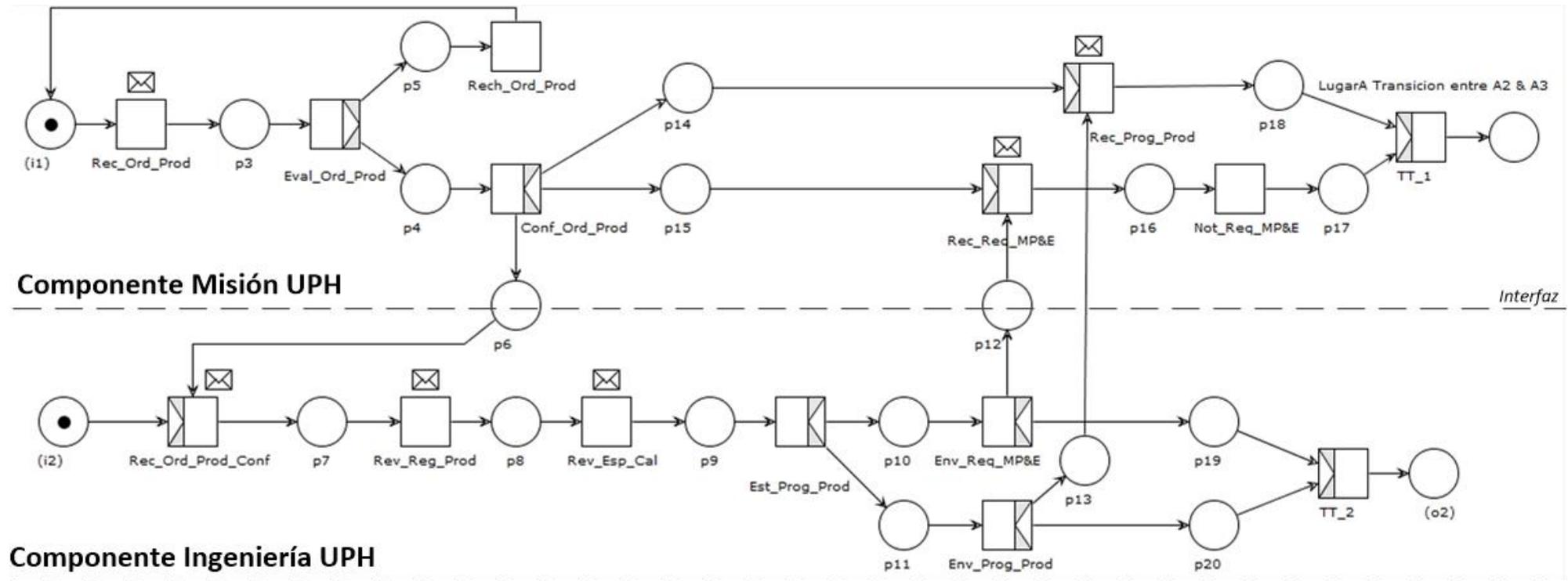


Figura 4.2: WF-Net de la Sub-función programación de la producción (A2).

Fuente propia.

En la Tabla 4.1 se indica la nomenclatura utilizada en las tareas del modelo WF-Net de la Figura 4.2.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Significado</b>
Rec_Ord_Prod	Recibir Orden de Producción
Eval_Ord_Prod	Evaluar Orden de Producción
Rech_Ord_Prod	Rechazar Orden de Producción
Conf_Ord_Prod	Confirmar Orden de Producción
Rec_Ord_Prod_Conf	Recibir Orden de Producción Confirmada
Rev_Reg_Prod	Revisar Regla de Producción
Rev_Esp_Cal	Revisar Especificaciones de Calidad
Est_Prog_Prod	Establecer Programa de Producción
Env_Req_MP&E	Enviar Requerimientos de Materia Prima y Energía
Env_Prog_Prod	Enviar Programa de Producción
Rec_Req_MP&E	Recibir Requerimientos de Materia Prima y Energía
Not_Req_MP&E	Notificar Requerimientos de Materia Prima y Energía
Rec_Prog_Prod	Recibir Programa de Producción
TT_1	Tarea Transitoria 1
TT_2	Tarea Transitoria 2

**Tabla 4.1: Nomenclatura empleada en la WF-Net de la sub-función programación de la producción (A2).**

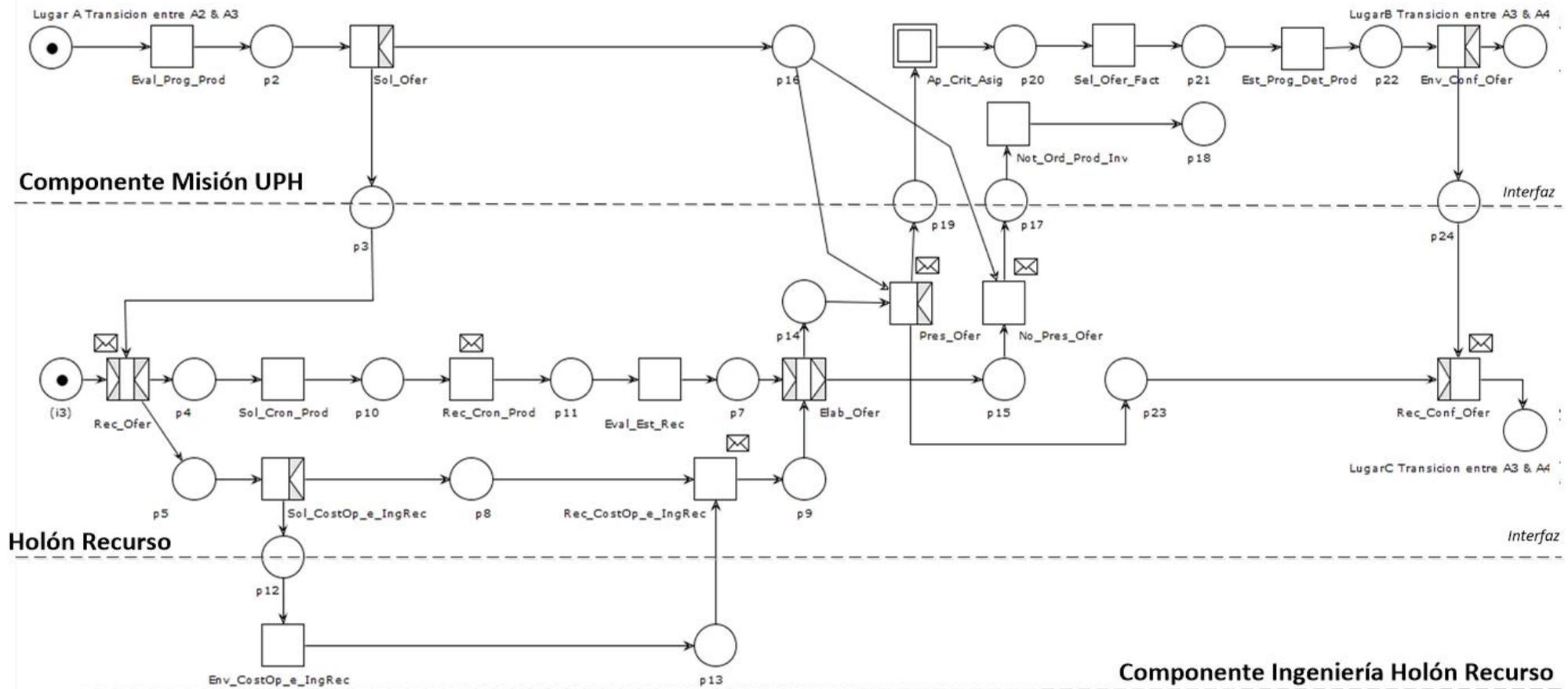
#### **4.1.2 WF-Net del proceso de asignación**

Como se definió anteriormente, el objetivo principal de esta actividad es asignar recursos al programa de producción, proceso concerniente a la definición de misiones locales para los HR y su respectiva holarquía. En la Figura 4.3 se expone el modelo WF-Net para dicha actividad (A3), de asignación de recursos. En este modelo se presenta la interacción entre el componente misión de la UPH, el holón recurso y su respectivo componente ingeniería. El flujo de trabajo del modelo parte del estado final (*Lugar A Transición entre A2 & A3*) del modelo previo (A2), en la primera tarea se evalúa el programa de producción (*Eval\_Prog\_Prod*) con el fin de identificar los requerimientos operacionales necesarios para llevar a cabo una orden de producción, e iniciar así un proceso de acuerdo de operaciones con los HR, tal como se especificó en el diagrama de secuencia de la Figura 3.11. A partir de información interna del estado y disponibilidad del recurso, así como información externa proporcionada por el componente ingeniería, el HR elabora una oferta, la cual presenta al componente misión de la UPH. En base a esta información el componente misión de la UPH aplica los criterios de asignación (*Ap\_Crit\_Asig*) definidos por la empresa, con el fin de seleccionar las mejores ofertas (*Sel\_Ofer\_Fact*) y establecer así el programa detallado de producción (*Est\_Prog\_Det\_Prod*). La tarea (*Ap\_Crit\_Asig*) se modela como una sub-actividad,

la cual internamente realiza sub-etapas antes de que se continúe con la siguiente actividad, estas etapas corresponden a los pasos definidos en el algoritmo de asignación de recursos expuesto en la Figura 3.13, como se mencionó en la correspondiente sección 3.3.2, dicho algoritmo esta por fuera del alcance de este trabajo, por tal motivo no se elabora el modelo WF-Net de dicha sub-actividad. Al igual que en la sección previa, inicialmente en este modelo se tienen 2 marcas o tokens, la primera de ellas, como se explicó anteriormente representa la interfaz con la actividad A2, la segunda, presente en el estado (i3) representa el punto de partida para la ejecución de tareas del holón recurso. Para el caso, se tienen nuevamente dos estados de transición con la posterior actividad A4, referente a la continuidad en el flujo de trabajo del componente misión de la UPH y del HR. En la Tabla 4.2 se indica la nomenclatura utilizada en las tareas del modelo WF-Net de la Figura 4.3.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Significado</b>
Eva_Prog_Prod	Evaluar Programa de Producción
Sol_Ofer	Solicitar Oferta
Rec_Ofer	Recibir Oferta
Sol_Cron_Prod	Solicitar Cronograma de Producción
Eval_Est_Rec	Evaluar Estado de los Recursos
Sol_CostOP_e_IngRec	Solicitar Costos Operacionales e Ingeniería del Recurso
Env_CostOP_e_IngRec	Enviar Costos Operacionales e Ingeniería del Recurso
Rec_CostOP_e_IngRec	Recibir Costos Operacionales e Ingeniería del Recurso
Rec_Cron_Prod	Recibir Cronograma de Producción
Elab_Ofer	Elaborar Oferta
No_Pres_Ofer	No Presentar Oferta
Not_Ord_Prod_Inv	Notificar Orden de Producción Inviabile
Pres_Ofer	Presentar Oferta
Ap_Crit_Asig	Aplicar Criterios de Asignación
Sel_Ofer_Fact	Seleccionar Ofertas Factibles
Est_Prog_Det_Prod	Establecer Programa Detallado de Producción
Env_Conf_Ofer	Enviar Confirmación de Ofertas
Rec_Conf_Ofer	Recibir Confirmación de Ofertas

**Tabla 4.2: Nomenclatura empleada en la WF-Net del proceso de asignación (A3).**



**Figura 4.3: WF-Net del proceso de asignación (A3).**  
Fuente propia.

### 4.1.3 WF-Net de la configuración de la producción

El objetivo principal de esta actividad es la formación de holarquías y configuración de los recursos de la UPH. En la Figura 4.4 se expone el modelo WF-Net de dicha actividad (A4), referente a la configuración de la producción, en la cual interactúan el componente misión de la UPH y el de la holarquía, así como también el holón recurso. En base al programa detallado de producción definido en la actividad previa A3, el componente misión de la UPH establece holarquías (*Est\_Holarq*), junto con su respectiva misión (*Not\_Mis\_Holarq*). Por su parte el componente misión de cada holarquía establece las misiones locales para cada uno de los HR que la componen (*Not\_Mis\_HR*), y en base a ello el HR actualiza su cronograma de producción (*Act\_Cron\_Prod*).

Para el caso, inicialmente se tienen 3 marcas en la WF-Net, dos de ellas se encuentra en los estados de transición entre las actividades A3 y A4, y se tiene una marca en el estado (i4), la cual representa el punto de partida para la ejecución de tareas del componente misión holarquía. Al final de la WF-Net se tienen tres estados de transición entre las actividades A4 y A5, los cuales representan la continuidad en el flujo de trabajo desarrollado por los tres componentes. En la Tabla 4.3 se indica la nomenclatura de las tareas del modelo WF-Net de la Figura 4.4.

Nomenclatura	Significado
Eval_Prog_Det_Prod	Evaluar Programa detallado de Producción
Est_Holarq	Establecer Holarquías
Not_Mis_Holarq	Notificar Misión Holarquía
Rec_Not_Mis_Holarq	Recibir Notificación Misión Holarquía
Not_Mis_HR	Notificar Misión Holón Recurso
Rec_Not_Mis_HR	Recibir Notificación Misión Holón Recurso
Act_Cron_Prod	Actualizar Cronograma de Producción

**Tabla 4.3: Nomenclatura empleada en la WF-Net de la configuración de la producción (A4).**

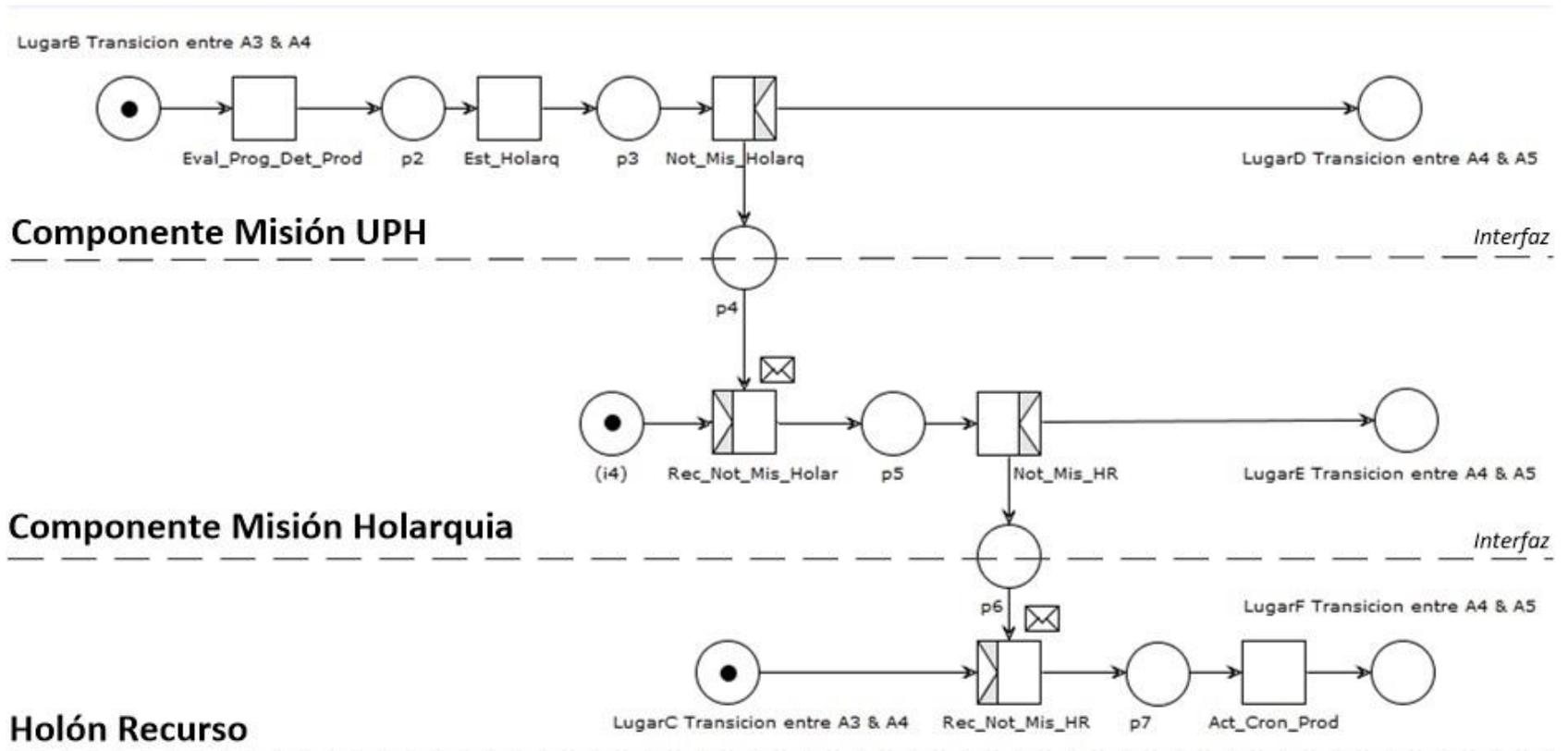


Figura 4.4: WF-Net de la configuración de la producción (A4).  
Fuente propia.

#### 4.1.4 WF-Net del monitoreo y reconfiguración del programa detallado de producción

El objetivo principal de esta actividad es asegurar el cumplimiento de las misiones designadas para cada holarquía y sus respectivos HR. En la Figura 4.5 se expone el modelo en WF-Net de dicha actividad (A5), en el cual se observa la interacción entre el HR, el componente misión holarquía y el componente misión de la UPH con el fin de efectuar el procesamiento final de una orden de producción, así como también reaccionar a eventos no anticipados que pongan en riesgo el cumplimiento de los objetivos de producción. El flujo de trabajo en la WF-Net inicia con un ciclo de monitoreo (*Mon\_Avan\_Mis*) y evaluación del avance de la misión (*Eval\_Avan\_Mis*) por parte de cada HR, este ciclo finaliza cuando ocurre alguno de las siguientes eventos: culminación total de la misión del HR (*Misión HR Finalizada*) o identificación de una falla en el sistema (*Falla detectada*). El primer evento simboliza la ejecución total de las operaciones asignadas para el HR, el cual a su vez notifica al componente misión de su holarquía dicha información (*Not\_Mis\_HR\_Comp*). Cuando todos los HR que componen una holarquía finalizan la totalidad de sus operaciones asignadas, el componente misión de la holarquía notifica dicha información al componente misión de la UPH. Seguidamente el componente misión de la UPH ejecuta las tareas finales en el procesamiento de dicha orden: notificación a nivel 4 de información relacionada con el desempeño de la producción, y notificación al ámbito de inventario de la cantidad de productos terminados. Finalmente se desintegra la holarquía, concluyendo así con el flujo de trabajo general de la función de programación de la producción. En el segundo evento se identifica una falla que pueda afectar el avance de la misión del HR, este a su vez notifica dicha falla al componente misión de su holarquía (*Not\_Fal*), el cual evalúa el impacto que esta pueda generar, si la falla no compromete el cumplimiento de la misión, se continua con el normal desarrollo de operaciones por parte del HR, si el impacto es significativo, el componente misión de la holarquía inicia un proceso de reconfiguración interno. El proceso de reconfiguración corresponde a la ejecución de las tareas definidas para el protocolo de asignación (como se definió en la pasada sección 3.3.2), las cuales se representan como una sub-actividad, que equivale al modelo de la Figura 4.3 del presente capítulo. Cuando se concluya el proceso de reasignación de operaciones, la holarquía reprograma su cronograma de producción (*Reprog\_Cron\_Prod\_Holarq*), y redefine las misiones locales de sus HR (*Redef\_Mis\_HR*). A su vez el HR actualiza su cronograma de producción y retorna a su estado normal (ejecución de operaciones, monitoreo y evaluación del avance de sus misiones). Por otro lado, si la holarquía es incapaz de corregir la falla internamente, busca cooperar con otras holarquías con el fin de solucionar el problema. Este proceso de cooperación entre holarquías y demás HR es coordinado por el componente misión de la UPH, el cual recibe una notificación de falla por parte del componente misión de la holarquía e inicia nuevamente el proceso de reconfiguración y acuerdo de misiones con todos los HR de la UPH. Cuando se

solucione el problema, se efectúan las tareas mencionadas anteriormente de redefinición de misiones y actualización del cronograma de producción hasta retornar nuevamente al estado normal del sistema. La última tarea en el procesamiento de una falla, involucra el envío de una solicitud de la UPH al ámbito de mantenimiento. Cabe resaltar que en este modelo se encuentran los estados finales (o1, o3 y o4) de los componentes misión de la holarquía y de la UPH, así como también del HR, los cuales representan la finalización del flujo de trabajo de cada uno de estos componentes. En la Tabla 4.4 se indica la nomenclatura de las tareas del modelo WF-Net de la Figura 4.5.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Significado</b>
Ejec_Mis	Ejecutar Misión
Mon_Avan_Mis	Monitorear Avance de la Misión
Ev_Avan_Mis	Evaluar Avance de la Misión
Not_Mis_HR_Comp	Notificar Misión HR Completa
Rec_Not_Mis_HR_Comp	Recibir Notificación Misión HR Completa
Not_Mis_Holarq_Comp	Notificar Misión Holarquía Completa
Rec_Not_Mis_Holarq_Comp	Recibir Notificación Misión Holarquía Completa
Not_Ord_Prod_Comp	Notificar Orden de Producción Completa
Not_Inv_Produc_Term	Notificar Inventario de Productos Terminados
Env_Desemp_Prod	Enviar Desempeño de la Producción
Des_Holarq	Desintegrar Holarquías
Not_Fal	Notificar Falla
Rec_Not_Fal	Recibir Notificación de Falla
Eva_Imp_Estim_Fal	Evaluar Impacto Estimado de la Falla
Not_Mis_sin_Ries_Inm	Notificar Misión sin Riesgo Inminente
Rec_Not_Mis_sin_Ries_Inm	Recibir Notificación de Misión sin Riesgo
Ini_Proc_Reconf_int_Holarq	Iniciar reconfiguración interna en holarquía
Eval_Sol_Fal	Evaluar Solución de Falla
Reprog_Cron_Prod_Holarq	Reprogramar el Cronograma de la Holarquía
Redef_Mis_HR	Redefinir Misión Holón Recurso
Rec_Mis_HR_Redef	Recibir Misión HR Redefinida
Act_Cron_Prod	Actualizar Cronograma de Producción
Reconf_Holarq	Reconfigurar Holarquías
Not_Mis_Holarq	Notificar Misión Holarquía
Rec_Not_Mis_Holarq	Recibir Notificación de la Misión de Holarquía
Inf_Fal	Informar Falla
Env_Sol_Mant	Enviar Solicitud de Mantenimiento

**Tabla 4.4: Nomenclatura empleada en la WF-Net del monitoreo y reconfiguración del programa detallado de producción (A5).**

**Figura 4.5: WF-Net del monitoreo y reconfiguración del programa detallado de producción (A5)**

Fuente propia.

## 4.2 Validación de modelos WF-Net

Con el fin de comprobar su correcto funcionamiento, se validan los modelos desarrollados en la sección previa. Para efectuar dicho proceso de validación se usa el software Woped versión 3.1.0, el cual no solo permite visualizar los modelos, sino también realizar un análisis semántico de los mismos, identificando propiedades claves que una red de Petri correctamente estructurada debe cumplir.

La primera etapa en este proceso de validación consiste en verificar dichas propiedades, el software permite efectuar dicho proceso de forma automática, así para cada modelo en WF-Net se identifican las siguientes propiedades (ver Tabla 4.5):

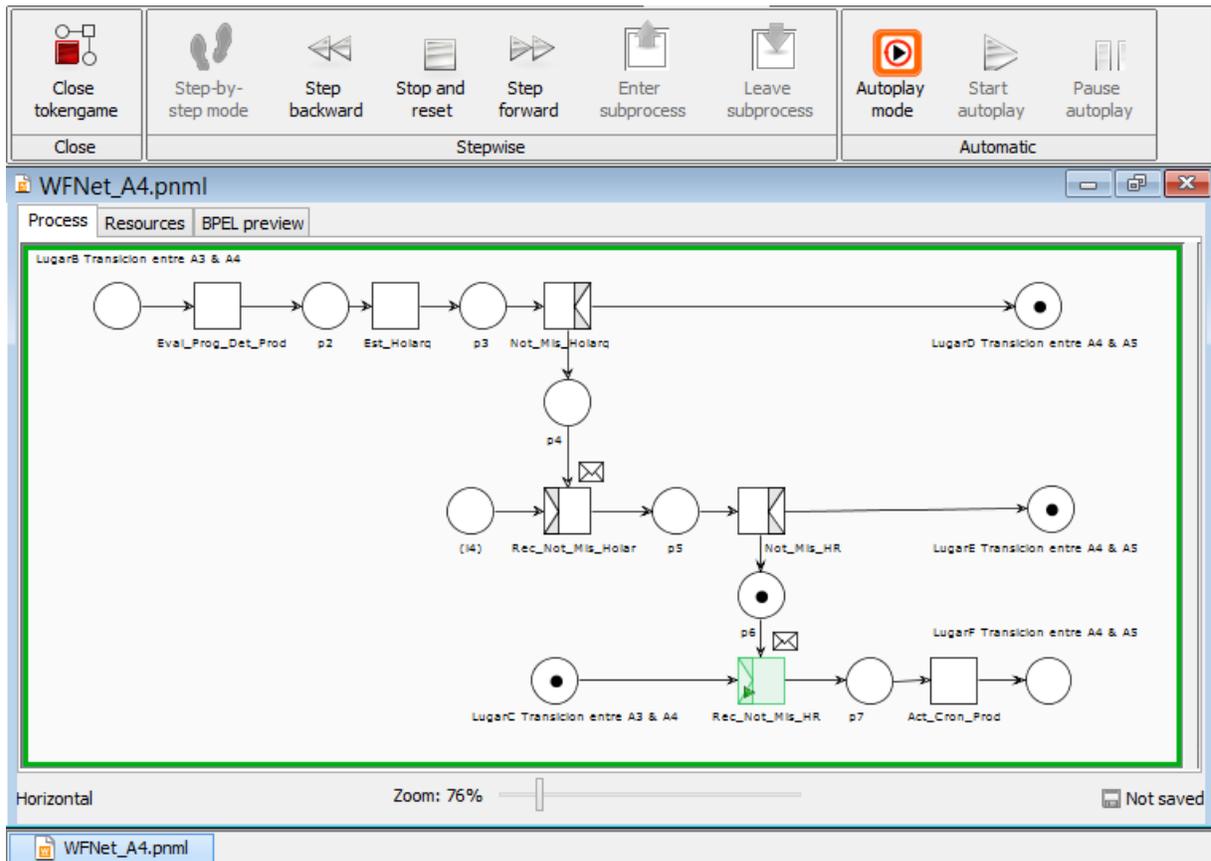
	Vivacidad	Acotada (binaria)	Reinicialable
WF-Net (Fig. 4.1)	✓	✓	✓
WF-Net A2 (Fig. 4.2)	✓	✓	✓
WF-Net A3 (Fig. 4.3)	✓	✓	✓
WF-Net A4 (Fig. 4.4)	✓	✓	✓
WF-Net A5 (Fig. 4.5)	✓	x	✓

**Tabla 4.5: Propiedades de los modelo en WF-Net.**

La primera propiedad de “*vivacidad*” representa la ausencia de bloqueos en la WF-Net, para el caso, simboliza un correcto modelado de la secuencia de las tareas, puesto que siempre es posible alcanzar los estados finales de cada WF-Net. Se dice que una WF-Net es “*acotada*” si para todo marcaje alcanzable todo estado tiene un número limitado de marcas, para el caso, las cuatro primeras WF-Net son *binarias* debido a que únicamente puede haber una marca a la vez en cada estado, lo que asegura el procesamiento de una sola orden de producción a la vez. El modelo WF-Net de la Figura 4.5 no es binario para 4 estados, debido a que dichos estados modelan la dinámica presente en el envío de solicitudes de mantenimiento, lo cual puede resultar en el agrupamiento de múltiples marcas en dichos estados, asociadas a diversas fallas en el sistema. Para el caso se consideran todos los modelos de WF-net “*reinicialables*”, en base al hecho de que todos los diagramas se estructuran en una secuencia de sub-actividades como se modela en la Figura 4.1, la cual es reinicialable. Dicha propiedad simboliza el procesamiento de una nueva orden de producción en un nuevo ciclo de trabajo.

La segunda etapa en el proceso de validación consiste en efectuar la simulación de los modelos de WF-Net mediante el software Woped. En esta etapa se ejecuta manualmente cada tarea, habilitada previamente por una marca, hasta verificar todas las dinámicas modeladas en las WF-Net, verificando también el cumplimiento de las propiedades anteriormente descritas, así como también el desempeño general de los modelos.

En la Figura 4.6 se observa el modelo WF-Net de la *configuración de la producción* en etapa de simulación, los cuadros en verde representan una tarea habilitada, para el caso, la tarea habilitada es *Recibir Notificación Misión Holón Recurso*, tras su ejecución la WF-Net llega a una fase final con una marca en los 3 estados de transición a la actividad A5.



**Figura 4.6: Simulación de la WF-Net configuración de la producción (A4).**

Fuente propia.

De esta forma se finaliza con la etapa de modelado dinámico, concluyendo así con la definición formal del método para la programación de la producción desde el paradigma de los HMS. En el siguiente capítulo se plantea el procedimiento que una empresa de producción puede llevar a cabo con el fin de aplicar los conceptos generales propuestos en esta tesis, para desarrollar la programación de la producción desde un método con enfoque holónico.

Anexo a esta monografía, se disponen los archivos Woped (formato .pnml) de cada uno de los modelos previamente definidos.

## Capítulo V

# Procedimiento para la Aplicación del Método para la Programación de la Producción

*En este capítulo se presenta un procedimiento básico para la aplicación del método para la programación de la producción desde el enfoque holónico propuesto en esta tesis. El procedimiento está compuesto de seis etapas que tienen, entre otras finalidades, facilitar la comprensión de los conceptos y aplicación de los modelos definidos en el método en un sistema de manufactura. El procedimiento propuesto tiene un carácter genérico y no enfatiza en un sector o proceso productivo particular.*

En los capítulos previos se desarrolló la definición formal del método para la programación de la producción, enfatizando en la identificación de tareas y flujos de información, así como también en el respectivo modelado estructural y dinámico. Previo a la aplicación de estos modelos en un entorno de fabricación, la empresa debe tener en cuenta ciertas consideraciones, el procedimiento descrito en el presente capítulo tiene como objetivo resumir dichas consideraciones y demás aspectos necesarios para una aplicación eficiente, de los conceptos definidos en el método, en un sistema de manufactura o un proceso de producción en específico.

Cabe resaltar que el proceso de aplicación de los modelos diseñados en el método, por parte de una empresa, se desarrolla de forma ágil y práctica debido al carácter genérico de dichos modelos, es decir, el diseño de estos no se basó en un proceso productivo específico. Por último, se destaca el hecho de que el procedimiento propuesto en el presente capítulo, se enfoca en facilitar la aplicación del método en un sistema de manufactura asociado a un proceso productivo específico (en este trabajo se toma como caso de estudio el proceso productivo de embutidos, para la etapa de ejemplarización del método desarrollada en el Capítulo 6), sin embargo, el procedimiento propuesto no tiene como objetivo primordial la identificación de requerimientos ni demás especificaciones tecnológicas necesarias para una posterior fase de diseño y desarrollo software.

Así, el *Procedimiento para la aplicación del método para la programación de la producción* se compone de las siguientes 6 etapas:

## 5.1 Recolección de información

La primera etapa en la mayoría de procedimientos enfocados en la ejecución de cualquier tipo de proyecto, hace referencia a la *recolección de información*, en la cual se recopilan y se analizan los datos necesarios para una posterior fase de diagnóstico del estado actual de la empresa en términos de productividad, eficiencia u otra índole, según la finalidad del proyecto. Para el caso, el objetivo principal de esta etapa es recolectar información referente al proceso productivo en específico, enfatizando en la identificación de operaciones, insumos, equipos y demás aspectos relacionados a la elaboración del producto. Así como también, se recopila información referente a la función de programación de la producción, con el objetivo de conocer la forma en que actualmente se desarrolla dicha función en la empresa.

La recolección de información debe desarrollarse de forma estructurada, en la literatura, y dependiendo de la finalidad, se encuentran múltiples técnicas para realizar esta actividad. Para el caso se resaltan dos, la primera de ellas hace referencia a la recopilación de información en base a un proceso de observación o inspección, por ejemplo, se dispone de un personal que está en la capacidad de observar directamente el proceso productivo y extraer la información relevante para identificar todos los recursos involucrados en la elaboración del producto. La segunda técnica es la entrevista, la cual se utiliza para obtener información de forma verbal y para el caso del procedimiento propuesto, permite corroborar la validez de la información previamente obtenida. Cabe resaltar que el personal representa un elemento fundamental dentro de una empresa, puesto que tiene el conocimiento de las diversas tareas y procesos que se efectúan internamente en la organización, por esta razón, la entrevista es de gran importancia en la etapa de recolección de información.

## 5.2 Familiarización con el estándar ISA

El método propuesto en el presente trabajo se fundamenta en conceptos definidos en el estándar ISA, los niveles dentro de un sistema de manufactura, los modelos estructurales y funcionales, múltiples tareas y flujos de información, así como terminología y otras definiciones de los estándares ISA fueron tomadas como referencia para el desarrollo del método para la programación de la producción. Por ello, se hace importante una fase de familiarización previa con estos estándares, en específico, se sugiere que el personal involucrado en la aplicación del método comprenda los conceptos definidos en el estándar ISA 95, enfatizando en *el modelo jerárquico funcional, el modelo de flujo de datos funcional, y el modelo de actividades de administración de operaciones de producción*.

Se sugiere también conocer ciertos conceptos del estándar ISA 88 para representar de forma eficiente la estructura del proceso productivo. Puntualmente, el *modelo de control de procedimiento*, el cual enfatiza en la definición de recetas de producción

(récipes), este modelo se utiliza como referencia para representar las reglas de producción empleadas en el método, tal como se desarrolló en la sección 3.3 para el proceso productivo ejemplo. Por último, se sugiere adaptar la noción característica del *modelo de equipos* definido en el estándar ISA 95, la cual propone agrupar los equipos en base a su capacidad operacional, de esta manera se tiene un consolidado de todos los equipos de la organización, de fácil acceso, según la necesidad operacional que se requiera para desarrollar el programa de producción.

### **5.3 Verificación de tareas, interfaces y flujos de información de la función de programación de la producción**

En la sección 1.5 del presente trabajo se desarrolla un análisis funcional de la programación de la producción, el cual concluye con la especificación de tareas, interfaces y flujos de información que aplican para el método. En esta fase se verifica el cumplimiento de cada una de estas especificaciones en la empresa o sistema de manufactura. Cabe resaltar que algunos de estos ítems pueden encontrarse en la empresa con un nombre diferente, por tal motivo, se debe tener en cuenta la adaptación de terminología por parte de la organización. Se debe hacer énfasis en identificar flujos de información y tareas que la empresa no realice de forma directa, y efectuar el respectivo análisis de las causas y consecuencias que esto puede generar en el sistema de manufactura. Igualmente, es necesario identificar flujos de información y tareas que la empresa efectúe, pero no estén contempladas en el presente trabajo. El objetivo general de esta etapa es determinar el estado actual de la organización en relación a la función de programación de la producción.

### **5.4 Difusión de la visión holónica**

En esta etapa se pretende que el personal involucrado en la aplicación del método adquiera el conocimiento necesario en el área de los sistemas holónicos de manufactura. No se pretende que al finalizar esta etapa el personal cuente con un alto conocimiento en los HMS, pero se procura que en general se entienda la visión o filosofía holónica aplicada en el método para la programación de la producción. Destacando las principales ventajas que este paradigma ofrece respecto a los requerimientos actuales de la industria. Al igual que se sugiere hacer énfasis en el entendimiento de conceptos como holarquía, arquitectura de la UPH y las propiedades de los holones en general. En el capítulo 2 y en específico en la sección 2.2 se profundizan en los conceptos holónicos aplicados en esta tesis.

## **5.5 Reconocimiento del flujo de trabajo desarrollado por el método**

La definición y estructuración del método para la programación de la producción se desarrolla en base a la aplicación de modelos enfocados en diversas perspectivas, empleados para representar el flujo de trabajo intrínseco al método. El objetivo principal de esta etapa es identificar, dentro del método, las actividades, sub-actividades, tareas, flujos de información que soportan dichas actividades y los responsables o actores que las ejecutan. Los modelos estructural y dinámico, permiten representar todos estos elementos y consolidar el flujo de trabajo general que sigue el método para desarrollar la función de programación desde la perspectiva holónica. Esta etapa tiene como finalidad que el personal comprenda los modelos desarrollados para el método antes de aplicarlos en su respectiva empresa, adicionalmente, y con el fin de mejorar la comprensión y promover el uso de las técnicas de modelado utilizadas en esta tesis, se presenta en el **Anexo C** los conceptos básicos de dichas técnicas.

## **5.6 Aplicación de los modelos definidos en el método para la programación de la producción**

Como se mencionó anteriormente el método está fundamentado en la definición de modelos genéricos, aplicables de forma ágil y eficiente a sistemas de manufactura de diversos sectores productivos. Esta etapa final tiene como objetivo la aplicación de dichos modelos, partiendo de las bases conceptuales previamente concretadas. Se sugiere seguir el orden de elaboración de los modelos indicado en el presente trabajo, así como también, se resalta el hecho que se pueden presentar ciertas incompatibilidades al aplicar los modelos, es decir, aunque estos modelos son genéricos se deben desarrollar (si es necesario) algunas adaptaciones según las características propias de la empresa.

De esta manera, se concluye con el procedimiento para la aplicación del método para la programación de la producción desde el enfoque holónico, en el próximo capítulo se efectúa el proceso de ejemplificación del método, basándose en las seis etapas previamente definidas.

## Capítulo VI

# Ejemplificación del Método para la programación de la producción

*En este capítulo se expone los resultados de la fase de ejemplificación del método en un caso de estudio, para ello se utiliza el proceso de elaboración de embutidos y con el fin de llevar a cabo esta fase se siguen las seis etapas definidas en el procedimiento del capítulo anterior. El objetivo de este capítulo es demostrar las cualidades y ventajas de los modelos, y del método en general, cuando se aplica en un entorno de manufactura.*

En los capítulos 3 y 4 del presente trabajo se presenta la definición formal del método para la programación de la producción desde el enfoque holónico, en este capítulo se llevan a cabo las etapas definidas en el procedimiento para la aplicación del método en un caso de estudio, concretamente el proceso de elaboración de embutidos. El proceso de ejemplificación tiene como objetivo exponer la facilidad del uso de los conceptos y modelos planteados, así como la eficiencia del método en un entorno de manufactura. En la selección del caso de estudio se tuvo en cuenta que fuera posible aplicar nociones holónicas como la formación de holarquías, en base a la flexibilidad, agilidad y variabilidad propia del proceso productivo.

De esta manera, para iniciar el proceso de ejemplificación, se considera la primera fase especificada en el procedimiento propuesto en el capítulo anterior, referente a la ***Recolección de información***, como se puntualizó anteriormente, el objetivo de esta fase es recopilar la información necesaria para detallar el proceso productivo, al igual que la estructura general del sistema de manufactura en sí. Los resultados de esta fase se exponen en el **Anexo D** – Secciones 1 y 2, en los cuales se efectúa una descripción básica de la industria de los embutidos, así como también se detalla el proceso productivo en específico.

La segunda fase en el procedimiento hace referencia a la ***Familiarización con el estándar ISA***, siguiendo las recomendaciones de esta fase se aplican los conceptos y los modelos definidos en los estándares ISA-88 e ISA-95, puntualmente el *modelo de control de procedimientos* (reglas de producción), y *el modelo de equipos*. Los resultados de esta fase se exponen en el **Anexo D** – Sección 3.

La tercera fase, ***Verificación de tareas, interfaces y flujos de información de la función de programación de la producción***, se enfoca en identificar la correlación entre las especificaciones definidas para el método con las tareas reales de la función de programación de la producción dentro de una empresa, como el caso de estudio no está asociado directamente a una compañía de embutidos en específico, esta fase se omite.

Las fases cuarta y quinta del procedimiento, *Difusión de la visión holónica y Reconocimiento del flujo de trabajo desarrollado por el método para la programación de la producción*, tienen como objetivo contextualizar a los integrantes de la empresa con las nociones holónicas y con los conceptos y modelos definidos para el método, así es imprescindible que los integrantes de la empresa realicen estas dos fases previo a la ejecución de la última fase de aplicación de los modelos del método.

Por último se exponen los resultados de la fase de *Aplicación de los modelos definidos en el método para la programación de la producción*, como se especificó anteriormente, estos modelos son genéricos, por eso se facilita su directa aplicación o adaptación (según el caso) al proceso productivo específico. Para el caso de estudio del proceso productivo de los embutidos se sigue el orden expuesto en el método para la aplicación de los modelos, enfatizando en los diagramas de secuencia definidos en la sección 3.3. Cabe resaltar que la aplicación de los modelos depende del nivel de implementación determinado por cada empresa en particular para su respectivo proyecto, por ejemplo, si el objetivo de la empresa se enfoca en el diseño formal de un prototipo software que desarrolle el método para la programación de la producción, se sugiere la aplicación del modelado dinámico con el fin de basar dicho diseño en el fundamento matemático de las redes de Petri y la supervisión de sistemas a eventos discretos.

El primer modelo que se aplica al caso de estudio es el diagrama de secuencia de la *Subfunción de programación de la producción (Actividad A2)*, expuesto en la Figura 3.8 y descrito a detalle en la sección 3.3.1. El flujo de trabajo definido en este modelo empieza con la recepción de una o múltiples órdenes de producción por parte del componente misión de la UPH, en la Tabla 6.1 se expone las 3 órdenes de producción que se consideran para el caso de estudio (se utiliza el esquema expuesto en la Tabla 3.3).

	<b>Código</b>	<b>Tipo de Producto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Prioridad</b>	<b>Fecha de Recepción</b>	<b>Fecha de Entrega</b>
<b>Orden de Producción 1</b>	O1	Salchichas Frankfurter (FK)	48 Cajas	Alta	5/10/2014 7:05 am	6/10/2014 4:00 pm
<b>Orden de Producción 2</b>	O2	Salchichas Frankfurter (FK)	12 Cajas.	Alta	5/10/2014 7:10 am	7/10/2014 4:30 pm
		Salami (SL)	40 Cajas			
<b>Orden de Producción 3</b>	O3	Salami (SL)	10 Cajas	Media	5/10/2014 7:15 am	7/10/2014 5:00 pm
		Salchichas Frescas de Cerdo (SFC)	20 Cajas			

**Tabla 6.1: Ordenes de producción del caso de estudio.**

Después del respectivo proceso de evaluación, se confirman las 3 órdenes al componente ingeniería, antes de iniciar el proceso de programación. Seguidamente este componente

revisa las reglas de producción necesarias para la elaboración de los productos definidos en cada una de las órdenes. Para el caso se requiere las reglas de los productos: salchichas Frankfurter (FK), Salami (SL) y salchichas frescas de cerdo (SFC), estas reglas de producción se definieron en la etapa previa de aplicación del estándar ISA, y se encuentran en el **Anexo D** – Sección 3. En base a la secuencia de operaciones definida en estas reglas, el componente ingeniería de la UPH establece el *programa de producción*, donde se encuentran inmersos los requerimientos operacionales necesarios para el cumplimiento de las órdenes O1, O2 y O3. En la Figura 6.1 se expone el programa de producción, resultante de la aplicación del primer modelo del método, al caso de estudio de embutidos (la explicación del esquema utilizado para el programa de producción se encuentra en la Figura 3.10).

El segundo modelo que se aplica al caso de estudio es el diagrama de secuencia de la actividad A3, referente al *proceso de asignación (acuerdo)*, expuesto en la Figura 3.11 y descrito a detalle en la sección 3.3.2. El flujo de trabajo definido en este modelo se basa en el protocolo ContractNet e inicia con la recepción del *programa de producción* de la Figura 6.1, obtenido en la etapa anterior. En base a este programa, el componente misión de la UPH solicita ofertas a los holones recurso, para el caso de estudio se identifican 36 requerimientos operacionales asociados al cumplimiento de 3 órdenes de producción, para facilitar la comprensión del proceso de asignación, se explican cinco de estos requerimientos, asociados directamente con la operación de molienda, dichos requerimientos son: [Op. Molienda/675Kg/Carne Curada A], [Op. Molienda/477Kg/Carne Curada B], [Op. Molienda/168Kg/Carne Curada A], [Op. Molienda/300Kg/Carne C] y [Op. Molienda/119Kg/Carne Curada B], de esta manera, para el primer requerimiento se necesita efectuar la operación de molienda a 675 Kg de carne curada tipo A<sup>12</sup>, para el segundo se necesita efectuar la operación de molienda a 477 Kg de carne curada tipo B, y así para los demás requerimientos. Los HR reciben estos requerimientos, y seguidamente consultan internamente la información necesaria para elaborar su respectiva oferta, para el caso, los HR que participan en este proceso de asignación son los equipos Tipo II<sup>13</sup> (HR5, HR6 y HR7), en base a la capacidad operacional de molienda de estos recursos (en el **Anexo D** – Sección 3 se definen las características de todos los equipos disponibles en el sistema). Como primera tarea, el HR revisa su cronograma de producción con el fin de identificar los intervalos de tiempo libre disponibles para la ejecución de un proceso de molienda, además de esto, se tienen en cuenta otros elementos de análisis como costos operacionales y aspectos de calidad. Con base a la información previamente recolectada el HR elabora su respectiva oferta y la transmite al componente misión de la UPH, a través del vector de estados. En la Figura 6.2 se exponen los vectores de estado de los HR que participan en este proceso de asignación (la explicación del esquema del vector de estados se encuentra en la Figura 3.12).

---

<sup>12</sup> Como se explica en anexos, se asocian materias primas, insumos y productos intermedios a un tipo de producto específico, así los elementos con la etiqueta “A” se relacionan con las salchichas Frankfurter, los “B” con el Salami y los “C” con las salchichas frescas de cerdo

<sup>13</sup> De acuerdo a la clasificación especificada en la Tabla 3 del Anexo D – Sección 3.

**Figura 6.1: Programa de producción del caso de estudio.**  
Fuente propia.

HR5 0	Disponibile 1	Op. Molienda 2	300 Kg 3	8:00–10:00 4	\$500/min 5	2 min 6
HR6 0	Disponibile 1	Op. Molienda 2	900 Kg 3	8:00–17:00 4	\$1450/min 5	2 min 6
HR7 0	Disponibile 1	Op. Molienda 2	310 Kg 3	8:00–17:00 4	\$600/min 5	2 min 6

**Figura 6.2: Vector de estado de los HR Tipo II del caso de estudio.**  
Fuente propia.

Para el caso, el componente misión de la UPH recibe 3 vectores de estado, asociados a las ofertas de los HR5, HR6 y HR7 para ejecutar las operaciones de molienda, con esta información y basándose en los criterios de asignación definidos por la empresa, se eligen las ofertas factibles y se establece el *programa detallado de producción*, en este programa se define la secuencia de operaciones en el tiempo, necesarias para la elaboración de los productos identificados en las órdenes de producción O1, O2 y O3, junto con la respectiva asignación de equipos a operaciones (cabe resaltar que una empresa real recibe un mayor volumen de órdenes de producción, este hecho se considera para la elaboración del programa detallado y por tal motivo en dicho programa se tiene en cuenta la reserva de equipos asociada a otras órdenes de producción). En la Figura 6.3 se observa el programa detallado de producción para el caso de estudio de embutidos, en el programa se puede observar cómo se procesó el caso de las cinco solicitudes de operación de molienda, de esta manera, para la solicitud [Op. Molienda /300Kg/ Carne C] se aceptó la oferta del HR7 y se asignó el total de la capacidad de procesamiento a este equipo, las solicitudes [Op. Molienda/ 675Kg/Carne Curada A] y [Op. Molienda/168Kg/Carne Curada A] asociadas a las órdenes de producción O1 y O2 respectivamente, se unificaron debido a que representan una misma fase dentro de la regla de producción del producto “Salchichas Frankfurter”, así mismo se asignó al HR6 la suma total de cantidad de materia prima a procesar (843 Kg de Carne Tipo A) para estas operaciones. Por último, las solicitudes [Op. Molienda/477Kg/Carne Curada B] y [Op. Molienda/119Kg/Carne Curada B], asociadas a las órdenes de producción O2 y O3 respectivamente, nuevamente se unificaron, y se aceptaron las ofertas de los recursos HR5 y HR7, distribuyendo la capacidad de procesamiento (291 Kg para HR5 y 305 Kg para el HR7) con el fin de optimizar el uso de los recursos. De esta misma forma, se procesan las demás solicitudes definidas en el programa de producción y se estructuran en el programa detallado de producción de la Figura 6.3 (dentro del programa detallado de producción, las operaciones precedidas por el símbolo “\*”, indican fases con una extensa duración dentro de la regla de producción; la explicación general del esquema utilizado para el programa de detallado producción se encuentra en la Figura 3.14).

**Figura 6.3: Programa detallado de producción del caso de estudio.**  
Fuente propia.

El tercer modelo que se aplica al caso de estudio es el diagrama de secuencia de la actividad A4, referente a la *configuración de la producción*, expuesto en la Figura 3.18 y descrito a detalle en la sección 3.3.3. En esta etapa, se toma como referencia el *programa detallado de producción* previamente definido, con el fin de establecer las holarquías dentro de la UPH y definir las misiones particulares para cada holón recurso. En la Figura 6.4 se expone la configuración final de la UPH para el caso de estudio de embutidos, donde se establecen 3 holarquías, asociadas a cada orden de producción, de esta manera la *Holarquía 1* está compuesta por todos los HR que participan en el cumplimiento de las operaciones definidas en el programa de producción para la orden O1, dichos holones recurso son HR3, HR6, HR8, HR9, HR10, HR11, HR12, HR13 y están delimitados dentro de la línea punteada roja. La *Holarquía 2* está compuesta por todos los holones recurso de la UPH, los cuales están directamente involucrados en la elaboración de los productos definidos en la orden de producción O2, y dicha holarquía está delimitada por línea punteada azul. La *Holarquía 3* está asociada a la orden O3 y está compuesta por los holones recurso HR1, HR2, HR4, HR5, HR7, HR8, HR9, HR10, HR11, HR13 y está delimitado por la línea punteada verde.

Después de establecer el programa detallado de producción y determinar en base a este la configuración final de la UPH, se procede a desarrollar el proceso de ejecución de la producción (por fuera del alcance de esta tesis). Con el fin de monitorear este proceso, y asegurar el cumplimiento de las órdenes de producción se sigue el flujo de trabajo definido en el último modelo del método para la programación de la producción, referente al diagrama de secuencia de la actividad A5, de *monitoreo y reconfiguración del programa detallado de producción* (expuesto en la Figura 3.19 de la sección 3.3.4). Cabe resaltar que en este modelo se efectúa un proceso de monitoreo enfocado en el seguimiento del avance de las misiones locales definidas para cada holón recurso, también se establece el flujo de trabajo a seguir cuando se presente una falla en el sistema que ponga en riesgo el cumplimiento de dichas misiones. Así mismo, cuando se concluya con éxito la ejecución del programa detallado de producción, se define el flujo de trabajo asociado al procesamiento final de las órdenes de producción, enfatizando en la notificación de desempeño de la producción y cantidad de productos terminados.

De esta forma se finaliza con el flujo de trabajo total desarrollado por el método, concluyendo así con la fase de aplicación de modelos y de forma general con el proceso de ejemplificación del método en el caso de estudio de embutidos. Finalmente se resalta las ventajas que ofrece el método en un sistema de manufactura, se destaca la facilidad y el nivel práctico en la aplicación y adecuación de los modelos en un entorno de fabricación. Observando la coherencia entre los modelos, flujos de información e interfaces, así como también la eficiencia del método para desarrollar la programación de la producción desde el enfoque holónico.

**Figura 6.4: Configuración de la UPH para el caso de estudio.**  
Fuente propia.

## CONCLUSIONES

- El sector manufacturero del siglo XXI debe adaptarse a un entorno altamente volátil, en el cual se presentan continuamente múltiples cambios en las tendencias económicas y tecnológicas, así como también en los requerimientos de los clientes, por lo tanto es necesario fundamentar sus procesos en una estructura ágil y flexible, que permita mantener la productividad, calidad y eficiencia total del sistema de manufactura.
- Se resalta la importancia del uso de estándares internacionales en automatización para desarrollar el proceso de conceptualización de la función de programación de la producción, además de ser útil en muchas otras áreas de los ámbitos de manufactura. Los estándares proveen conceptos, terminología, modelos, entre otros aspectos relevantes para cualquier tipo de organización y fácilmente adaptables por su carácter genérico. En base a los elementos definidos por estos estándares se fundamentó la identificación de las tareas, flujos de información e interfaces que aplican para la función de programación de la producción en la mayor parte de empresas de manufactura.
- Después de identificar las tendencias que conducen el sector industrial, se resalta el paradigma holónico como una solución prometedora frente a los nuevos requerimientos de los sistemas de manufactura, en base a propiedades inherentes de los HMS como la autonomía y capacidad de cooperación se mantiene un equilibrio entre la distribución de conocimiento y toma de decisiones, y la optimización global del sistema, adoptando características mixtas entre los esquemas jerárquico y heterárquico.
- En el presente trabajo se logró formular un método que desarrolla la función de programación de la producción desde el enfoque holónico, como resultando final se obtuvo un método genérico del cual se resaltan atributos holónicos como la autonomía, fundamentada en el trabajo orientado al cumplimiento de objetivos locales para cada holón, el monitoreo continuo de estas misiones locales le brinda al sistema los atributos de reactividad y proactividad, la propiedad de cooperación se observa en la configuración final de la UPH, los atributos de recursividad, auto-similaridad y escalabilidad se encuentra intrínsecos en la noción de formación de holarquías, y por ultimo las propiedades de agilidad y flexibilidad se fundamentan en la estructura misma de la UPH y la capacidad de reconfiguración de los recursos asignados en el programa detallado de producción.
- Dentro de la función de programación de la producción, es de gran importancia desarrollar un adecuado proceso de asignación de recursos, para el caso puntual del método, se enfatizó en lograr una asignación eficiente de equipos a operaciones, fundamentada en la capacidad de acuerdo de misiones entre los HR y el componente

---

misión de la UPH, en base a la amplia disponibilidad de información respecto a múltiples criterios de análisis y selección que se deben tomar en cuenta para dicho proceso de asignación.

- El proceso de supervisión orientado al monitoreo del avance de misiones locales para HR, permite asegurar la factibilidad y el cumplimiento de las metas de productividad global del sistema de manufactura.
- El método para la programación de la producción propuesto en el presente trabajo se fundamenta en la aplicación de modelos genéricos, estos modelos fueron desarrollados en base a técnicas de modelado estructural y dinámico como IDEF0, UML y WF-Net. El esquema IDEF0 permite identificar todos los flujos de información y las actividades involucradas en la función de programación de la producción, el diagrama de secuencia de UML muestra la interacción entre los componentes de la UPH para desarrollar las actividades previamente identificadas. Por otra parte, WF-Net permite modelar y validar el flujo de trabajo que lleva a cabo el método para desarrollar la función de programación desde el enfoque holónico. Se resalta así, la importancia de la fase de modelado dentro de cualquier proyecto en el sector industrial.
- La etapa de ejemplificación permitió comprobar la coherencia y eficiencia del método cuando se aplica y/o adapta en un entorno de manufactura de considerable variabilidad. Además, se observa la fácil aplicación, de los modelos y conceptos definidos en el método, en un proceso productivo, identificando múltiples ventajas y beneficios asociados a las propiedades holónicas del método.
- El alcance de esta tesis se centra en desarrollar el proceso de conceptualización y modelado de un método para la programación de la producción desde el paradigma de los HMS, el próximo reto se enfoca en buscar las herramientas y aplicaciones tecnológicas de desarrollo software y hardware para procurar una implementación o adaptación eficiente del método en una empresa de manufactura establecida.
- Con esta tesis se resalta la importancia de continuar con proyectos orientados a los diferentes ámbitos dentro de un sistema de manufactura, los cuales permitan mejorar la productividad y competitividad general de las empresas del sector.

## REFERENCIAS

- [1] P. Sousa, C. Ramos y J. Neves, “The Fabricare system: a multi-agent-based scheduling prototype”, *Production Planning & Control*, vol. 15, no. 2, pp. 156-165, Marzo, 2004.
- [2] P. Palominos, “Personalización en Masa: ¿Una Nueva Forma de Producción?”, *Contribuciones Científicas y Tecnológicas*, vol. 43, no. 134, pp. 20-30, 2007.
- [3] L. Gou, P. Luh y Y. Kyoya, “Holonc manufacturing scheduling: architecture, cooperation mechanism, and implementation”, *Computers in Industry*, vol. 37, pp. 213-231, 1998.
- [4] IMS2020 Consortium, “Roadmap on Sustainable Manufacturing, Energy Efficient Manufacturing and Key Technologies”, 2010.
- [5] A. S. Giret, “ANEMONA: Una Metodología Multi-agente para Sistemas Holónicos de Fabricación, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2005.
- [6] E. A. Chacón, J. M. Velasco y O. A. Rojas, “Principios de programación y control de la producción bajo un enfoque holónico”, 2006.
- [7] S. H. Minhas, C. Lehmann, J. P. Städter y U. Berger, “Reconfigurable Strategies for Manufacturing Setups to Confront Mass Customization Challenges”, presentado en 21st International Conference on Production Research, Stuttgart, Alemania, 2011.
- [8] P. J. Leitão, “An Agile and Adaptive Holonic Architecture for Manufacturing Control, Tesis Doctoral, University of Porto, Portugal, 2004.
- [9] G. Zapata, “Propuesta para la planificación, programación, supervisión y control de la producción en procesos continuos desde la teoría del control supervisorio y el enfoque holónico”, Tesis Doctoral, Universidad de Los Andes, Venezuela, 2011.
- [10] L. Bongaerts, “Integration of Scheduling and Control in Holonic Manufacturing Systems”, Tesis Doctoral, Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica, 1998.
- [11] ISA-95.03, “Enterprise Control System Integration Part 3: Activity Models of Manufacturing Operations Management”, American National Standard, USA, 2005.
- [12] P. J. Leitão, “Agent based distributed manufacturing control: A state of the art survey”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 22, no. 7, pp. 979-991, Noviembre, 2008.

- 
- [13] L. Wang y Q. Hao, “Agent based distributed manufacturing process planning and scheduling: A state of the art survey”, *IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics*, vol. 36, no. 4, pp. 563 - 577, Julio, 2006.
- [14] W. Shen, Q. Hao, H. J .Yoon y D. H. Norrie, “Applications of agent based systems in intelligent manufacturing: An updated review”, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 36, no. 20, pp. 415 - 431, Mayo, 2006.
- [15] P. Blanc, I. Demongodin y P. Castagna, “A holonic approach for manufacturing execution system design: An industrial application”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 21, no. 20, pp. 315 - 330, Abril, 2008.
- [16] H.V. Brussel, “Reference Architecture For Holonic Manufacturing Systems”, Tesis Doctoral, Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica, 1999.
- [17] D. E. Shobrys y D. C. White, “Planning, scheduling and control systems: why cannot they work together”, *Computers and Chemical Engineering*, vol. 26, no. 20, pp. 149 - 160, Septiembre, 2002.
- [18] A. Kovács, “Novel Models and Algorithms for Integrated Production Planning and Scheduling”, Tesis Doctoral, Universidad de Tecnología y Economía de Budapest, Hungría, 2005.
- [19] J. W. Herrmann, “The legacy of Taylor, Gantt, and Johnson: how to improve production scheduling”, University of Maryland, Argonne, Francia, ISR Technical Report 2007-26.
- [20] MESA International – White Paper Number 2, “MES Functionalities & MRP to MES Data Flow Possibilities”, USA, 1997.
- [21] Z. Li y M. G. Ierapetritou, “Production planning and scheduling integration through augmented Lagrangian optimization”, *Computers and Chemical Engineering*, vol. 34, no. 6, pp. 996 - 1006, Junio, 2010.
- [22] P. J. Leitão, F. Restivo, “A holonic approach to dynamic manufacturing scheduling”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 24, no. 5, pp. 625 - 634, Octubre, 2008.
- [23] L. Merkerta, I. Harjunkoskia, A. Isakssonb, S. Säynevirtac, A. Saarelac y G. Sand, “Scheduling and energy – Industrial challenges and opportunities”, *Computers and Chemical Engineering*, Mayo, 2014.
- [24] Bianca Scholten. “The Road to Integration, A Guide to Applying the ISA-95 Standard in Manufacturing”, USA, 2007.

- 
- [25] C. Gifford, D. Noller y E. delaHostria, “OAGIS, ISA-95 and Related Manufacturing Integration Standards A Survey”, IBM Corp, Rockwell Automation, GE-Fanuc, 2006.
- [26] ISA-95.01, “Enterprise Control System Integration Part 1: Models and Terminology”, American National Standard, USA, 2000.
- [27] MESA International – White Paper Number 6, “MES Explained: A High Level Vision”, USA, 1997.
- [28] A. C. Montalvo, A. G. Higuera y C. Peinado, “Sistema de control de la producción basado en agentes: Metodología PROHA”, presentado en IX Congreso de Ingeniería de Organización, Gijón, España, 2005.
- [29] H. V. Brussel, L. Bongaerts, J. Wyns, P. Valckenaers y T. V. Ginderachter, “A Conceptual Framework for Holonic Manufacturing: Identification of Manufacturing Holons”, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 35–52, 1999.
- [30] O. Rojas, J. M. Velasco y E. A. Chacón, “Principios de un Modelo Dinámico para Integración Empresarial: Un enfoque desde los Sistemas Holónicos de Manufactura - HMS”, Colombia, 2013.
- [31] J. E. Palacio, “Una propuesta para distribuir el coordinador de una unidad de producción holónica a partir de la teoría de control supervisorio”, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2013.
- [32] R. G. Smit, “The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in Distributed Problem Solver”, *IEEE Transactions on Computers*, vol. c-29, no. 12, pp.1104 - 1113, 1990.