

**ESTRUCTURA DE CONTROL PARA PROCESOS DE PRODUCCIÓN DESDE EL  
PARADIGMA DE LOS SISTEMAS HOLÓNICOS DE MANUFACTURA**



**LUIS ALBERTO CRUZ SALAZAR**

Tesis de Maestría en Ingeniería Electrónica

Director:

Ing. Oscar Amaury Rojas Alvarado  
Magíster en Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

**Universidad del Cauca convenio Escuela Naval Almirante Padilla  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Línea de Investigación de Automatización  
Cartagena de Indias D.T. y C.  
2017**

**LUIS ALBERTO CRUZ SALAZAR**

**ESTRUCTURA DE CONTROL PARA PROCESOS DE  
PRODUCCIÓN DESDE EL PARADIGMA DE LOS  
SISTEMAS HOLÓNICOS DE MANUFACTURA**

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería  
Electrónica y Telecomunicaciones de la  
Universidad del Cauca para la obtención del  
Título de:

Magíster en Ingeniería Electrónica

Director:  
Ing. Oscar Amaury Rojas Alvarado (MSc.)  
PhD (c) Ciencias Aplicadas, área Automatización Industrial

**Cartagena de Indias D.T. y C.  
2017**

*A la memoria de mi abuela Rosalbina Cruz*

*In loving memory of my grandmother Rosalbina Cruz*

*“Confía en el SEÑOR con todo tu corazón, y no te apoyes en tu propio entendimiento.  
Reconócelo en todos tus caminos, y El enderezará tus sendas...”*

**Proverbios 3:5**

*“Trust in the LORD with all your heart and do not lean on your own understanding.  
In all your ways acknowledge Him, and He will make your paths straight...”*

**Proverbs 3:5**

# Agradecimientos

Este trabajo está dedicado en primera instancia a Dios el Señor todo poderoso. Es quien siempre me otorga la oportunidad de obtener mi desarrollo personal y profesional, de la mejor manera posible. De la misma forma, a mi hija *Mariana Lucero Cruz Algarra* y a toda mi familia por su constante apoyo moral y financiero. Soy consciente que he sacrificado años valiosos con cada uno de ellos.

También agradezco a mi director de tesis, profesor *Oscar Amaury Rojas Alvarado* y demás planta docente, de la Escuela Naval Almirante Padilla y de la Universidad del Cauca. Gracias a su pertinente conocimiento y su constante colaboración, obtuve el aprendizaje necesario para realizar esta tesis.

Agradecido igualmente con el Ingeniero *Rodrigo Achury Duarte* y a la empresa *ICL Didáctica*, quienes me facilitaron su apoyo mediante las herramientas computacionales de alta calidad y desempeño, como lo fue el aplicativo *Factory I/O®*.

Este trabajo está dedicado a mis amigos, colegas y compañeros de estas y de otras instituciones. El compartir sus experiencias dentro y fuera de este ámbito, ha aumentado mi calidad de vida. Hoy me siento satisfecho del trabajo adelantado y con miras de seguir aportando a esta fascinante área.

# Resumen Estructurado

En los últimos años se encuentra la necesidad de establecer nuevas estructuras de control en sistemas de fabricación. Existen requerimientos que se derivan de las complejas exigencias del mercado actual, que no se abarcan por los esquemas tradicionales de tipo jerárquico. Por tal motivo nuevos modelos hacen frente a estas demandas, como los basados en entidades inteligentes, que son hoy en día realidad. Estos modernos paradigmas surgen debido a que las técnicas de programación juegan un papel cada vez más importante, dentro de los sistemas de producción distribuida (no jerárquico). Un caso particular son los holones, que se consideran software de entidades autónomas e inteligentes. Un holón puede contener un recurso físico que se conecta mediante protocolos adecuados de comunicación, como el que se encuentra estandarizado por la norma IEC 61499.

En este trabajo se propone validar una estructura de control para procesos de producción, desde el paradigma de los Sistemas Holónicos de Manufactura o HMS. Este objetivo se soporta desde la teoría desarrollada en los sistemas dinámicos a eventos discretos, de manera que se satisfagan las propiedades de autonomía, flexibilidad, cooperación, proactividad y reactividad de la arquitectura holónica.

La metodología que se plantea es de tipo holística. Primero se comparan las definiciones, ventajas y desventajas –entre otras características– de las arquitecturas tradicionales de cara a los sistemas de fabricación holónicos. Desde esta perspectiva, posteriormente se presentan las técnicas y teorías en la supervisión y el control de sistemas de producción, de acuerdo a los niveles de ISA-95. Al final se desarrolla y se valida un HMS, que se implementa sobre un caso de estudio.

En los resultados que se obtienen, se describe el sistema HMS a un nivel detallado y basado en modelos con UML, IDEF0 y Redes de Petri. Se caracteriza la arquitectura holónica de forma estructural y dinámica. Luego se valida mediante el uso de un controlador lógico programable, sobre una planta en 3D con Factory I/O. El autómata PLC se programa con las normas IEC 61131-3 e IEC 61499-1 y se logra conectar a una interfaz hombre máquina (HMI), para interactuar con el sistema.

Se concluye que el HMS implementado tiene las propiedades holónicas mínimas de autonomía, cooperación y reactividad. Además, este es más eficiente porque está orientado al cumplimiento de misiones y metas globales. Se considera una arquitectura adaptable a cambios y robusta ante posibles perturbaciones. Este trabajo se prevé como una fuente de información de valor significativo para futuras propuestas en HMS. Esta tesis es útil para desarrollo de sistemas automatizados industriales de tipo inteligente, y basados en la Unidad Holónica de Producción UPH.

Palabras clave: Unidad de Producción Holónica, Sistemas Holónicos de Manufactura, Automatización Industrial, Sistemas Inteligentes de Manufactura, IEC 61499.

# Structured Abstract

In recent years there is a need to establish new control structures in manufacturing systems. There are requirements that derive from the complex demands of the current market, which are not covered by traditional hierarchical schemes. For this reason, new models face these demands, such as those based on intelligent entities, which are nowadays reality. These modern paradigms arise because programming techniques play an increasingly important role in distributed (non-hierarchical) production systems. A particular case is the holons, which are considered software of autonomous and intelligent entities. A holon may contain a physical resource that is connected by suitable communication protocols, such as the IEC 61499 standard.

In the present work, it is proposed to validate a control structure for production processes, from the Holonic Systems or HMS paradigm. This objective is supported by the theory developed in dynamic systems to discrete events, so as to satisfy the properties of autonomy, flexibility, cooperation, proactivity and reactivity of holonic architecture.

The methodology is holistic. First, the definitions, advantages, and disadvantages –among other characteristics– of traditional architectures for holonic manufacturing systems are compared. From this perspective, the techniques and theories are presented in the supervision and control of production systems, according to ISA-95 levels. At the end, an HMS is developed and validated, through a case study implementation.

On the results obtained, the HMS system is described at a detailed level and based on models with UML, IDEF0 and Petri Nets. Structural and dynamic holonic architecture is characterized. It is then validated by the use of a programmable logic controller, on a plant in 3D with Factory I / O. The PLC is programmed according to the IEC 61131-3 and IEC 61499-1 standards and It can be connected to a human-machine interface (HMI), in order to interact with the system.

It is concluded that the architecture implemented has minimal holonic characteristics, such as autonomy and cooperation. It is also more efficient because it is geared towards fulfilling global missions and goals. It is considered an HMS architecture adaptable to changes and robust to possible disturbances. This work is envisaged as a source of information of significant value for future proposals in HMS. This thesis is useful for the development of intelligent industrial automated systems, based on the holonic Product Unit PU.

**Keywords:** Holonic Product Unit, Holonic Manufacturing Systems, Industrial Automation, Intelligent Manufacturing Systems, IEC 61499.

# Contenido

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>11</b>
<b>Lista de Tablas.....</b>	<b>14</b>
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>14</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>15</b>
1.1. Organización del documento .....	16
1.2. Planteamiento del Problema.....	17
1.3. Formulación del Problema.....	21
1.4. Objetivos.....	21
1.4.1. Objetivo General.....	21
1.4.2. Objetivos Específicos .....	21
1.5. Metodología.....	22
1.6. Aportes Investigativos.....	24
1.6.1. Publicaciones Académicas .....	25
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>26</b>
<b>Marco Teórico y Conceptos Generales de los Sistemas de Producción .....</b>	<b>26</b>
2.1. Sistemas de Producción Tradicional y la Manufactura Basada en Agentes.....	26
2.2. Sistemas Holónicos de Manufactura HMS.....	32
2.3. Características del Control en Procesos de Producción .....	36
2.3.1. Control Jerárquico y Heterárquico de Sistemas de Producción .....	37
2.3.2. Control Holárquico como Arquitectura Emergente.....	42
2.4. Sistemas Dinámicos a Eventos Discretos (SED) .....	45
2.4.1. Redes de Petri (RdP) aplicadas a Sistemas SED.....	47
2.4.2. Teoría del Control Supervisorio (SCT) con RdP .....	53
2.4.3. Propiedades de Autonomía, Flexibilidad, Cooperación, Proactividad en HMS	54
2.5. Formalismos de Modelado Estructural y Dinámico en Sistemas .....	56
2.5.1. Diagramas de Modelado IDEF0, características generales .....	56
2.5.2. Lenguaje de Modelado Unificado UML, conceptos y tipos .....	58
2.6. Supervisión de Procesos de Manufactura .....	59
2.7. Control Distribuido de Bajo Nivel en HMS mediante IEC 61131 e IEC 61499 .....	62



2.7.1. Estándar IEC 61131 y sus Limitaciones en el Control de Procesos .....	63
2.7.2. Estándar IEC 61499 como Complemento en el Control Distribuido.....	64
2.7.3. Descripción General de los Bloques de Función en la IEC 61499.....	66
2.7.4. Modelos y Características Holónicas del Estándar IEC 61499 .....	69
<b>Capítulo 3</b>	<b>73</b>
<b>Estado del Arte: Raíces, Presente y Expectativas de Nuevos Desafíos en HMS .....</b>	<b>73</b>
3.1. Pasado y Actualidad de los Sistemas de Producción .....	73
3.2. Industria 4.0: el futuro basado en Sistemas de Producción Cyber-Físicos .....	80
<b>Capítulo 4</b>	<b>87</b>
<b>Construcción del Modelado Estructural y Dinámico del HMS de Referencia .....</b>	<b>87</b>
4.1. Características y Justificación de la Arquitectura HMS de Referencia.....	88
4.2. Modelado de la Supervisión, Control y Reconfiguración de la UPH.....	90
4.2.1. Modelo de la Supervisión del Proceso (A2) .....	96
4.2.2. Modelo de Asignación de Acuerdos (A3).....	97
4.2.3. Modelo Control del Proceso (A4).....	101
4.2.4. Modelo Adquisición de Datos y Reconfiguración del Control del Proceso (A5) .....	103
4.3. Comportamiento de la Supervisión, Control y Adquisición de Datos con Redes de Petri106	
<b>Capítulo 5</b>	<b>111</b>
<b>Desarrollo, Resultados y Validación del Prototipo .....</b>	<b>111</b>
5.1. Descripción y Características del Proceso de Manufactura .....	112
5.1.1. Lista de Equipos y Resumen de Variables de la Planta.....	115
5.2. Implementación del Modelo de Referencia a la Planta .....	116
5.2.1. Consideraciones sobre el Caso de Estudio Seleccionado .....	116
5.2.2. Aplicación del Modelado Estructural de la Planta .....	119
5.2.3. Características Dinámicas de la Planta mediante RdP.....	122
5.3. Desarrollo del Código para el Controlador y el SCADA .....	126
5.3.1. Programación Aplicando el Estándar IEC 61131 .....	128
5.3.2. Programación Aplicando el Estándar IEC 61499.....	130
5.3.3. Creación del SCADA mediante la Interfaz Hombre Máquina.....	135
5.4. Pruebas y Resultados del Caso de Estudio Implementado .....	137
5.4.1. Datos Obtenidos en la Emulación del Proceso.....	137
5.5. Validación de las Características Holónicas del Sistema.....	139

5.5.1. Autonomía .....	140
5.5.2. Flexibilidad .....	141
5.5.3. Cooperación .....	142
5.5.4. Pro actividad.....	143
5.5.5. Reactividad.....	143
5.5.6. Otras Propiedades.....	146
<b>Capítulo 6</b> .....	<b>148</b>
<b>Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo Futuro</b> .....	<b>148</b>
6.1. Conclusiones y Recomendaciones Generales.....	148
6.2. Trabajo Futuro .....	150
<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	<b>151</b>
<b>Anexos</b> .....	<b>160</b>
Características de los Elementos de la Planta Virtual.....	Anexo A
Primera parte del programa del PLC: Aplicación de la norma IEC 61131-3.....	Anexo B
Segunda parte del programa del PLC: Aplicación de la norma IEC 61499-1.....	Anexo C

# Lista de Figuras

<b>Figura 1.1.</b> Niveles de los objetivos (Hurtado 2012).....	22
<b>Figura 2.1.</b> Sistema de producción simple. ....	27
<b>Figura 2.2.</b> Ciclos de funciones de Producción. ....	27
<b>Figura 2.3.</b> Modelo CIM definido por NIST de los Estados Unidos.....	28
<b>Figura 2.4.</b> Control de fabricación convencional vs basada en agentes.....	31
<b>Figura 2.5.</b> Representación genérica del sistema holónico. ....	32
<b>Figura 2.6.</b> Arquitectura general de un Holón (Christensen 1994). ....	35
<b>Figura 2.7.</b> Control de fabricación convencional vs HMS. ....	36
<b>Figura 2.8.</b> Beneficios y debilidades de un sistema de control jerárquico. ....	37
<b>Figura 2.9.</b> Estructura modelo de una jerarquía tradicional. ....	38
<b>Figura 2.10.</b> Interacciones entre los elementos de control de S88.....	39
<b>Figura 2.11.</b> Beneficios y debilidades del control heterárquico.....	40
<b>Figura 2.12.</b> Estructura modelo de una heterarquía. ....	41
<b>Figura 2.13.</b> Unidad de Producción Holónica UPH (Chacón 2002). ....	42
<b>Figura 2.14.</b> Ejemplo de un HMS basado en órdenes-recurso (Araújo et al. 2015).....	43
<b>Figura 2.15.</b> Categorización de sistemas hasta SED. ....	45
<b>Figura 2.16.</b> Trayecto de estados en tiempo de un SED.....	46
<b>Figura 2.17.</b> Clasificación de las Redes de Petri. ....	47
<b>Figura 2.18.</b> Representación de un SED a través de una RdP (Zapata M. 2011). ....	48
<b>Figura 2.19.</b> Características representativas de Redes de Petri. ....	48
<b>Figura 2.20.</b> Trayectoria de un marcado en una RdP (Buchely & Ruiz C. 2012).....	49
<b>Figura 2.21.</b> Métodos basados en grafo de Red de Petri (Buchely & Ruiz C. 2012). ....	51
<b>Figura 2.22.</b> Representación matricial de una Red de Petri. ....	52
<b>Figura 2.23.</b> Reglas de reducción en Redes de Petri (Murillo 2008). ....	52
<b>Figura 2.24.</b> Esquemas básico de un IDEF0 (IBM 2014). ....	57
<b>Figura 2.25.</b> Descomposición de un modelo IDEF0 (IBM 2014; KBSI 2014).....	57
<b>Figura 2.26.</b> Ejemplo de Diagrama UML de Casos de Uso (Gutierrez P. 2015).....	58
<b>Figura 2.27.</b> Ejemplo de Diagrama UML de Clases y las interrelaciones básicas. ....	58
<b>Figura 2.28.</b> Ejemplo de Diagrama UML de Secuencias y sus partes (IBM 2014). ....	59
<b>Figura 2.29.</b> Niveles del estándar ISA 95 (ISA-95 2013).....	59
<b>Figura 2.30.</b> Sistema de supervisión tradicional con SCADA (Zapata et al. 2011). ....	61
<b>Figura 2.31.</b> Representación de supervisión holónica (Chacón R. & Rojas A. 2006). ....	61
<b>Figura 2.32.</b> Desarrollo de normas en el control industrial (Zoitl & Lewis 2014). ....	62

<b>Figura 2.33.</b> Distribución de aplicaciones de IEC 61499 (Cruz S. & Rojas A. 2014).	65
<b>Figura 2.34.</b> Origen de Bloques de Función o FB's (Cruz S. & Rojas A. 2014).	65
<b>Figura 2.35.</b> Partes de un bloque de función de IEC 61499 (Zapata M. et al. 2012).	67
<b>Figura 2.36.</b> Interconexión de FB's en IEC 61499 (Zapata M. et al. 2012).	67
<b>Figura 2.37.</b> Diagrama de clases para IEC 61499 (Camacho & Patiño 2013).	68
<b>Figura 2.38.</b> Modelos de la arquitectura del estándar IEC 61499 (Catalán C. 2016).	70
<b>Figura 2.39.</b> Administrador de Configuración en un FB (Zapata M. et al. 2012).	71
<b>Figura 2.40.</b> FB's anidados para el cálculo de una función (Spöcker et al. 2014).	71
<b>Figura 2.41.</b> Agentes industriales con IEC 61499 e IEC61131(Leitão et al. 2016).	72
<b>Figura 3.1.</b> Evolución de arquitecturas en sistemas de fabricación.	74
<b>Figura 3.2.</b> Tipos de sistemas de control de manufactura (Cruz S. & Rojas A. 2013).	78
<b>Figura 3.3.</b> Las nueve tecnologías que soportan la Industria 4.0.	81
<b>Figura 3.4.</b> Convergencia en paradigmas de sistemas de manufactura.	82
<b>Figura 3.5.</b> Características semejantes y de compatibilidad entre IMS y CPS.	82
<b>Figura 3.6.</b> Mapa conceptual de CPS (Asare et al. 2012; Wang et al. 2015).	83
<b>Figura 3.7.</b> Cronología de acontecimientos que preceden la Industria 4.0.	84
<b>Figura 3.8.</b> Cuatro sub-áreas de desarrollo para <i>CPPS</i> (Vogel-Heuser et al. 2012).	85
<b>Figura 3.9.</b> Descomposición de la pirámide CIM en aplicaciones distribuidas.	86
<b>Figura 4.1.</b> Características de la arquitectura UPH (Chacón R. & Rojas A. 2006).	88
<b>Figura 4.2.</b> Diagrama de clases general de un HMS basado en UPH.	91
<b>Figura 4.3.</b> Extensión de niveles de Control y Supervisión en ISA 95.	93
<b>Figura 4.4.</b> Supervisión, Control y Reconfiguración en la UPH (Modelo General).	94
<b>Figura 4.5.</b> Supervisión, Control y Reconfiguración en la UPH (Modelo Extendido).	95
<b>Figura 4.6.</b> Diagrama de Secuencias de la Supervisión del Proceso.	97
<b>Figura 4.7.</b> Dinámica del protocolo de comunicación CNP.	98
<b>Figura 4.8.</b> Dinámica del protocolo de comunicación HCNC.	99
<b>Figura 4.9.</b> Ejemplo de un Vector de Estado (Burbano & López 2015).	100
<b>Figura 4.10.</b> Dinámica de secuencias en la actividad Asignación de Acuerdos.	101
<b>Figura 4.11.</b> Dinámica de secuencias en la actividad Control del Proceso.	102
<b>Figura 4.12.</b> Diagrama de secuencias en la actividad reconfiguración de la UPH.	104
<b>Figura 4.13.</b> Diagrama de Clases UML para la Arquitectura de referencia.	105
<b>Figura 4.14.</b> Red de Petri de la Supervisión en la UPH.	107
<b>Figura 4.15.</b> Red de Petri de la Asignación de Acuerdos en la UPH.	108
<b>Figura 4.16.</b> Red de Petri del Control de Proceso en la UPH.	109
<b>Figura 4.17.</b> Red de Petri de la Adquisición de Datos en la UPH.	110
<b>Figura 5.1.</b> Descripción del aplicativo Factory I/O ( <a href="https://factoryio.com">https://factoryio.com</a> ).	111
<b>Figura 5.2.</b> Clases de material y equipos en la planta prototipo.	112

<b>Figura 5.3.</b> Vista superior de distribución de la planta prototipo. ....	113
<b>Figura 5.4.</b> Vista lateral de la planta prototipo en Factory I/O®. ....	114
<b>Figura 5.5.</b> Driver para conectar el PLC y sensores y actuadores en Factory I/O®. ....	115
<b>Figura 5.6.</b> Arquitectura UPH de la planta prototipo. ....	116
<b>Figura 5.7.</b> Apariencia de los elementos del sistema implementado. ....	118
<b>Figura 5.8.</b> Holón de inteligencia de componentes no holónicos. ....	119
<b>Figura 5.9.</b> Dinámica global del Coordinador de la UPH. ....	120
<b>Figura 5.10.</b> Aplicación de Modelo de referencia A0 al caso de estudio. ....	121
<b>Figura 5.11.</b> Macroetapas de cada Subplanta para el modelado en RdP. ....	122
<b>Figura 5.12.</b> Red de Petri para cada subplanta del caso de estudio. ....	124
<b>Figura 5.13.</b> Pasos para crear un supervisor en PLC. ....	125
<b>Figura 5.14.</b> Traducción en Ladder de una RdP. ....	126
<b>Figura 5.15.</b> Apariencia física de un PLC Siemens de la familia S7 300. ....	127
<b>Figura 5.16.</b> Aplicativo Simatic Step 7 en la vista de árbol. ....	128
<b>Figura 5.17.</b> Código en Ladder y Diagrama de Bloques de Función en OB1. ....	129
<b>Figura 5.18.</b> Programación reusable basada en FB y DB. ....	129
<b>Figura 5.19.</b> Holón inteligente simple mediante IEC 61499 (Vlad et al. 2010). ....	130
<b>Figura 5.20.</b> Modelo del Sistema IEC 61499 y Profinet CBA (Pigan & Metter 2015) ....	132
<b>Figura 5.21.</b> Modelo dispositivo IEC 61449 y Profinet CBA (Pigan & Metter 2015). ....	132
<b>Figura 5.22.</b> Modelo de recurso IEC 61499 y Profinet CBA (Pigan & Metter 2015). ....	133
<b>Figura 5.23.</b> Ejemplo de un FB con Profinet CBA. ....	134
<b>Figura 5.24.</b> FB de la máquina central de acuerdo con Profinet CBA. ....	134
<b>Figura 5.25.</b> Intercomunicación de FB en Simatic Imap para una red Profinet CBA. ....	135
<b>Figura 5.26.</b> Ventana principal del editor WinCC flexible 2008. ....	135
<b>Figura 5.27.</b> Imagen principal del HMI para el SCADA de la UPH. ....	136
<b>Figura 5.28.</b> Diagrama de tiempos de las partes producidas en una subplanta. ....	139
<b>Figura 5.29.</b> Red de FB's de la UPH en Simatic Imap. ....	140
<b>Figura 5.30.</b> Enrutamiento distribuido mediante la supervisión del proceso. ....	141
<b>Figura 5.31.</b> Procedimiento de asignación de operaciones a los recursos. ....	142
<b>Figura 5.32.</b> Análisis de la RdP de la UPH con PIPE y CRP. ....	144
<b>Figura 5.33.</b> Cálculo del supervisor obtenido por CRP para la UPH. ....	145
<b>Figura 5.34.</b> Infracción de las condiciones C3 y C5 de la RdP modelo. ....	145
<b>Figura 5.35.</b> Validación del supervisor SED para la UPH. ....	146

# Lista de Tablas

<b>Tabla 2.1.</b> Características de control de tipo convencional y holónico.....	44
<b>Tabla 2.2.</b> Ventajas frente a debilidades del análisis con RdP. ....	49
<b>Tabla 2.3.</b> Principales propiedades de las Redes de Petri.....	51
<b>Tabla 2.4.</b> Definiciones de los niveles en la norma ISA-95.....	60
<b>Tabla 2.5.</b> Lenguajes de programación en PLC de la IEC 61131-3 (IEC 2012).....	63
<b>Tabla 2.6.</b> Partes de la norma de Bloques de Función IEC 61499 (IEC 2012). ....	64
<b>Tabla 2.7.</b> Comparación de IEC 61499 e IEC 61131 (Cruz S. & Rojas A. 2014). ....	66
<b>Tabla 2.8.</b> Software académico y comercial para IEC 61499. ....	68
<b>Tabla 3.1.</b> Relación de fortalezas y desventajas de arquitecturas HMS Y SMA. ....	78
<b>Tabla 3.2.</b> Características de arquitecturas de control holónicas que se destacan.....	80
<b>Tabla 4.1.</b> Requisitos de modelado para HMS (Giret B. 2005; Höpf 1994).....	90
<b>Tabla 5.1.</b> Tipos de datos en sensores y actuadores en Factory I/O®. ....	115
<b>Tabla 5.2.</b> Resumen de variables de entrada y salida de la planta.....	116
<b>Tabla 5.3.</b> Software usado para el desarrollo de sistema de control holónico. ....	118
<b>Tabla 5.4.</b> Términos de IEC 61499-1 y Profinet CBA (Pigan & Metter 2015).....	131
<b>Tabla 5.5.</b> Datos en segundos de las partes producidas por una UPH.....	137

# Capítulo 1

## Introducción

Los sistemas de *fabricación o manufactura* son complejos, puesto que presentan gran cantidad de procedimientos para la producción y múltiples características operativas y estructurales. Dicha complejidad implica que las técnicas que intervienen en la formación de un producto o servicio –es decir, las *estructuras de control*–, sean difíciles de modelar y predecir. Con el fin de responder a los desafíos de la competencia y a los nuevos métodos de fabricación, las arquitecturas de las estructuras de control conocidas, tienen diferentes enfoques acerca del modelado, e incluyen, el diseño de sistemas de manufactura inteligentes (Chacón et al. 2012).

Los objetivos finales de las estructuras de control coinciden en satisfacer requisitos fundamentales, tales como: integración empresarial, organización distribuida, entornos híbridos e interoperabilidad; estructura abierta, dinámica y reconfigurable (Langer et al. 2000; Leitão & Restivo 2006); cooperación entre departamentos, integración de los seres humanos con software y hardware de forma amigable, mediante las interfaces hombre máquina (HMI); agilidad, escalabilidad y adaptabilidad a los cambios (Giret B. 2005; Antsaklis 1994); además de obtener un sistema resistente a fallos y a la presencia de excepciones en su operación (Colombo et al. 2006; Leitão & Restivo 2006; Johansson et al. 2004).

En efecto, a partir las anteriores necesidades complejas del control de procesos de producción, se han propuesto varias arquitecturas, que regularmente se clasifican en estructuras de tipo jerárquica, heterárquica y holárquica, siendo estas últimas con propiedades “inteligentes”. De esta clasificación, se pueden resaltar ejemplos representativos –respectivamente– tales como el estándar S88 (ISA Committee SP88 2010), de naturaleza jerárquica; la inteligencia artificial distribuida mediante sistemas multiagente SMA (Weiss 2000), de tipo heterárquica; y finalmente, los paradigmas holónicos (University of Hannover 2000), que se componen de holarquías.

Los sistemas de manufactura bajo el paradigma de enfoque holónico (HMS), se encuentran dentro de los Sistemas Inteligentes de Manufactura (IMS), y se definen como organizaciones altamente distribuidas, cuya inteligencia se reparte entre las entidades individuales llamadas holones, las cuales son autónomas, cooperativas e inteligentes. Arthur Koestler definió el concepto de *holón* como una estructura auto-similar o fractal, estable y coherente, constituido por varios *holones* en forma subestructurada, donde ningún elemento se desenvuelve sin los componentes subordinados o superiores de la que forman parte, correspondientemente (Tiwari & Mondal 2002).

Mediante este trabajo se generalizan conceptos de estructuras de control de procesos de manufactura, en términos de necesidades actuales. A partir de esa revisión, se contrastan los sistemas de fabricación tradicionales y los nuevos paradigmas, específicamente los HMS. Más adelante, se ofrecen algunos ejemplos de los modelos propuestos durante las últimas décadas de HMS y se resumen las fortalezas y desventajas. En últimas, se propone adoptar un modelo de control inteligente, con las exigencias de análisis, modelado, diseño y validación de los sistemas de control, y su aplicación dentro del estudio de sistemas dinámicos a eventos discretos (SED). Todo esto bajo los atributos y requerimientos de representación que se toman desde el paradigma holónico.

## 1.1. Organización del documento

Este documento de tesis se ha estructurado mediante 6 capítulos, de esta forma:

En el capítulo 1 denominado “*Introducción*”, se hace un preámbulo de la propuesta. Aquí se encuentra entre otras cosas, el planteamiento del problema, los objetivos y la metodología con la que se desarrolla el presente trabajo.

Luego en el capítulo 2, que se llama “*Marco Teórico y Conceptos Generales de los Sistemas de Producción*”, se presentan los conceptos principales y antecedentes sobre sistemas de manufactura. Se hace énfasis especial en las diferentes teorías y los requisitos de las características de sistemas holónicos de producción (HMS), frente a otros tipos de arquitecturas.

En el capítulo 3 que se marca como “*Estado del Arte: Raíces, Presente y Expectativas de Nuevos Desafíos en HMS*”, se expone una extensión del estado del arte y tendencias. En este aparte se detallan las actuales propuestas de manufactura tradicional, las emergentes y las futuras expectativas en este ámbito.

En el capítulo 4 que se señala con el nombre de “*Construcción del Modelado Estructural y Dinámico del HMS de Referencia*”, se desarrolla y se describe la construcción fundamento de la presente tesis. Esto se hace en términos de modelos y herramientas típicas con los que se aborda una referencia de HMS.

En el capítulo 5 que se titula “*Desarrollo, Resultados y Validación del Prototipo*”, se presenta el desarrollo del prototipo y los resultados de su validación. Aquí se evidencia la consecución de los objetivos expuestos en el primer capítulo, y las demás teorías extendidas en las otras secciones del documento.

Finalmente, en el capítulo 6 de nombre “*Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo Futuro*”, se ostentan las inferencias de este trabajo y demás opciones que se dejan para próximas investigaciones. Estos puntos se enlistan para que se tengan en cuenta en trabajos basados en la arquitectura de referencia o de características similares a esta.



## 1.2. Planteamiento del Problema

Las arquitecturas de los diferentes tipos de control de sistemas de soluciones de automatización integral, prometen hacer frente a los desafíos de las nuevas tendencias de manufactura. Como resultado, surgen organizaciones como la Sociedad Internacional de la Automatización (ISA<sup>1</sup>), que se dirigió en un principio a establecer sólo normas internacionales de sistemas e instrumentos, pero que actualmente es una de las más importantes en materia de estandarización de la automatización y la fabricación industrial moderna. Otro grupo, con el mismo propósito, es la Organización de los Sistemas de Fabricación Inteligentes (IMS<sup>2</sup>), el cual inició algunos proyectos – desde principios de 1990– con el fin de definir nuevos paradigmas para la fábrica del "futuro"(Dumitrache & Caramihai 2010).

Conviene resaltar que el concepto de paradigma puede describirse desde el sintagma –metáfora asociada a la lingüística, esto es desde la etimología de paradigma–, en donde la palabra se deriva de las raíces *para*, que significa "del lado de" y *deiknynai*, "mostrar", que significa, "mostrar del lado de", lo cual indica una posición que en filosofía se le denomina "perspectivismo" (Hurtado 2012). De esta forma, se puede aclarar que los paradigmas en general no son verdaderos ni falsos, estos son tan solo maneras diferentes de entender una misma realidad, así que, son construcciones que aportan diferentes tipos de vista del mismo evento, de manera que se complementan.

Diferentes estudios indican que se está presentando un cambio de paradigma en los sistemas de fabricación, de manera que se busca cumplir con la alta variedad de la demanda del cliente, quien requiere cada vez más de una producción individualizada (Burbano & López 2015). Estos cambios se establecen debido a la globalización del mercado, y a las nuevas tendencias de producción, que en general se renuevan hacia una visión antes futurista, en donde la reconfiguración de su estructura organizacional y el alto grado de flexibilidad de operación, son ahora los principales protagonistas. En estas nuevas tendencias, en torno a la globalización, se identifican características como la *alta flexibilidad* y la *adaptabilidad* que se tienen para adecuarse a los desafíos y a los cambios del mercado (Leitão & Restivo 2006).

Adicionalmente, se necesita que los sistemas de producción sean flexibles; esto significa que en estos se puedan reducir los efectos de incertidumbre con respecto a la demanda. También implican *agilidad*, de manera que se puedan disminuir el tiempo del ciclo de vida del producto y que se responda ante la demanda del cliente lo más rápido posible (Leitão 2004). Estos sistemas requieren además, de una *integración empresarial*, en la que se eliminen las "islas" dentro de la organización, y en la que se cumplan las exigencias del entorno político-económico, del mercado cada vez más globalizado (Bongaerts 1998).

---

<sup>1</sup> Página web oficial disponible en: <http://isa.org>

<sup>2</sup> Página web oficial disponible en: <http://www.ims.org>

La *reconfiguración*, es otra característica significativa en los sistemas de producción, que se fundamenta a través de la capacidad de cambio de las propiedades estructurales de la arquitectura, que incluye el equipamiento del hardware-software, mediante los cuales se permiten los ajustes necesarios para la capacidad de producción y su funcionamiento operacional (Čapkovič & Čapkovič 2001). Aquí también se puede ver relacionado un grado de *escalabilidad*, en donde se evidencia la posibilidad del aumento en la capacidad de fabricación, mediante la adición o sustracción de los diferentes recursos del sistema de producción (Galán et al. 2000). Las características de ser un sistema de fabricación reactivo y proactivo son también incidentes en las nuevas tendencias, puesto que se hacen necesarias ante las situaciones que perturban los objetivos de la producción, así mismo, para poder que se prevea y se evalúen las futuras o las posibles fallas, que alterarían el correcto funcionamiento del proceso productivo.

Como resultado a las anteriores exigencias, se presentan paradigmas de producción que se desarrollan bajo nuevos enfoques, tal como las arquitecturas heterárquicas y holárquicas. Sin embargo, la mayoría de las arquitecturas que predominan son de enfoque jerárquico, en las que se presentan múltiples niveles verticales, lideradas por un elemento muy superior, generalmente de tipo pirámide. La principal fortaleza de este tipo de sistemas centralizados se presenta en la robustez, y, sus técnicas de control escalonado, que obtienen en general, buenas respuestas en términos de salidas, gracias a su capacidad de optimización. No obstante, su estructura rígida multinivel, les impide reaccionar de manera ágil ante posibles variaciones y esto hace que se reduzca su rendimiento (Leitão 2004).

Por otro lado, se encuentran los sistemas de arquitectura heterárquico que no permiten ningún tipo de jerarquía y está dirigida por entidades autónomas denominadas Agentes. Estos sistemas de manufactura basados en Agentes (SMA) aunque mejoran considerablemente la respuesta ante perturbaciones del sistema, gracias a su autonomía, en estas se dilata el objetivo final y se presenta una baja optimización global del sistema (Weiss 2000). Es así como, las arquitecturas de manufactura actuales, no poseen características que les permita adaptarse a las nuevas tendencias de mercado, debido a su característica muy rígida. Por lo anterior, se hace necesario el desarrollo de un enfoque innovador, que guarde el equilibrio entre la distribución de decisiones, la autonomía, la descentralización del control, la optimización y otras características mixtas, concebidas dentro de lo que se denominan holarquías, de las que proceden los Sistemas de Manufactura Holónicos (HMS).

Una de las funciones principales de un sistema de producción es el del control, el cual se representa en un primer nivel, luego del de piso de planta (o nivel 0). El control es clave en la eficiencia de todo el sistema y normalmente se realiza por dispositivos de dinámica continua y en los que prevalece el diseño de algoritmos de control, que siguen estándares y técnicas del control realimentado o de teoría de control clásica (Zapata M. et al. 2012). El nivel que le sigue superior, es de decisión y se denomina supervisión, el cual es encargado de llevar al proceso por los diferentes estados y condiciones de operación para que alcance los objetivos finales del

producto, y para que mantenga el plan establecido en el siguiente nivel de programación de la producción.

Los sistemas de fabricación normalmente tienen una evolución secuencial, por lo que, diversos autores coinciden en que se pueden determinar las dinámicas predominantes en estos niveles superiores y se pueden caracterizar como Sistemas Dinámicos de Eventos Discretos (SED), los cuales, presentan un espacio de estados finito y numerable, en los que el cambio del estado, se determina por la ocurrencia de eventos espontáneos, asíncronos y aleatorios (Muñoz et al. 2014; Zapata M. 2011). Los sistemas discretos, en el nivel de supervisión y el proceso o planta, se generan eventos y dan muestra de un comportamiento no controlado. Esto exige la existencia de entidades que controlen y presentan la necesidad de abordar el estudio de SED desde la teoría de control. El desempeño simbólico derivado a partir de la aparición de los eventos, permite la aplicación de la teoría de lenguajes para su estudio.

Los SED admiten la automatización de un sistema en relación con una característica que representa una secuencia deseada de eventos (Čapkovič & Čapkovič 2001; Cassandras & Lafortune 2009). El control automático de los SED, se modela como máquinas de estado finito dentro de los contextos principales de las teorías de control (Yi-Liang Chen & Feng Lin 2000; Huang et al. 2004). Lo anterior implica que el sistema tiene *controlabilidad*, es decir, es controlable, si se traslada desde cualquier punto a su estado inicial, en tiempo finito. Esta última característica no involucra que el sistema tenga *alcanzabilidad* (Formella 2006).

El control holónico constantemente se concibe como un concepto que armoniza las mejores características del sistema tradicional jerárquico y heterárquico, respectivamente (Palacio B. 2013; Quintero H. 2009). El resultado de estas comparaciones se limita a cuestiones tales como qué implica que una aplicación holónica no sea automáticamente más reconfigurable que una convencional. Asimismo, a reconocer la posibilidad de que las estructuras de control de los métodos jerárquicos, heterárquicos y holárquicos podrían determinar su desarrollo en conjunto, más allá de un solo caso. También, en algunas posturas se indican que el hardware convencional del control industrial de los sistemas holónicos, debería ser desplegado en las plataformas más adecuadas para su arquitectura, a fin de lograr la mayor capacidad de reconfiguración.

Se puede plantear entonces, que el paradigma de los sistemas holónicos surge de un enfoque o perspectiva en particular, que, por ser parcial, es posible que este deje algo fuera. Un avance real –de la comprensión de los sistemas de control en los procesos de fabricación–, debe tener una actitud integradora, en la cual los distintos enfoques tales como la *Manufactura Fractal* (FMS), *Biónica* (BMS) entre otras (Deen 2003), se puedan complementar (Chacón et al. 2012). En cumplimiento a esto, en propuestas como la *Industry 4.0*<sup>3</sup>, se relacionan esos y muchos otros enfoques dentro de una gran familia de *Sistemas Ciber - Físicos* o *CPS* (EIMaraghy & Monostori 2014;

---

<sup>3</sup> Página web oficial disponible en: <http://www.bmbf.de/de/9072.php>

Saumeth C. et al. 2015), que aportan desarrollos considerables, en lo que se hace llamar la cuarta generación industrial, pero que hasta ahora se encuentra en progreso.

En relación a la validación del paradigma holónico, y la aplicación específica de dichos conceptos al modelado del control de procesos de SED, se presentan muchas limitaciones aún; por ejemplo, en cuanto a: autonomía, flexibilidad, cooperación, proactividad y reactividad de los elementos del sistema, entre otras, que caracterizan las estructuras de integración jerárquica. Al mismo tiempo, los enfoques tradicionales que se han mencionado en los primeros párrafos, no atienden las exigencias de diseño requeridas en la teoría de control. De la misma manera, en la mayoría de los HMS no se incorporan instrumentos para validar y comprobar que el sistema de control sea robusto y que se desempeñe cumpliendo las exigencias que demanda un controlador en un proceso de manufactura (Quintero H. 2009; Palacio B. 2013).

En definitiva, a través de esta investigación, se propone mediante enfoques no tradicionales como el paradigma holónico y la perspectiva de los SED, afrontar las limitaciones enunciadas anteriormente. Este trabajo se enmarca dentro de la generación de nuevos métodos para hacer frente a los retos actuales en el área de la integración empresarial de sistemas de producción, puesto que se pretende diseñar y validar una estructura de control para procesos de producción desde el paradigma de los Sistemas Holónicos de Manufactura, basada en sistemas dinámicos a eventos discretos.

Es de resaltar que este trabajo solo sigue los parámetros propios del paradigma holónico; aunque se ha demostrado que los HMS, así como los SMA, sean paradigmas emergentes adecuados para el modelado de sistemas de manufactura, tanto que regularmente se relacionan y se presentan confusiones en la diferenciación de estos dos enfoques. Algunas investigaciones como en (Botti N. & Giret B. 2003), aclaran algunas de las diferencias fundamentales, sin embargo, allí se resalta que no existe una comparación exhaustiva de todas las propiedades entre los dos paradigmas.

Inicialmente se presentará un análisis comparativo de sistemas de control tradicionales y los HMS. Además, se apoyará parcialmente en los desarrollos obtenidos en (Palacio B. 2013; Zapata M. 2011; Arboleda C. 2011; Quintero H. 2009; Salazar V. 2009), los cuales siguen una tendencia generalizada en el área de los sistemas de producción inteligente de tipo holónico, derivada de la propuesta original de la Unidad de Producción (UP) expuesta en (Chacón 2002), pero en ellas se siguen técnicas de negociación propias de SMA. Por ejemplo en (Quintero H. 2009), se emplea el *Protocolo Contract Net* o CNP y se motiva la aplicación de ambos enfoques; lo anterior forma parte de una de las características en que se diferencia la presente propuesta.

Este proyecto se distingue de los trabajos de apoyo, principalmente por la motivación y el enfoque de diseño basadas en la Unidad de Producción Holónica (UPH); puesto que, el diseño de la estructura de control holónico que se presenta, se

encamina a la implementación en tareas flexibles de fabricación, por lo tanto, está orientado únicamente a la aplicación de estándares de comportamiento y de comunicación entre los niveles producción de piso de planta, control y supervisión (es decir, programación a bajo nivel). Mientras que los trabajos que se relacionan, se encuentran enmarcados en la programación de agentes como sistemas inteligentes y distribuidos, centrados en el comportamiento social de dichas identidades – especialmente en la realización de modelos de negociación–, estrategias de cooperación y coordinación, optimización en la realización de tareas, aprendizaje de dichos sistemas, introducción de coaliciones y entre otros aspectos similares en este tipo de paradigmas.

En resumen, este trabajo se alejará de los modelos de negociación propios de SMA –aunque estos se comprendan como software amplio que puede ser utilizado además para el control inteligente distribuido–, y en contra partida, la estructura de control HMS que se valida, se predispone hacia un enfoque específico de fabricación para sistemas de control distribuidos, con características puramente holónicas basados en la Unidad de Producción (Chacón 2002) .

### **1.3. Formulación del Problema**

Con base en las limitaciones señaladas en la descripción del problema, se formula el siguiente enunciado *holopráxico* de investigación (Hurtado 2012):

- ¿Cómo sería la validación del diseño de una estructura de control para procesos de producción desde el paradigma de los Sistemas Holónicos de Manufactura (HMS), que pueda validar propiedades de autonomía, flexibilidad, cooperación, proactividad y reactividad en la dinámica de los Sistemas a Eventos Discretos?

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General**

Validar una estructura de control para procesos de producción desde el paradigma de los Sistemas Holónicos de Manufactura (HMS), basada en sistemas dinámicos a eventos discretos, que satisfaga propiedades de autonomía, flexibilidad, cooperación, proactividad y reactividad.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Analizar los modelos y las arquitecturas de control tradicionales, incluyendo la de implementación de Sistemas de Control Holónicos.

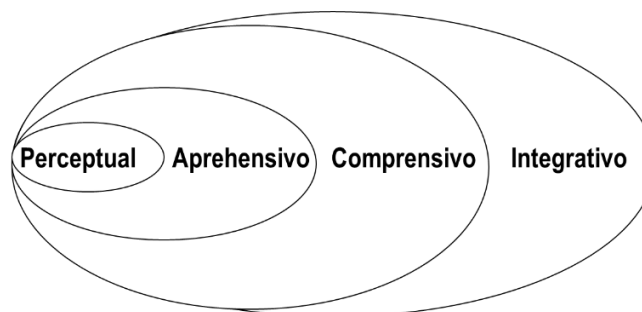
- Especificar las funciones y los requerimientos para la autonomía, flexibilidad, cooperación, proactividad y reactividad en el control de procesos de producción desde el enfoque HMS.
- Construir un modelo basado en sistemas dinámicos a eventos discretos que represente el comportamiento y permita la evaluación de las funciones y requerimientos del sistema de control bajo el enfoque holónico.
- Implementar un prototipo simulado que valide el modelo propuesto mediante un caso de estudio.

## 1.5. Metodología

En esta propuesta se adopta el paradigma de la metodología de *investigación holística*; esto significa que aunque existan múltiples enfoques de percibir un sistema – concepto de holismo–, mediante herramientas para observar, conocer y entender lo percibido, de manera cualitativa como cuantitativa, estos más que pensamientos contrarios se consideran complementarios (Hurtado 2012; Barrera 2006).

Desde luego, esta metodología define que *“la investigación es, entonces, un proceso continuo que intenta abordar una totalidad o un holos (no el “absoluto” ni el “todo”) para llegar a un cierto conocimiento de él. Como proceso, la investigación trasciende las fronteras y divisiones en sí misma; por eso, lo cualitativo y lo cuantitativo son aspectos –sinergias– del mismo evento”* (Hurtado 2010). En resumen, se expone que la investigación es un proceso continuo y organizado el cual pretende conocer algún evento (característica, proceso o situación), de manera que se obtienen leyes generales o simplemente con el fin de obtener respuestas a una necesidad (Hurtado 2012).

Los objetivos del paradigma holístico se clasifican según su complejidad en niveles y se denominan, jerárquicamente de menor a mayor relevancia, de esta manera (Barrera 2006): Perceptual (Explorar, Describir), Aprehensivo (Comparar, Analizar), Comprensivo (Explicar, Predecir, Proponer) e Integrativo (Modificar, Confirmar, Evaluar); los anterior se emplea siguiendo el recurso de *eulerización* propuesto en (Doran 1999; Barrera 2006), como se muestra en la Figura 1.1.



**Figura 1.1.** Niveles de los objetivos (Hurtado 2012).

A partir de lo anterior a continuación, se enlistan y se resumen cuatro (4) fases mediante las que se enmarca el desarrollo de la presente investigación:

### **Fase 1: especificaciones y comparación de los enfoques (perceptual y aprehensivo)**

Se caracterizan los paradigmas aplicados en la representación del control de sistemas de fabricación inteligente, resaltando, los requerimientos las funciones, atributos, ventajas y desventajas de las tipologías existentes.

En esta etapa se hace preciso identificar los requerimientos y exigencias de los sistemas de control desarrollados dentro del marco de sistemas a eventos discretos (SED). Se evidencia en otros trabajos similares que las dinámicas de un sistema de producción son estrictamente discretas y definidas por la presencia de SED. De la misma manera, se consideran los atributos de los HMS, como cooperación, autonomía, reactividad y proactividad mediante herramientas SED.

### **Fase 2: estudio y diseño del modelo (comprensivo)**

Aquí se da uso de las características propias de los paradigmas aplicados en el diseño de control de HMS. De manera específica, se determina el enfoque de control holónico basada en Unidades de Producción, el cual ya estima técnicas de diseño tradicional. Para estas UP's, es necesario definirles atributos de inteligencia distribuida, características de interacción entre ellas, además, de construir el modelo estructural y el modelo dinámico del control inteligente, que admita atributos de autonomía, cooperación, reactividad y proactividad.

La conducta dinámica del modelo de control HMS que se desarrolla, se diseña mediante la perspectiva de los modelos y herramientas determinadas desde la teoría de control, para la interpretación de propiedades de control en SED.

### **Fase 3: propuesta de estrategia metodológica (comprensivo)**

Esta aproximación metodológica posibilita la elaboración de un método de diseño y modelado de HMS basado en UP, bajo los parámetros de sistemas de modelos y lenguajes de modelado con respaldo y trayectoria (por ejemplo, UML e IDEF0). Luego de que se establece el método, se fija una notación de modelado, su alcance, desarrollo y validación.

### **Fase 4: ejecución y validación del prototipo (integrativo)**

A través del uso de técnicas formales, es decir, metodologías que tienen un soporte matemático, una sintaxis y semántica concreta, y los atributos de desempeño definidos desde los SED, se experimenta sobre el modelo de control obtenido. Dichas demostraciones fueron: caracterización de secuencias de eventos prohibidos o estados no deseados, valoración de existencia de bloqueos, entre otras. También, se

desarrolla una aprobación cuantitativa y cualitativa de este modelo mediante un prototipo emulado y con pruebas de funcionamiento. Cabe resaltar que en esta etapa se selecciona los diferentes aplicativos de *software*, con lo que se desarrolla la estrategia de control bajo HMS conseguida.

A partir de las fases anteriores, se tiene en cuenta las metas que se resaltan del objetivo general y los objetivos específicos. Dentro de los niveles de los objetivos de la metodología holística, se considera que esta propuesta llega hasta el nivel **integrativo–confirmativo**. Lo anterior gracias a que, al *diseñarse y validarse una estructura de control para procesos de producción desde el paradigma de los HMS*, se infiere la modificación del evento por parte del investigador.

De este modo, esta investigación en consonancia con la clasificación del paradigma holístico y la relación nivel y tipo de objetivo, se ubicaría dentro del tipo de **Investigación Confirmatoria**. Se conlleva a un proceso continuo y progresivo de los otros tipos de investigación, y, se obliga a haber transcurrido los otros niveles y estadios-fases precedentes, tal como se argumenta en (Hurtado 2012; Barrera 2006).

## 1.6. Aportes Investigativos

Gracias a que un ambiente de manufactura integrado, se compone esencialmente por recursos humanos y otros físicos –para elaborar productos o servicios de acuerdo a procesos de negocios predefinidos– tales como: aplicaciones, sistemas de información, equipos de control, sistemas de automatización, computadores, entre otros; el diseño de un sistema de control holónico (o de tipo distribuido), se convierte en un logro de complejidad significativa, dado que las características que lo conforman son diferentes a los tradicionales sistemas de control jerárquicos. De acuerdo a la indagación preliminar, en el estado del arte de HMS en (Palacio B. 2013; Arboleda C. 2011; Quintero H. 2009; Salazar V. 2009; Durán F. 2005), en la mayoría de los casos, el comportamiento de los emergentes sistemas de fabricación son extremadamente difícil de predecir, modelar y controlar, debido a sus características no deterministas (estocásticas).

Igualmente, validar una estructura de control para procesos de producción desde el paradigma Holónico, se desarrolla en concordancia con uno de los programas internacionales del IMS, titulado “*Holonic Manufacturing Systems* o HMS”, el cual tiene como objetivo principal lograr una mejor comprensión de los requisitos de los sistemas de manufactura de la siguiente generación en automatización de procesos y los medios para construir sistemas que satisfagan estos requisitos. La implementación de arquitecturas de control inteligente a bajo nivel, puede aportar la aplicación de nuevos estándares en el control distribuido y la automatización (por ejemplo el IEC 61499), que se alejan de los modelos tradicionales y que son los que podrían permitir el desarrollo de arquitecturas bajo estos nuevos paradigmas (Zapata M. et al. 2012; Zapata M. 2011). IEC 61499 tiene escasa implementación o es



prácticamente desconocida en el ámbito industrial, pero promete suceder los tradicionales métodos de programación al proporcionar características de sistemas de control distribuido.

De la misma manera, esta investigación aporta conocimiento que siguen “filosofías” establecidas en las expuestas por el proyecto *Industry 4.0*, del gobierno alemán y que señala la cuarta revolución industrial. Esta tiene como objeto la búsqueda de la fábrica inteligente –habitualmente denominada *Smart Factory*–, que se caracteriza por su fuerte tendencia en la generación de sistemas de producción en masa, bajo condiciones de alta flexibilidad, y que se desea lograr mediante la automatización con mejoras tecnológicas y la introducción de métodos de auto-optimización y auto-configuración, en lo que se denominan *Sistemas Cyber - Físicos CPS* (siglas originarias del inglés *Cyber-Physical Systems*), dentro de los que se encuentran los HMS (EIMaraghy & Monostori 2014). En concordancia con este tipo de proyectos, se obtiene la validación de un sistema físico de control, que evita las fallas y estados no deseados de forma autónoma, y que, mediante la lógica virtual que se le aplicó, puede reaccionar a cambios inesperados en un sistema de manufactura.

La investigación se enmarca dentro de la reproducción de métodos para hacer frente a los retos que actualmente se tienen en el área de la integración empresarial de sistemas de producción, a nivel de control y supervisión. Se valida una estructura de control para procesos de producción, desde el paradigma de los Sistemas Holónicos de Manufactura (HMS). Se hace énfasis en la arquitectura UPH, basada en sistemas dinámicos a eventos discretos (SED) y otro tipo especificaciones. Se generan modelos con lenguaje de modelado unificado (UML), IDEF0, redes de Petri y el apoyo del control supervisorio, entre otras técnicas típicas del control de sistemas.

### **1.6.1. Publicaciones Académicas**

El trabajo realizado aporta las siguientes publicaciones científicas:

(Cruz S. & Rojas A. 2014) Cruz S., L.A. & Rojas A., O.A., 2014. The future of industrial automation and IEC 614993 standard. In IEEE, ed. *2014 III International Congress of Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA)*. Cartagena de Indias: IEEE, pp. 1–5. DOI:10.1109/CIIMA.2014.6983434. ISBN: 978-1-4799-7931-8.

(Cruz S. & Rojas A. 2013) Cruz S., L.A. & Rojas A., O.A., 2013. Comparación de enfoques de sistemas de control tradicionales y el paradigma de los Sistemas Holónicos de Manufactura. In IEEE, ed. *II International Congress of Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA), CIIMA 2013*. Bogotá: IEEE, pp. 211–218. ISBN: 978-1-4799-2470-7.

## Capítulo 2

# Marco Teórico y Conceptos Generales de los Sistemas de Producción

El término *sistema*<sup>4</sup> se deriva del griego “*sistema*” y significa combinar. Se entiende como un conjunto de elementos (tangibles o intangibles), que se relacionan entre sí, se ordenan y contribuyen al cumplimiento de un objetivo común. En la generación de productos, se tienen los *Sistemas de Manufactura* (de Producción o Fabricación), compuestos de entidades físicas que se caracterizan por sus parámetros de tipo identificable y cuantificable, en la interacción de procesos. En las siguientes secciones se establecen definiciones, especificaciones y teorías que se desarrollan sobre estos sistemas. Además, se señalan diferentes paradigmas, desde las predominantes hasta nuevas propuestas, que en el futuro próximo sustituirán a las existentes.

### 2.1. Sistemas de Producción Tradicional y la Manufactura Basada en Agentes

La producción o fabricación involucra un sistema con una gran cantidad de actividades inter-dependientes, formadas por distintas entidades (como materiales, herramientas, máquinas, energía y seres humanos). De la misma manera, se debe resaltar que el término *proceso* implica el uso de recursos de una organización, con el fin de obtener un valor. Cuando se crea un producto o se presta un servicio, se hace necesario contar con un proceso establecido. De allí se tiene que los procesos no se presentan sin existir un producto o servicio. Las actividades de trabajo en toda organización, son parte de procesos globales que genera actividades laborales particulares, en las que se representan todas las funciones de la organización.

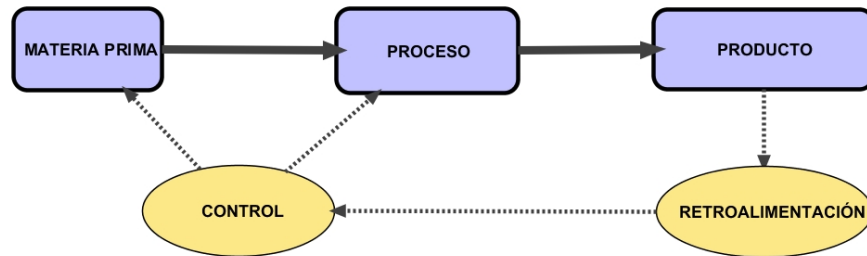
Los procesos están conformados por transformaciones en donde las ideas y las materias primas se convierten en bienes o servicios listos para proveer a los diferentes clientes de una organización, esto significa que “*un proceso toma insumos para procesarlos mediante una serie de operaciones cuya secuencia y número se especifica para cada caso. Las operaciones pueden ser simples o múltiples y asumen características diferentes según se desee: mecánica, química, de ensamblado, de inspección o control, de recepción, etc.*”<sup>5</sup>. Un sistema de producción de menor grado de complejidad se puede representar mediante diagramas de flujo, de manera que se simplifica y se agiliza el análisis de las diferentes etapas. La Figura 2.1 muestra el

---

<sup>4</sup> Tomado del diccionario de la *Real Academia Española* en: <http://www.rae.es/drae/srv/search?id=yHfxyKIWfDXX2kpDVRWA>

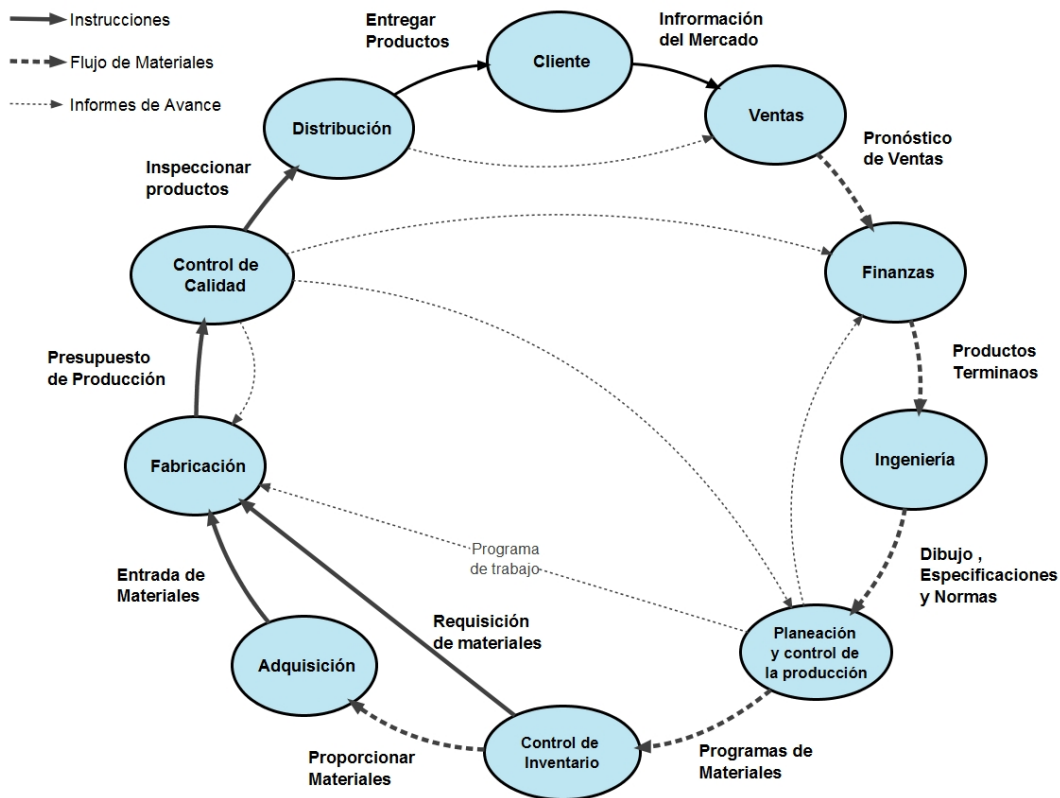
<sup>5</sup> SOLÓRZANO, Carolina: Producción para Competir. El Análisis del Proceso, INCAE, México, Pág. 2

diagrama de flujo en un proceso en general. Se trata de un proceso de transformación simple de insumos, esto es, un producto en el que se involucra la retroalimentación de la información para que se realice control del proceso.



**Figura 2.1.** Sistema de producción simple.

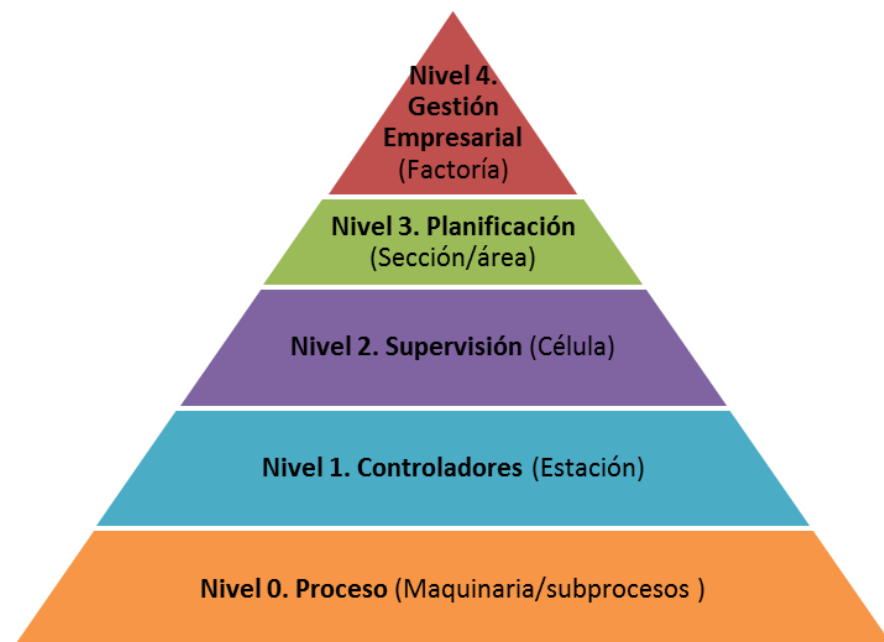
En consonancia, los sistemas de producción se caracterizan por ser complejos debido a la cantidad considerable de elementos distintos, físicos y humanos, que generalmente se hacen difíciles de predecir y controlar (o estocásticos). Un ejemplo se presenta en el suministro del costo de las materias primas, los cambios globalizados en el mercado y la conducta y desempeño influyente de las personas. Se hace arduo el modelar un sistema con las anteriores características complejas, debido a la falta de datos detallados o confiables en relación a las variables asociadas. La Figura 2.2 enseña entre otras cosas, los ciclos de funciones de Producción (Ellis et al. 1998).



**Figura 2.2.** Ciclos de funciones de Producción.

Estas necesidades cambiantes de los usuarios, denominados *clientes* y la competitividad global están forzando un cambio primordial en los estilos de fabricación y configuración de organizaciones industriales. La centralización de la planificación, su desarrollo secuencial, la asignación de recursos, y las arquitecturas de control habituales se vienen considerando poco flexibles y no logran responder de la dinámica de los mecanismos de fabricación y los requerimientos de producción que aumente cada día en su número de variables (Cruz S. & Rojas A. 2014). Los métodos tradicionales se limitan en capacidades de expansión y de reconfiguración en comparación a los sistemas de manufactura emergentes. La tradicional organización centralizada, generalmente de tipo jerárquico puede ocasionar caídas del sistema por fallos en un único punto, o por inconsistencia de los planes.

El aumento de la complejidad de los sistemas de producción y el desarrollo tecnológico de los últimos años han incrementado las actividades desempeñadas por equipos automatizados. Inicialmente, la automatización sólo ocurría en el nivel operativo, y se incorporaba posteriormente al proceso de planificación y optimización, para la creación de un modelo automatizado representado por una estructura jerárquica, conocida como la pirámide de automatización (Cruz S. & Rojas A. 2014). En la Figura 2.3 se representa un ejemplo convencional; esta figura (ver Figura 2.3) es un modelo de automatización de jerarquía piramidal, denominado Fabricación Asistida por Computador o *Pirámide CIM* (CIM, del inglés *Computer Integrated Manufacturing*), definida por el *National Institute of Standards and Technology* (NIST<sup>6</sup>), de los Estados Unidos.



**Figura 2.3.** Modelo CIM definido por NIST de los Estados Unidos.

<sup>6</sup> *National Bureau of Standards* (NBS) fue reemplazado posteriormente por el NIST. Página web oficial disponible en: <https://www.nist.gov/>

La pirámide CIM consta de cinco (5) niveles de aplicación; en el último se producen las decisiones de política empresarial. Los avances alcanzados en la tecnología de la información conducen a la descentralización y distribución de las tareas desempeñadas en cada uno de los niveles de dicha pirámide, lo cual plantea una modificación parcial en la estructura, que permita disponer de sistemas autónomos, comunicación flexible entre los diferentes niveles, software adaptativo e interacciones complejas dentro del proceso de automatización.

Algunos trabajos evidencian las arquitecturas de tipo jerárquico son las más predominantes a pesar de su falta de visión integradora (Mařík et al. 2015). Sin embargo, la manufactura moderna cuenta con mercados volátiles, gracias a las nuevas tecnologías emergentes y los competidores que se multiplican cada vez más de forma global. Esto implica que las arquitecturas de fabricación deban migrar a nuevas estrategias para que se mantengan en esa competencia globalizada. Es común que se hable en las organizaciones de la innovación y la generación de nuevos productos, como respuesta de la demanda rápida del mercado. Los futuros sistemas de fabricación entonces, deben ser más orientados en respuesta del tiempo, aunque aún se deban centrar en los costos y la calidad de la producción. Lo anterior implicará entre otras cosas: productos más diversos y complejos gracias a la cantidad de características y de sus variantes; productos que se transforman con mayor rapidez, puesto que los ciclos de vida del producto son cada vez más reducidos; ingreso al mercado más rápido de los productos debido a la reducción del tiempo en su producción; e inversiones menos reducidas por producto.

El futuro de los sistemas de producción estaría determinado entre otras cosas, por la manera en que estos puedan responder ante los desafíos de la “nueva fabricación” (Cruz S. & Rojas A. 2014; Saumeth C. et al. 2015). Desde tiempo atrás se viene estableciendo que tales sistemas de fabricación, necesitarán satisfacer los siguientes requisitos fundamentales (Höpf 1994; Shen & Norrie 1999):

**Integración de la Empresa:** se puede lograr la competitividad y una mejor respuesta ante un mercado dinámico y globalizado si se logra que la fabricación individual o colectiva de la organización se integre con su sistema administrativo. Esto significa que los diferentes encargados en: compras, las órdenes de trabajo, el diseño, la fabricación, la planificación, el control, el transporte, los recursos, el personal, las materias primas, la calidad, los recursos y la asignación de estos, se forjen como socios dentro de una misma red.

**Organización Distribuida:** para una integración efectiva de la empresa a través de organizaciones distribuidas, serán necesarios sistemas distribuidos basados en el conocimiento para enlazar la administración de demandas directamente a los recursos, la planificación de capacidades y asignación de recursos.

**Entornos Heterogéneos:** tales sistemas de fabricación necesitarán acomodar software y hardware heterogéneos tanto en sus entornos de fabricación como en sus entornos de información.

**Inter-operabilidad:** entornos heterogéneos de información pueden utilizar lenguajes de programación diferentes, representar los datos con diferentes lenguajes y modelos de representación, y operar en diferentes plataformas de procesamiento. Los subsistemas y componentes de tales entornos heterogéneos deberían inter-operar de una manera eficiente.

**Cooperación:** las empresas de fabricación deberán cooperar con sus proveedores, socios, y clientes para el suministro de materiales, fabricación de partes, comercialización del producto final, etc. Tal cooperación deberá ser eficiente y de respuesta rápida.

**Integración de humanos con el software y hardware:** el personal y las tecnologías de apoyo en la producción como las computadoras necesitan estar en una dinámica constante, dentro de los diferentes niveles de desarrollo de los sistemas. Esto implica que generalmente estarán presentes en todo el proceso de fabricación y en el ciclo de vida de los productos, de forma que se tiene rápido acceso al conocimiento y la información. Todas las fuentes de información complejas y de diferente clase deben ser integradas para soportar estas necesidades de manera que se mejoren las capacidades de toma de decisiones del sistema. Por lo anterior, se requiere de entornos de comunicación en doble vía, que facilite de manera efectiva y eficiente compartir, procesar e interactuar con la información entre la maquinaria, los procesos, los sistemas y las personas a cargo de su desarrollo.

**Agilidad:** se debe prestar considerable atención en reducir el tiempo del ciclo del producto para ser capaces de responder a los deseos de los clientes de manera más rápida. La fabricación ágil es la habilidad de adaptarse rápidamente a entornos de fabricación de cambio continuo y no anticipado, y, además, es el componente clave en las estrategias de producción para la competitividad global. Para lograr la agilidad, las utilidades de producción deben ser capaces de re-configuración rápida e interacción con sistemas y socios heterogéneos. Idealmente, los socios se contratan de manera dinámica sólo para el tiempo requerido para completar una tarea específica.

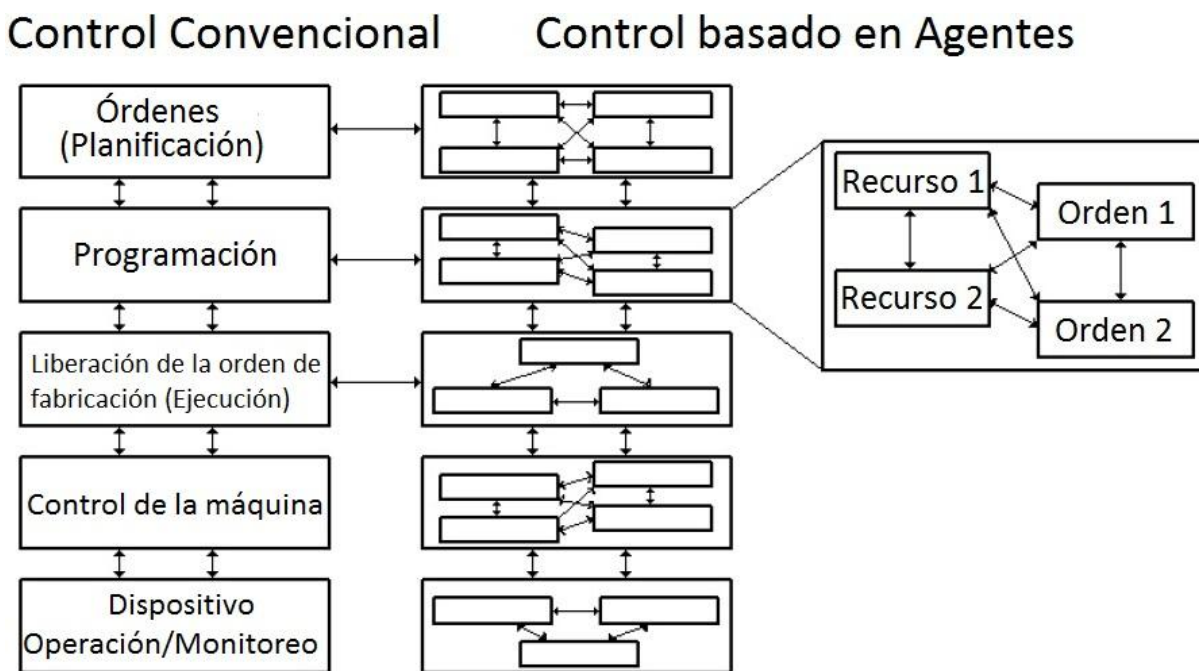
**Escalable:** un sistema de producción es escalable cuando recursos adicionales pueden ser incorporados dentro de la organización cuando éstos sean necesarios. Esta capacidad debería estar disponible en cualquier nodo de trabajo en el sistema y en cualquier nivel dentro de los nodos. La expansión de recursos debería ser posible sin alterar los enlaces previamente establecidos en la organización.

**Tolerancia a Fallos:** las arquitecturas de los sistemas deben ser tolerante a los fallos, sea que se presenten en el sistema completo o parcialmente. Estas deben detectar la falla y recuperarse de los fallos sin importar el nivel, de manera que se minimice el impacto de estos y se aumente la disponibilidad de todo el entorno de trabajo.

En respuesta a las tendencias de los sistemas hacia cumplir los requisitos anteriores, se tiene que nuevos paradigmas de fabricación han sido propuestos, de

manera que se logren los desafíos de la fabricación de la “nueva generación”. A inicios de 1985, en (Hatvany 1985) se expuso que la rigidez de las arquitecturas jerárquicas – definidas como sistemas tradicionales– se limitan en su desempeño dinámico. Hatvany propuso entonces un sistema heterárquico, que se describió para entonces como la división en fragmentos de un sistema, en unidades pequeñas y que se consideraban completamente autónomas.

El enfoque del control heterárquico se fundamenta en una total autonomía local, definido dentro del control distribuido. Allí se presenta un entorno de control mediante componentes autónomos (que están en continua cooperación) y logran objetivos globales a través de la toma de decisiones de forma local. Estos componentes autónomos se denominan *Agentes*, y su cooperación se estructura generalmente con protocolos de negociación. Para mejorar la dinámica de estas organizaciones en (Sikora & Shaw 1997; McFarlane & Bussmann 2003; Christo & Cardeira 2007), se siguieron estas ideas y se propuso la fabricación basada en agentes, tal como se muestra en la Figura 2.4.



**Figura 2.4.** Control de fabricación convencional vs basada en agentes.

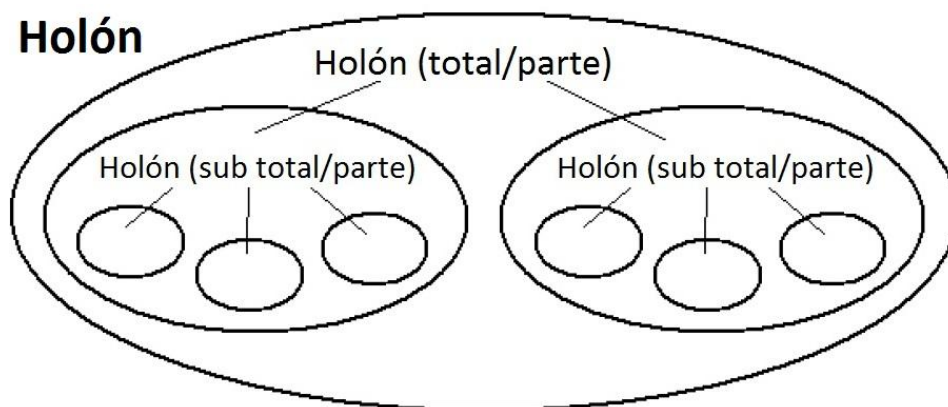
Desde hace unos años, la tecnología orientada por agentes ha sido considerada como un enfoque significativo en el desarrollo de sistemas de fabricación distribuidos (Wooldridge & Jennings 1995; Müller et al. 1998). En los últimos 10 años, varios investigadores han estado aplicando tecnología de agentes (Giret B. 2005). Estos tipos de sistemas heterárquicos se han implementado en la integración de empresas de fabricación y la administración de cadenas de suministro, la planificación de la fabricación, la asignación de recursos y la ejecución de control, manipulación de materiales. Sin embargo cabe resaltar, que algunas falencias sobresalientes, como su

robustez han dado lugar a nuevos tipos de sistemas de fabricación, tales como los sistemas holónicos de fabricación (Zapata M. et al. 2012; Chacón 2002). En las siguientes secciones del presente capítulo, se expondrán en detalle las características de estos tipos de sistemas y algunas propuestas sobresalientes, basadas en Sistemas Holónicos de Manufactura.

## 2.2. Sistemas Holónicos de Manufactura HMS

Los Sistemas Holónicos de Manufactura o HMS (del inglés, *Holonic Manufacturing Systems*) son una iniciativa de investigación para sistemas de manufactura avanzados, inspirados por el filósofo Arthur Koestler. La teoría de fabricación de tipo holónico creció de conceptos desarrollados por Koestler cuando se trata de definir la naturaleza híbrida de las estructuras de los organismos vivos y los grupos sociales (Christo & Cardeira 2007). El filósofo Arthur propuso el término holón basado en las palabras griegas “*holos*” de *entero* y el sufijo “*on*” de *parte*; de ahí que el centro de la teoría de HMS es el concepto Holón.

En el ámbito de la vida, cada sistema tiene sus propias partes y es una parte de algo más grande. Un Holón es un todo porque está constituido por subunidades (holones) y, al mismo tiempo este es una subunidad de un sistema más grande (otro holón). Las propiedades opuestas de la totalidad/parte se reflejan en los atributos de carácter autónomo y de cooperación de los holones. Cada sistema puede ser considerado un Holón, de una partícula del universo. En otras palabras, cualquier unidad en un sistema u organización está hecha por unidades básicas. A modo de muestra, un órgano biológico está constituido por células y a su vez son parte de un sistema del cuerpo humano. Incluso a un nivel no físico (por ejemplo, palabras o texto), todo puede ser identificado como parte de algo –total/parte– y puede a su vez, estar compuesto por otra parte –sub total/parte–, tal como se expresa en (Christo & Cardeira 2007; Tharumarajah et al. 1996). En la Figura 2.5 se representa esquemáticamente el concepto de sistema holónico en su forma general.



**Figura 2.5.** Representación genérica del sistema holónico.



El paradigma holónico de fabricación se ha desarrollado dentro del marco del programa internacional IMS<sup>7</sup>, expuesto en el primer capítulo. Gracias a las publicaciones del caso de Estudio HMS dentro del consorcio IMS, el termino HMS es conocido en los laboratorios de todo el mundo, dedicados a la investigación sobre sistemas de fabricación. El caso de estudio HMS fue un proyecto de viabilidad de un año, para la evaluación de las posibilidades de cooperación global, trasladando los conceptos de Koestler al dominio de fabricación, y definiendo y desarrollando varias demostraciones. El objetivo del IMS sigue siendo la creación de la ciencia para la fabricación en la que se pueda identificar los requisitos de los sistemas de fabricación del siguiente siglo.

En un estudio de viabilidad, llevado a cabo en 1994, seis casos de estudio fueron considerados, uno de ellos fue el *Caso de Estudio No. 5*, denominado “*Holonic Manufacturing Systems: componentes de sistema de módulos autónomos y control distribuido*”(Höpf 1994). El proyecto de HMS tenía como objetivo lograr una mejor comprensión de los requisitos de los sistemas de producción de la siguiente generación. Allí se buscaban los medios para construir sistemas que satisfagan estos requisitos. Desde el principio, el concepto de sistemas holónicos ha sido considerado como el paradigma que sería capaz de lograr este objetivo.

Adicionalmente, el consorcio HMS busca lograr en los sistemas de fabricación, los beneficios que las organizaciones holónicas proporcionan a los organismos vivos o a las sociedades. Lo anterior se refiere a estabilidad ante alteraciones, adaptación y flexibilidad ante cambios y el uso eficiente de los recursos disponibles. El nuevo paradigma combina los conceptos naturales de los sistemas jerárquicos y la integración de los elementos autónomos dentro de un sistema de control distribuido. Mientras todas las arquitecturas –de sistemas de fabricación convencionales– están modeladas a lo largo de líneas jerárquicas de relaciones de orden-obediencia, la arquitectura HMS está modelada utilizando relaciones todo-parte.

Con el propósito de descentralización inteligente, el consorcio tradujo los conceptos de Koestler (desarrollados inicialmente para las organizaciones sociales y los organismos vivos), un conjunto de conceptos apropiados para la industria de fabricación. El consorcio compuso un glosario con definiciones para un amplio rango de términos que ayudan a entender y a guiar la traducción de los conceptos holónicos a escenarios de fabricación (Höpf 1994; Chokshi & McFarlane 2010). Las principales características y conceptos, definidos por el HMS (University of Hannover 2000), son:

**Holón:** como unidad de construcción autónoma, coopera dentro de un sistema de manufactura para que se pueda transformar, transportar, almacenar y/o validar los la información y los recursos físicos. El holón se conforma por una parte que procesa información y en la mayoría de ocasiones, incluye –aunque no siempre– procesamiento físico (un *scheduler* es un ejemplo de holón sin procesamiento físico). Un holón puede ser cuando lo requiera parte de otro holón. Ejemplos de holones en

---

<sup>7</sup> Página web oficial disponible en: <http://www.ims.org/2011/11/hms-%E2%80%93phase-i-and-ii-holonic-manufacturing-systems/>

HMS pueden ser las herramientas, los equipos de transporte, las piezas de trabajo, los trabajadores humanos, la información del producto (que se refiere a el diseño o el plan de desarrollo), las máquinas de operaciones, las órdenes del cliente, entre otros. Se resalta como característica fundamental, que cada uno de estos se puede tratar como un todo en sí mismo, o como parte de una organización mayor.

**Autonomía:** es una característica que provee al holón para que este sea capaz de crear, controlar y monitorizar el desarrollo de sus propios planes o estrategias. Así mismo, el holón tiene autonomía suficiente para tomar las acciones correctivas necesarias, sin importar que se encuentre en contra de su propio mal funcionamiento.

**Holarquía:** es una estructura de holones que se pueden organizar y cooperan para lograr un objetivo en común. La holarquía establece reglas básicas para la cooperación entre holones y por tanto es la encargada de limitar su autonomía.

**Auto-Organización:** este atributo permite que el sistema se pueda acomodar ante la incorporación de otros holones. La vinculación de nuevos holones, la eliminación o la modificación de las capacidades funcionales de holones existentes les es permitida. Ellos presentan una organización automática con una mínima intervención humana, en donde los holones o sus funciones se pueden proveer de diversas fuentes.

**Combinación del comportamiento jerárquico y heterárquico:** una holarquía puede manejar un equilibrio entre la autonomía y la independencia de cada holón. Una estructura heterárquica responde ante las perturbaciones y a la obediencia de una estructura jerárquica, de manera que se oriente hacia cumplir metas globales, optimizar y coordinar el sistema y la organización central.

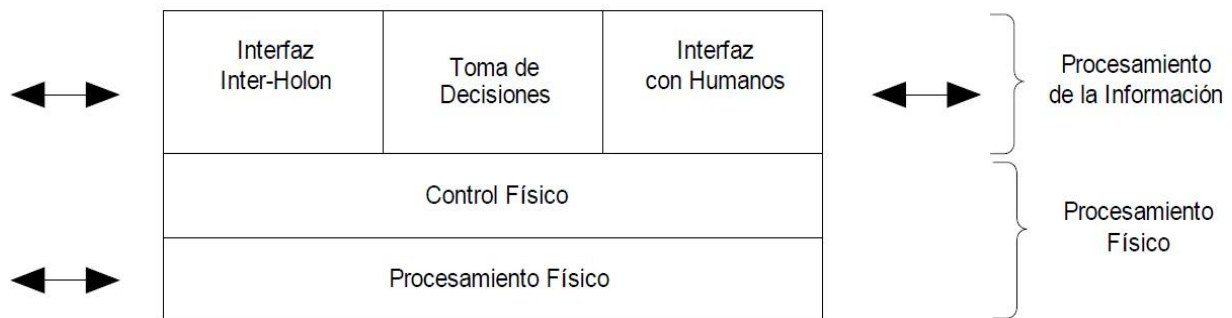
**Cooperación:** los holones cuentan con la capacidad de acordar y ejecutar planes mutuamente aceptados; además se pueden adoptar acciones conjuntas en contra de un mal funcionamiento en el sistema (Christensen 1994; Deen 2003).

**Escalabilidad:** un sistema de holones se puede ajustar al aumento o disminución de la holarquía, que se debe al agregarse nuevos holones, a la eliminación de holones existentes o a la modificación de las capacidades funcionales de los holones existentes. El concepto “plug and produce” constituye la escalabilidad del paradigma holónico (Zapata M. et al. 2012).

**Reconfigurabilidad:** es la que permite que los holones tengan la habilidad en un sistema de producción de que se cambie dinámicamente su configuración original. Los HMS son reconfigurables y en estos no se impone una estructura de control fija. Petín y otros autores se encargaron de definir la reconfiguración (Borangiu et al. 2016), como la capacidad de modificar las leyes de control –en tiempo real cuando el ambiente de trabajo evoluciona– con el objetivo de mantener dentro de lo posible la continuidad de la producción o los servicios prestados. También se incluye en esta función, el hecho de que se pueda responder adecuadamente a los cambios no programados en los planes de producción.

**Sistemas guiados por objetivos:** los atributos holónicos están establecidos en términos de los objetivos acordados por los holones. De esta forma, el objetivo de la producción se centra como el principio que orienta el comportamiento de cada holón. Se deben considerar en el holón las implicaciones en el modelado del comportamiento, el monitoreo y las acciones de control generadas, de forma que se logre la supervisión de este.

De esta forma, los holones trabajan con otros holones durante el proceso de producción, para lograr los objetivos de producción. La cooperación, en forma de coordinación y de acuerdos, se desarrolla donde y cuando sea necesario; generalmente entre flujos de material y de información. El proceso de cooperación, en contraste con la fabricación integrada por computador CIM (en inglés, *Computer Integrated Manufacturing*), incluye además a humanos. Las personas son vistas como recursos ordinarios, que se muestran con comportamiento holónico autónomo y cooperativo. Pero es de resaltar, que en la integración de humanos se requiere de una interfaz hombre-máquina como un holón artificial, que se propuso en la primera arquitectura general de holones expuesta en (Christensen 1994) y expresada en la Figura 2.6.



**Figura 2.6.** Arquitectura general de un Holón (Christensen 1994).

La propuesta Christensen muestra los dos componentes principales de un holón: i) procesamiento físico y ii) procesamiento de la información. La parte de procesamiento físico es opcional. Ejemplos de holones sin parte de procesamiento físico pueden ser orden de trabajo, secuenciador, planificador, entre otros. La primera parte se compone del *procesamiento físico* en sí, el hardware que realiza la operación de fabricación y del *control físico* –por un controlador, por ejemplo, CNC, DCS o PLC– del hardware de operación. La segunda parte, la del procesamiento de la información se compone de tres módulos: el *kernel* del holón o la *toma de decisiones*, que se encarga de proveer al holón de capacidades de razonamiento y decisión; la *interfaz inter-holón*, para la interacción y comunicación con otros holones; y finalmente la *interfaz con humanos*, para los datos de entrada –es decir, comandos de operación– y la salida o monitorización de estados.

En un HMS se presenta desde la recepción de una orden, pasando por el diseño, la fabricación, y el mercadeo; para finalizar con el logro de una empresa de fabricación ágil. De esta manera se forma en una holarquía, que se encarga de definir las reglas básicas de cooperación de los holones. Es decir, no se organiza de manera permanente, sino que se organiza a sí mismo de manera dinámica para lograr sus objetivos; además, se puede auto-adaptar ante cambios en su entorno, o en sí mismo. Este enfoque de solución combinada, puede considerar la migración de los sistemas que soportan los holones de fabricación de manera completa. Se pueden integrar sin problemas las cinco funciones de control en sus operaciones, como se ve en la Figura 2.7 (McFarlane & Bussmann 2003; Zapata M. 2011).

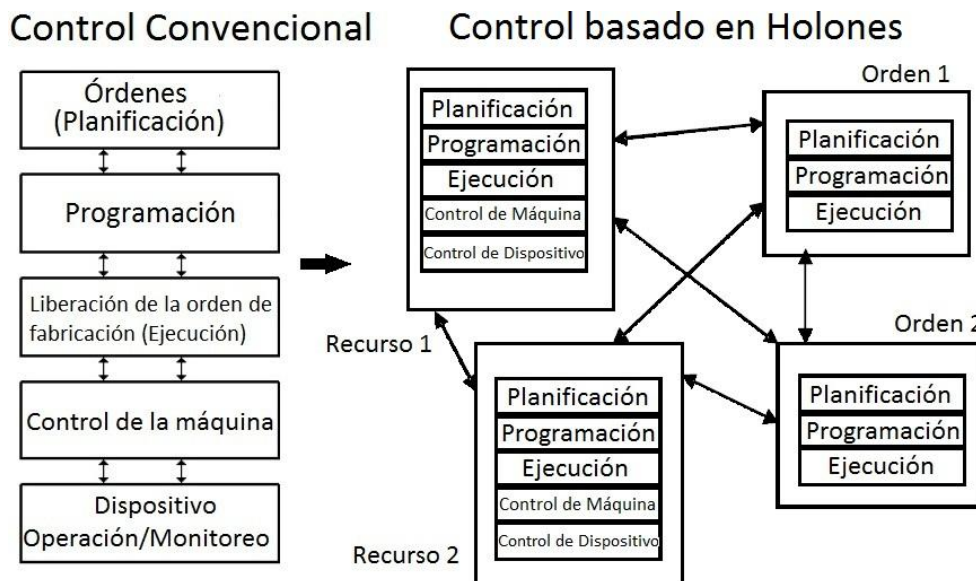


Figura 2.7. Control de fabricación convencional vs HMS.

## 2.3. Características del Control en Procesos de Producción

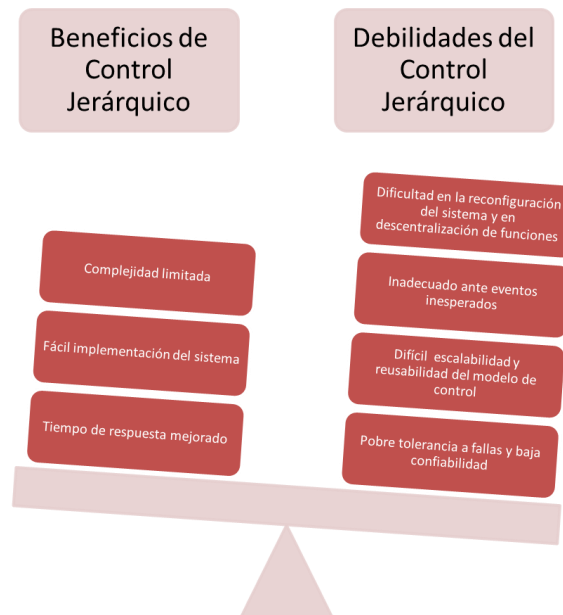
Un sistema de control de manufactura es un factor clave en sistemas de producción automatizados, en las etapas de bajo y alto nivel (Leitão 2004). En el caso del *Control de Bajo Nivel*, fácilmente se tienen dispositivos tales como robots industriales y máquinas NC (en inglés, *Numerical Control*), que requieren técnicas de control que regulen su comportamiento acorde a un objetivo específico, esto es que definan los movimientos. De otro lado, el *Control de Alto Nivel* es concerniente a coordinar las actividades de los recursos de manufactura, que permita producir los productos deseados. En ese caso, la agenda que es el concepto de control de sistemas de manufactura presentado por (Quintero H. 2009), define las actividades que un recurso debe llevar a cabo en un periodo de tiempo.

En ese sentido, un sistema de control de manufactura de alto nivel está definido por algoritmos que deciden que producir, como producirlo, cuando finaliza la producción y cuando los recursos están disponible u ocupados, cuando los trabajos son liberados en la planta, que trabajos son liberados, rutas de producción, y secuencias operación/trabajo. De las principales funciones de un sistema de control de manufactura se encuentran la funciones relacionadas al proceso, planeación y programación de la producción, ejecución del plan y el manejo de estados anormales (Leitão 2004).

Complementariamente, en la actualidad se tiene que el desempeño de un sistema de manufactura cambia con el tiempo, basado en el comportamiento del cliente, la gama de productos, cuellos de botella como consecuencia de falla en las máquinas, cambios de prioridad en los trabajos, llegada de nuevas órdenes, entre otros; por lo tanto, las estrategias de control de estas deben cumplir los requerimientos específicos de la estructura del control del sistema de manufactura

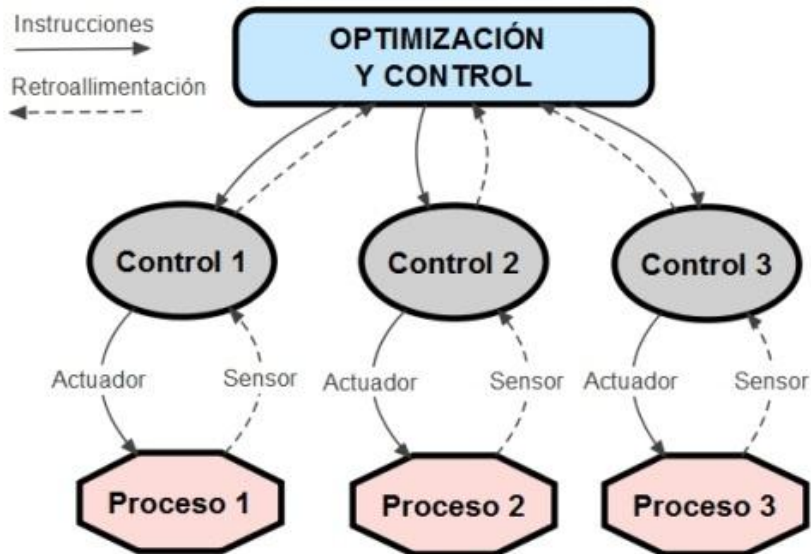
### 2.3.1. Control Jerárquico y Heterárquico de Sistemas de Producción

Como alude el inicio de este capítulo introductorio (ver sección 1.1), al *Control Jerárquico* pertenecen la mayoría de los sistemas tradicionales de control de manufactura (por ejemplo, la pirámide CIM). Estas arquitecturas se implementan usando técnicas de control centralizado y escalonado, y se presentan buenas respuestas en términos de salidas, debido a sus capacidades de optimización. En la Figura 2.8 se resumen parcialmente los beneficios y las debilidades de un sistema de control jerárquico (Frayret et al. 2004).



**Figura 2.8.** Beneficios y debilidades de un sistema de control jerárquico.

Los modelos de diseño jerárquico se asimilan al que se representa en la Figura 2.9. En este esquema, dentro de los distintos niveles no se puede tener una decisión simple o iniciativa; de allí que la arquitectura se considera vulnerable frente a perturbaciones. En síntesis, su autonomía y sus reacciones –ante diferentes disturbios– son débiles (Araúzo et al. 2015; Cruz S. & Rojas A. 2014). Esta rigidez incrementa los costos de su desarrollo y produce un sistema difícil de mantener.

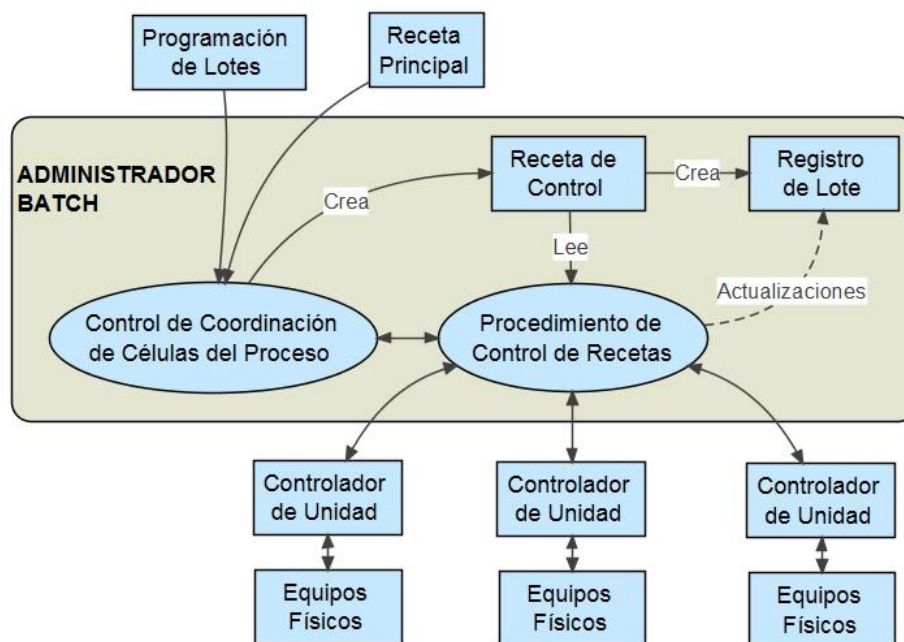


**Figura 2.9.** Estructura modelo de una jerarquía tradicional.

De otra parte, la modificación de las estructuras automatizadas es difícil, ya sea para agregar, quitar o cambiar recursos, pues se requiere actualizar todos los niveles para reconocer el estado de todo el sistema. Adicionalmente, los fallos ocurridos en niveles inferiores se propagan hacia los superiores, lo que en algunos casos invalida la planificación y afecta el funcionamiento de las demás tareas inherentes a la automatización. Un ejemplo significativo de un modelo de control de procesos es el desarrollado por el estándar aplicado a procesos Batch: el S88, que por su naturaleza centralizada corresponde a esquemas jerárquicos. Este define un proceso Batch como un “sistema que induce la producción de cantidades finitas de material, sometiendo las cantidades de material de entrada a un conjunto ordenado de actividades de procesamiento sobre un periodo finito de tiempo, usando uno o más recursos” (Chacón R. et al. 2009; ISA Committe SP88 2010).

En el estándar S88 se han definido los modelos para ayudar a especificar los recursos disponibles, las recetas y las fases necesarios para fabricar un producto en un sistema de producción. Estos son: el *Modelo Físico*, el Modelo de Control de Procedimientos, *el Modelo de Proceso* y el *Modelo de Actividades de Control*. Cabe resaltar, que en este estándar internacional no se presenta una solución al sistema de

automatización o de tipo software, pero sí referencia un método ordenado que corresponde a una forma de pensar, trabajar y comunicar con características propias de jerarquía entre niveles de control de dispositivos y equipos. Igualmente, contiene modelos y terminología que permiten analizar la organización, como se representan las interacciones del modelo en la Figura 2.10 (Covanich & McFarlane 2011; ISA Committe SP88 2010; Cruz S. & Rojas A. 2013).



**Figura 2.10.** Interacciones entre los elementos de control de S88.

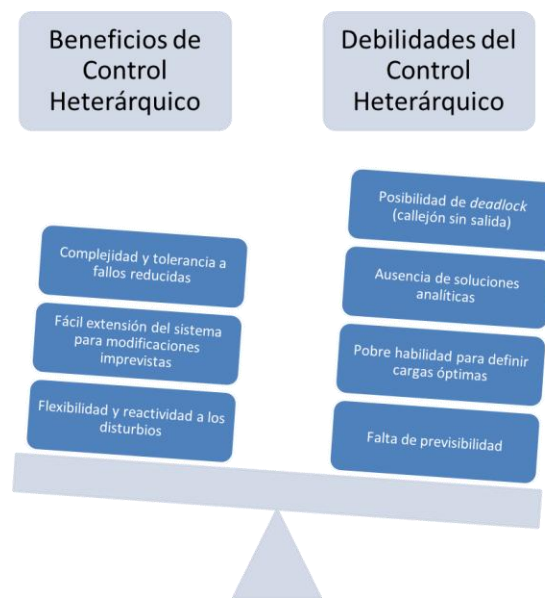
En síntesis, como sostiene Herbert Simon ganador del premio Nobel, la jerarquía está omnipresente en nuestro mundo (Simon 1996). En este contexto, la expresión jerarquía o sistema jerárquico debe ser interpretada como un sistema de subsistemas débilmente interrelacionados. Esto significa que cada uno de los niveles está en relación jerárquica respecto de otros subsiguientes, hasta llegar a algún nivel más bajo de subsistemas elementales.

Este tipo de arquitectura se aventaja de ser simple y clara en su funcionamiento, y puede funcionar en óptimos globales. Sin embargo, tiene algunas desventajas. La principal de ellas se desprende de los niveles altos de la jerarquía, puesto que estos no se conectan directamente a los sensores y es la causa de que el sistema responda lentamente ante perturbaciones. Por otro lado, para realizar sus funciones, cada elemento de la jerarquía debe poseer un modelo del sistema de fabricación. Además, si el sistema se modifica se presenta un segundo inconveniente: es difícilmente reconfigurable y escalable.

A través del manejo de agentes, las operaciones y secuencias que se encontraban restringidas en los sistemas de control de manufactura son reproducidas

por la capa ortogonal como la gestión flexible de dispositivos. Ello permite un mayor flujo de la información mediante los niveles en la pirámide de automatización, sin realizar cambios de fondo en las estructuras de software y hardware existentes (Wagner 2003). Estas tendencias promueven la incorporación de nuevos modelos distribuidos e intentan eliminar las jerarquías, de donde se proponen los sistemas *Heterárquicos*.

En relación al *Control Heterárquico*, se debe resaltar que el desempeño de los sistemas de manufactura debe considerar la flexibilidad y la agilidad del sistema de control. Las técnicas de control heterararquías introducen buena respuesta a los requerimientos de flexibilidad y agilidad (Mönch & Stehli 2006), pero degradan la optimización de la producción. En este tipo de control, el funcionamiento global del sistema se ajusta por homologación de todas –o parte de– las unidades que componen el sistema, existiendo la posibilidad de comunicar cada una de estas directamente. En la Figura 2.11 se identifican parcialmente las ventajas y debilidades para una heterarquía (Frayret et al. 2004).

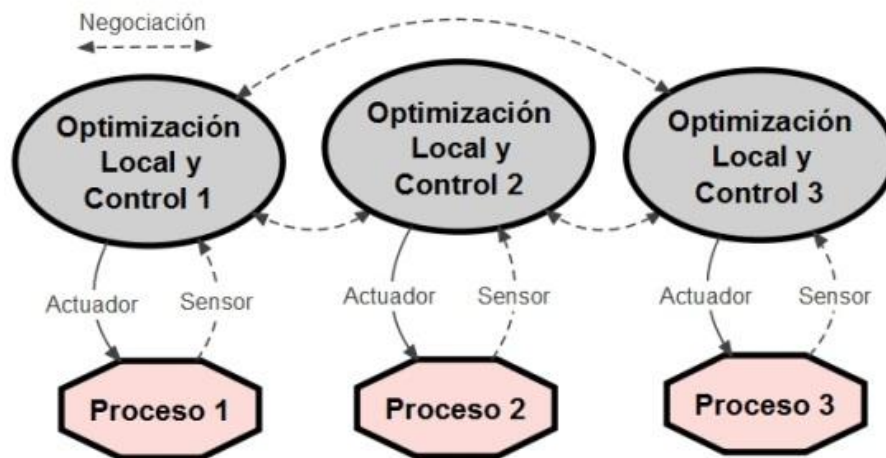


**Figura 2.11.** Beneficios y debilidades del control heterárquico.

Estos diseños brindan un buen desempeño ante cambios y pueden adaptarse continuamente a su entorno, puesto que se basan en la fragmentación del sistema en unidades pequeñas y completamente autónomas. En efecto, las arquitecturas heterárquicas se basan en una total autonomía local, cuyo resultado es un entorno en el cual los componentes cooperan para alcanzar objetivos globales gracias a la toma de decisiones locales. Los componentes autónomos de este tipo de arquitectura se denominan agentes, y la cooperación se estructura a través de protocolos de negociación. Como lo expone Giret, “*el enfoque heterárquico prohíbe todo tipo de jerarquía con el objeto de dar todo el poder a los módulos básicos*” (Giret B. 2005).



Generalmente se desempeña bien en entornos simples y su comportamiento se asimila al de la Figura 2.12 (Araúzo A. et al. 2002; Cruz S. & Rojas A. 2013).



**Figura 2.12.** Estructura modelo de una heterarquía.

Al eliminar las relaciones de jerarquía en el sistema, los módulos cooperan como iguales, lo que genera una arquitectura plana en lugar de asignar relaciones de subordinación y supervisión. Para proveer la robustez y flexibilidad necesaria se forman esquemas de comunicación; de manera que, si se genera alguna falla en un módulo, otro podrá ejecutar sus actividades. El punto principal en los modelos heterárquicos es la coordinación para prevenir la existencia de anarquías en la arquitectura y aprovechar las ventajas de distribución, modularidad, mantenimiento y reconfiguración.

Es posible identificar las siguientes ventajas de una heterarquía: flexibilidad y capacidad de reacción frente a los disturbios, facilita las extensiones del sistema y las modificaciones imprevistas, complejidad reducida y alta tolerancia a fallos (Frayret et al. 2004; Cruz S. & Rojas A. 2014). Como se aprecia, muchas de las falencias de los sistemas jerárquicos son solucionadas al distribuir la responsabilidad en una heterarquía. Sin embargo, los sistemas de control heterárquicos aún presentan las siguientes restricciones: falta de previsibilidad, pobre habilidad para definir cargas óptimas, falta de soluciones analíticas y alta posibilidad de bloqueos.

En síntesis, en esta estructura de control, cada Agente determina sus propias decisiones de actuación en relación a objetivos individuales, de las señales de control que recibe directamente de sensores y de información que recibe de otros elementos del sistema. Es fácil deducir que las características de esta arquitectura serán contrarias a las de la arquitectura jerárquica. Así, el sistema será poco transparente en su comportamiento y difícilmente podrá funcionar en óptimos globales, pero será más robusto, reconfigurable y escalable.

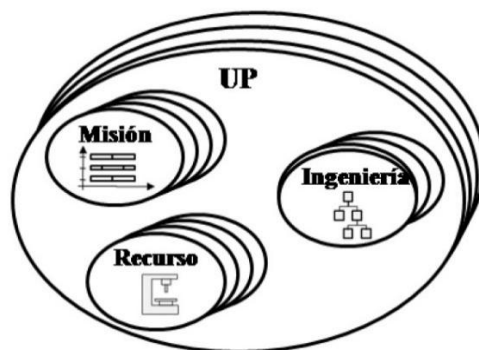
Generalmente se tiene que muchas de las falencias que se presentan en los sistemas jerárquicos son solucionadas al distribuir la responsabilidad en una heterárquia. Sin embargo, se evidencia que los sistemas de control heterárquicos presentan aún falencias significativas. Producto de los cambios actuales hacia los nuevos modelos de control de manufactura, se presenta el desarrollo de sistemas de control que combinen las técnicas heterárquica y jerárquica, satisfaciendo los requisitos impuestos por los entornos actuales. Tales casos de integración de ventajas, se implementa a través de los emergente sistemas de control de manufactura holónico (Zapata M. 2011), tratados en la siguiente sección.

### 2.3.2. Control Holárquico como Arquitectura Emergente

Los holones hacen un control descentralizado denominado control holónico, a través de sus holarquías implementadas sobre el sistema de control de manufactura. Se permite así, mejorar el nivel de reacción a disturbios de manera que se implementan políticas claras de optimización del proceso. Como se mencionó antes, y de acuerdo a (Gruber et al. 2003) una holarquía se presenta en un sistema de holones que pueden cooperar para lograr una meta u objetivo.

La holarquía define reglas básicas para la cooperación de los holones y por tanto los límites de su autonomía. Estos atributos de acuerdo a Kotak hacen que los holones sean un paradigma adecuado para materializar la concurrencia y resolver los problemas de incremento de la dinámica en sistemas de manufactura. De manera general, el control holónico usualmente se describe como un concepto que combina las mejores características del control jerárquico y heterárquico.

Aunque los sistemas de fabricación holónica se pueden aplicar en muchos ámbitos de la producción (Borangiu et al. 2016), un número sobresaliente de trabajos recientes se centran en la programación y control de plantas de producción de tipo flexible (Roulet-Dubonnet & Ystgaard 2011). En la mayoría de estos, se adopta una arquitectura órdenes-recursos. Ejemplos de estas arquitecturas son PROSA (Wyns 1999; Bongaerts 1998; Indriago et al. 2016), ADACOR (Leitão & Restivo 2006). Igualmente se encuentra la UPH (ver Figura 3.4), entre otras señaladas en detalle en el Estado del Arte del presente documento (ver capítulo 3).

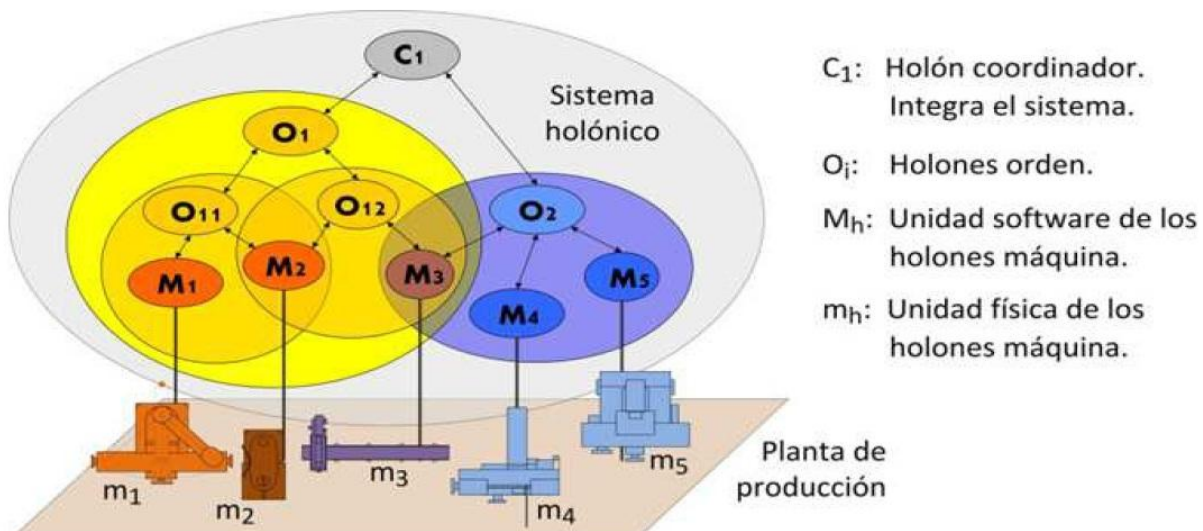


**Figura 2.13.** Unidad de Producción Holónica UPH (Chacón 2002).

El control de procesos de manufactura basados en HMS, se enfocan principalmente en el flujo de información y en la variedad de productos a elaborar. De este modo en control se basan en una estructura de unidades operacionales, sin embargo, luego de que se determina el holón, se hace necesario identificar las principales funciones que este debe desempeñar dentro de una holarquía. Las funciones se referencian como la autonomía, la capacidad de una entidad para que se cree o se controle la ejecución de sus planes y estrategias, y la cooperación en conjunto de entidades que desarrollan planes aceptables y ejecutables.

Las holarquías predominan en un sistema de control holónico de manera que allí se definen las reglas básicas para la cooperación entre holones y la autonomía. Lo anterior permite que un HMS, se integre con todos los rangos en las actividades de producción, desde registrar una orden, pasar por el diseño, producción y finalmente por mercadeo de una empresa de fabricación (Torrealba & Hernández A. 2007).

En la combinación de las ventajas de los sistemas jerárquicos y de los heterárquicos que se presenta en la fabricación Holónica, se busca al mismo tiempo que se eviten sus desventajas. Para que se pueda evitar los inconvenientes de las arquitecturas rígidas en jerarquías, los sistemas holónicos otorgan autonomía (en forma de libertad de decisión) a los entes individuales u holones. Esto se confiere al sistema como respuestas rápidas ante disturbios y le presta la habilidad suficiente para que se pueda reconfigurar a sí mismo, ante nuevos requerimientos. Además, en un sistema de control holónico se permite la integración de módulos de un rango mayor de sistemas de fabricación. En la Figura 2.14 se muestra un ejemplo de un sistema de este tipo, basado en órdenes-recurso (Araúzo et al. 2015).



**Figura 2.14.** Ejemplo de un HMS basado en órdenes-recurso (Araúzo et al. 2015).

En comparación con los sistemas de control holónicos, los sistemas de control de tipo heterárquico se pueden presentar como imprevisibles e incontrolables. Esto se hace posible debido a la inexistencia de jerarquías en las heterárquias. Por tal motivo,

los sistemas de fabricación de tipo holónico poseen jerarquías, pero de manera que se hacen flexibles, o “flojas”. Por consiguiente y acorde a Van Brussel y otros autores (Van Brussel et al. 1998), esta jerarquía se diferencia del control jerárquico tradicional, en lo siguiente puntos específicos:

- Permiten múltiples jerarquías.
- Forman jerarquías temporales.
- No dependen de otros holones para obtener sus trabajos (Autonomía).
- Actúan cooperativamente en situaciones de perturbación (Cooperación) para lograr sus objetivos.

También se ha mantenido el término de holarquía para distinguir entre las jerarquías estrictas de los sistemas de control jerárquicos, y las jerarquías flojas de los sistemas de control holónicos. Sin embargo, al otorgar reglas y consejos, la holarquía limita la autonomía de los holones individuales, para asegurar desempeños controlables y predecibles a diferencia de los sistemas heterárquicos.

En resumen, en la Tabla 2.1 se enumera las principales diferencias entre los enfoques basados convencionales (de tipo jerárquico como CIM) y las de tipo holónicas para el control de la producción. Una versión preliminar de esta tabla se da en (McFarlane & Bussmann 2003).

Soluciones de control convencional	Solución de control holárquico
El producto destinado está estrechamente considerado en el diseño de la planta y de su sistema de control	Los recursos holónicos y sus controles están diseñados de forma independiente de cualquier producto en particular
La arquitectura jerárquica está en capas que representan las diferentes funciones de control de la producción y se mantienen (capas fijas)	La jerarquía de las funciones de control es dinámicamente cambiante
El mecanismo de tipo comando/respuesta proporciona la base para la conexión entre las diferentes funciones de control de producción	La solución interactiva intercambio/simultáneo es posible entre las diferentes funciones de control de la producción
La estrategia de solución es predeterminada para funciones de control de producción individuales	La estrategia de control es determinada por la naturaleza de la operación requerida y los diferentes holones implicados
Normalmente, existe un programa de solución centralizada por cada función de control de producción individual	Normalmente, existe una solución distribuida, con las interacciones de cooperación entre los nodos, y al mismo tiempo abordan más de una función de control
El tiempo de solución de control se limita por el poder de procesamiento	La solución de control de tiempo se limita por la velocidad de las comunicaciones

**Tabla 2.1.** Características de control de tipo convencional y holónico.

Fundamentalmente, las características holónicas están destinadas a proporcionar un ambiente de control "*plug and play*"; esto es, fácil de añadir, de quitar o de volver a configurar tal como se hace en las redes de computadoras hoy en día.

Existen trabajos que se presentan en las siguientes secciones, que no se orientan exclusivamente desde el paradigma holónico. No obstante, con estas teorías

se han abordado funciones de producción en la supervisión y el control de HMS. Por ejemplo, se resaltan las denominadas *Redes de Petri* y la *Teoría de Control Supervisorio* o SCT (del inglés, *Supervisory Control Theory*). Mediante el control supervisorio se pueden resolver problemas de alcanzabilidad de estados discretos en HMS, específicamente desde los denominados Sistemas a Eventos Discretos.

## 2.4. Sistemas Dinámicos a Eventos Discretos (SED)

Los Sistemas Dinámicos a Eventos Discretos (SED), que se anuncian en el capítulo 1 (ver sección 1.1), pertenecen a los sistemas dinámicos variantes en el tiempo y tienen características no lineales. Una gran totalidad de los sistemas dinámicos a gran escala se pueden considerar como SED (Muñoz A. 2015). En la Figura 2.15 se muestra como se categorizan los sistemas, y se señala que los SED se constituyen como una subclase fundamental de la familia derivada de los sistemas de estados discretos.

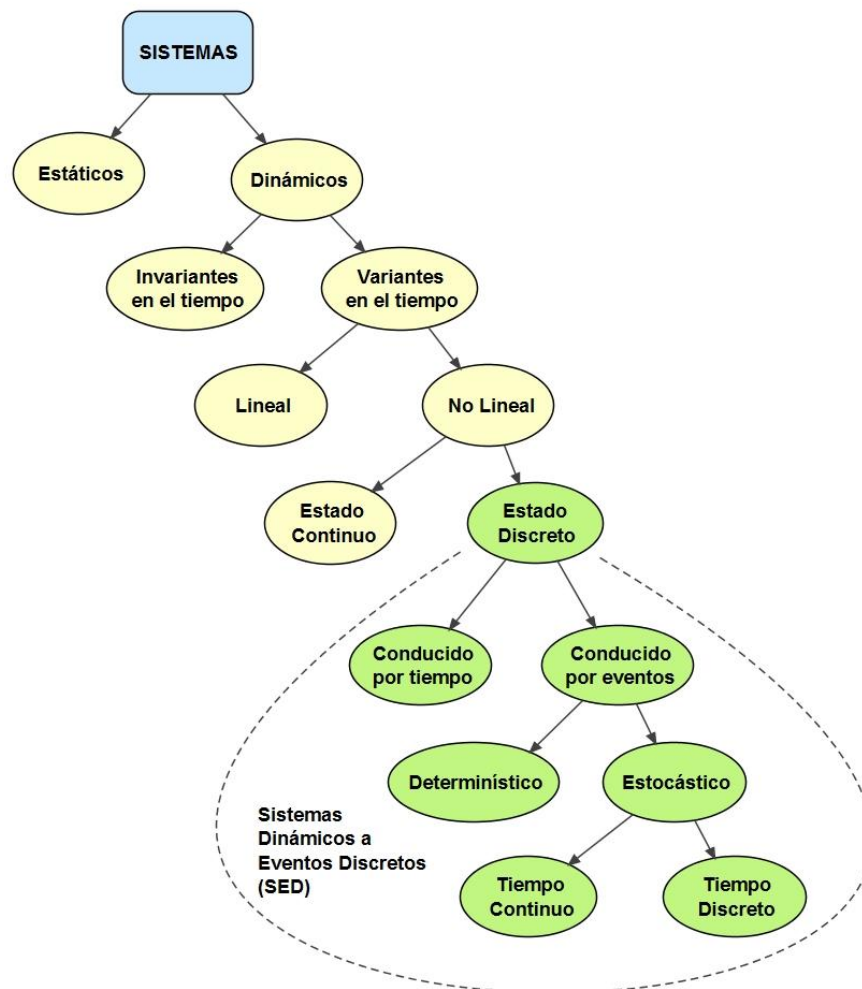


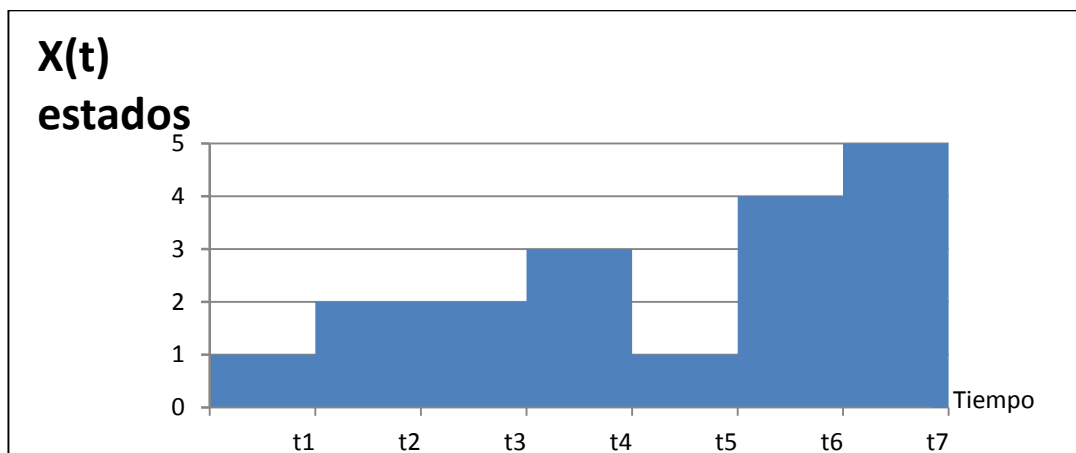
Figura 2.15. Categorización de sistemas hasta SED.

Dentro de la literatura existente, se tiene que las dinámicas de las arquitecturas de tipo holónica se establecen mediante SED. La mayoría de trabajos coinciden en que el comportamiento del holón se influencia por la ocurrencia de eventos discretos (Zapata M. 2011). De esta forma, se hace necesario que el sistema holónico se dote de mecanismos necesarios para el control desde SED, de manera que se pueda responder con los diferentes atributos que se les infiere (ver sección 2.4.3).

Los SED son dinámicos puesto que se desenvuelven dependiendo de la ocurrencia de eventos. Un evento puede ocurrir en un momento dado, y no siempre dentro de un rango de tiempo determinado (Yi-Liang Chen & Feng Lin 2000; Huang et al. 2004). Algunos SED se aplican en comunicaciones, sistemas computacionales y tienen relevancia sobre sistemas de manufactura (por ejemplo, en acoplamiento de máquinas o vehículos, celdas o unidades de manufactura, entre otras). Las características de estos sistemas se diferencian puesto que se dan en situaciones simultáneas o concurrentes. Lo anterior implica que existan tareas para que se sincronicen o se eviten conflictos en su desenvolvimiento. Se entiende como tareas, estados del sistema que establecen por un valor simbólico (o lógico), y no se tienen números, de manera que se evoluciona en relación a la ocurrencia o secuencia de eventos (Ramadge & Wonham 1989).

En la Figura 2.16, se expone un concepto general de lo que sería un estado de SED. En cada estado de la figura mencionada, se le establece una etiqueta, y el conjunto  $X(t)$  de estados es finito y discreto. Las etiquetas representan generalmente fenómenos físicos que se encargan de que el estado cambie.

Los estados cambian de manera dinámica, puesto que se hacen dependientes del tiempo y de otros estados anteriores. Así un estado se transforma en otro, de acuerdo con la ocurrencia que se tenga, de otro evento que pertenece a un conjunto igualmente discreto y finito. Un ejemplo de estado se puede representar como el arranque de una máquina, la parada de un motor o la falla en una válvula.

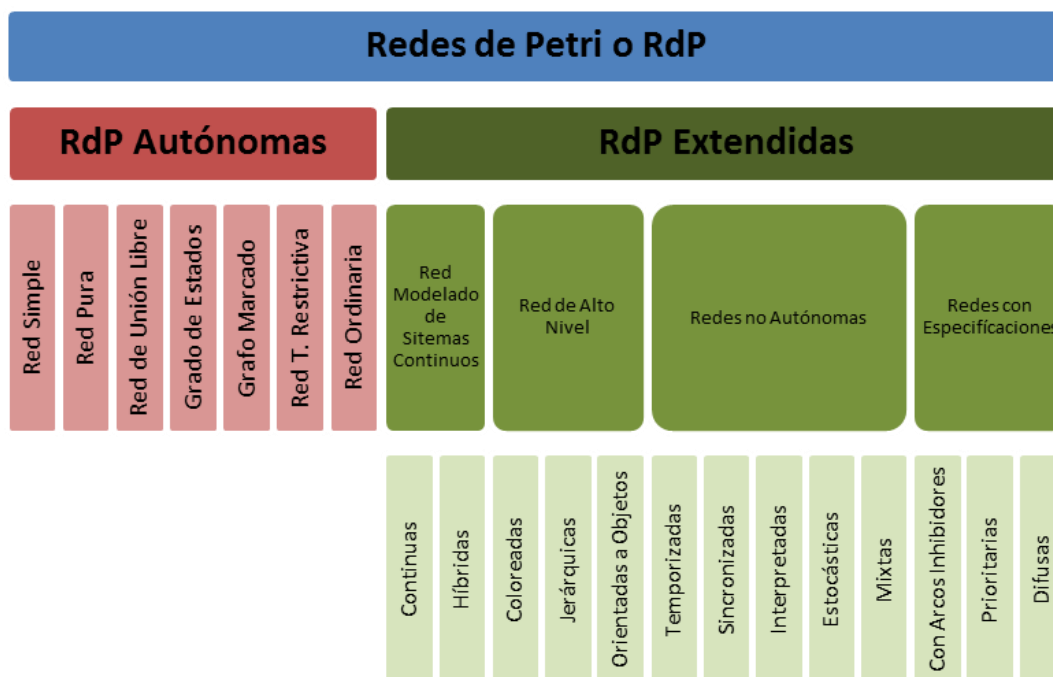


**Figura 2.16.** Trayecto de estados en tiempo de un SED.

Los SED se clasifican de acuerdo a las clases de ocurrencias que se tiene en el tiempo; esto es: Determinísticos, Estocásticos y con o sin Temporizar. Además de la interpretación gráfica del sistema a modelar, también se debe realizar el formalismo matemático, de manera que estos se puedan evaluar a través de herramientas de simulación (o sistemas computacionales), como se explica en las siguientes secciones.

### 2.4.1. Redes de Petri (RdP) aplicadas a Sistemas SED

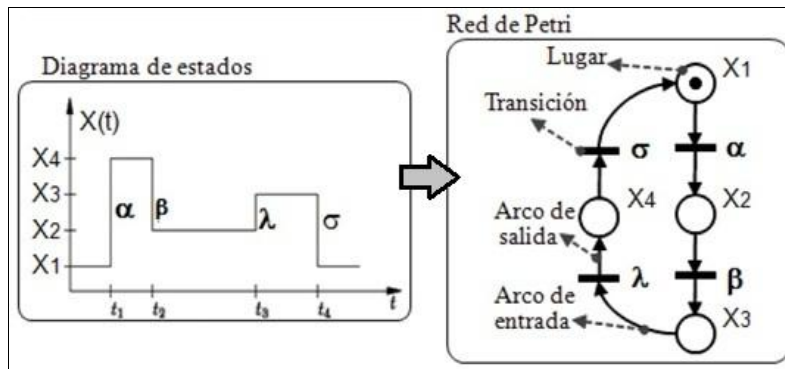
Los formalismos matemáticos que sobresalen en el ámbito académico para SED, son los *Máquinas de Estados Finitos* (Autómatas) y las *Redes de Petri* o RdP (Lin & Lin 2004; Muñoz et al. 2014). Ambas se muestran con el mismo fin de representar modelos matemáticos para su posterior implementación y validación. Respecto a las RdP, estas se exponen en muchos trabajos gracias a su interdisciplinariedad de las ciencias exactas. Por su diversidad, se les considera una importante herramienta gráfica y matemática en el uso de modelado de SED, entre otros tipo de desarrollos (Gaviria et al. 2015). El mapa conceptual de la Figura 2.17 ilustra las clases y subclases de RdP implementadas según su aplicación.



**Figura 2.17.** Clasificación de las Redes de Petri.

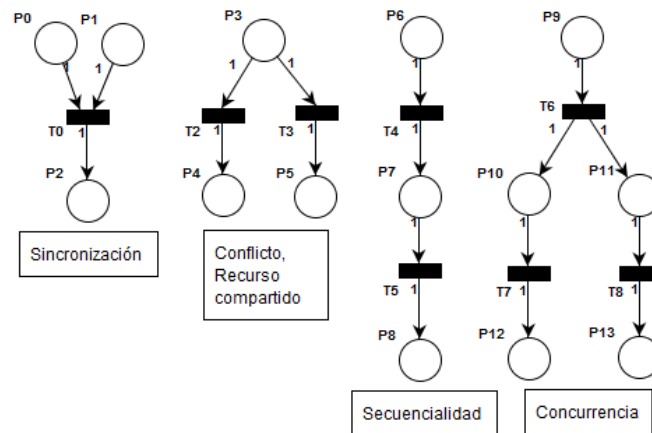
Este tipo de redes son idóneas para que se puedan modelar sistemas mediante el uso de relaciones causales, que son de precedencia entre eventos y situaciones. Esto es, que en una RdP se facilita la forma de simbolizar diferentes cambios simultáneos, siendo estos fundamentales en el modelo y análisis dinámico de un sistema de manufactura.

En trabajos como (Quintero H. 2009; Zapata M. 2011), se expone la Figura 2.18 como muestra de la representación de SED con Redes de Petri. Esta figura personifica la relación del recorrido que se define mediante un sistema dinámico a eventos discretos y su respectiva RdP (que representa esta trayectoria). En esta figura la evolución entre los estados de  $X_t$  ( $X_1, X_2, X_3$  y  $X_4$ ) sucede gracias a la ejecución de los eventos  $\alpha, \beta, \lambda$  y  $\sigma$ .



**Figura 2.18.** Representación de un SED a través de una RdP (Zapata M. 2011).

Con una Red de Petri se permite modelar cualquier tipo de SED; esto se resalta como una de sus principales ventajas frente a otros formalismos. Características tales como: compartición de recursos, concurrencia o sincronización, se facilitan al modelar con una RdP (Quintero H. 2009), como se ilustra en la Figura 2.19.



**Figura 2.19.** Características representativas de Redes de Petri.

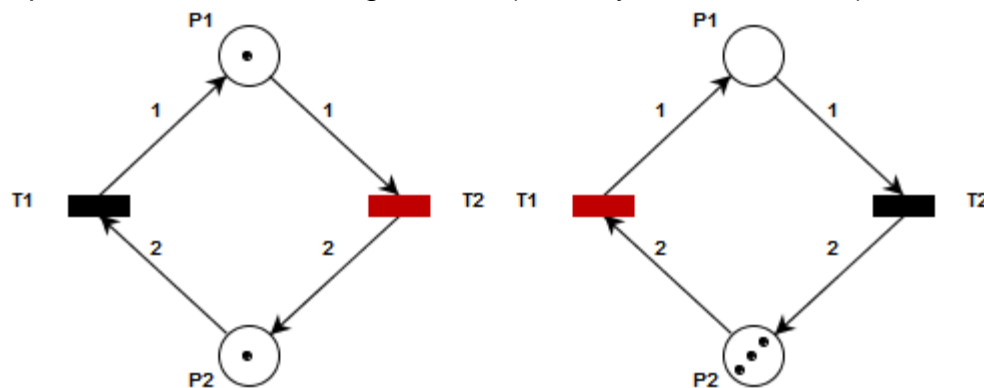
De igual forma, se han obtenido demostraciones de aplicaciones en el análisis, simulación e implementación de sistemas de control, que se aplican a procesos de producción. Sin embargo, las RdP también tienen algunos inconvenientes, que se deben considerar a la hora de trabajar con estos modelos. Mediante la Tabla 2.2 se confrontan algunas de sus principales ventajas frente a sus debilidades (Gaviria et al. 2015; Calvo G. & Collazos A. 2015; Muñoz A. 2015).



Ventajas	Debilidades
Relacionan interacciones entre diferentes eventos que pueden ser estocásticos, concurrentes y asincrónicos	El tiempo y el consumo de espacio aumenta significativamente en relación a considerablemente al alcance del modelo
Representan esquemas gráficamente y esto ayuda a ver un sistema globalmente	
Facilitan modelar eficientemente los tamaño de buffers y demás conflictos de la red	Presentan inconvenientes en su análisis, sujetos a lo complejo del sistema que se modele
Ayudan a detectar los bloqueos del sistema	
Tienen un desarrollo matemático de respaldo y muy práctico	
Se pueden usar para implementar control de sistemas de fabricación flexibles en tiempo real	Una RdP general, usualmente no permite modelar algunas situaciones de los sistemas como por ejemplo, los requisitos prioritarios
Se prestan para el análisis de sistemas simples y complejos, que pueden incluir el diseño de supervisores	
Admiten los análisis de tipo cualitativo y cuantitativo en el uso de recursos, consecuencia de fallas en equipos, desempeño y rendimiento, entre otras mediciones	Las clases derivadas de las RdP generales, son muy específicas para los diferentes problemas y aplicaciones. Por ejemplo, una RdP ordinaria no permite caracterizar un evento o su temporización (típico en sistemas de automatización industrial)
Existen varias subclases (extensiones): autónomas, extendidas, temporizadas, jerárquicas, estocásticas, coloreadas, entre otras	

**Tabla 2.2.** Ventajas frente a debilidades del análisis con RdP.

Las Redes de Petri se implementan en los sistemas de control de manufactura tanto a bajo nivel como en alto nivel (ver concepto en sección 2.3). En el caso del control a bajo nivel, se pueden determinar las diferentes interacciones entre los recursos del proceso (sensores, actuadores, controladores etc.), para que se establezcan tareas delimitadas. En el control de alto nivel, se pueden implementar RdP en el diseño de supervisores que se encarguen de coordinar el funcionamiento de una unidad de producción (Ramadge & Wonham 1989). Un ejemplo de la dinámica de RdP se representa mediante la Figura 2.20 (Buchely & Ruiz C. 2012).



**Figura 2.20.** Trayectoria de un marcado en una RdP (Buchely & Ruiz C. 2012).

En la Figura 2.20, los lugares se representan con las letras P1 y P2 y las transiciones con las letras T1 y T2. También se representan los arcos con flechas y sus pesos mediante los respectivos números aledaños a estas. En la misma Figura 2.20x se ilustra una de las reglas de transición. Por ejemplo, al lado derecho de la figura, se puede notar que la transición T2 se encuentra habilitada para disparar; esto es, que se supera el número de marcas sobre los lugares de entrada (Pre), al número

de pesos de los arcos dirigidos (ver lado izquierdo de la Figura 2.17). Luego de que se dispara la transición T2, ese presenta un aumento de marcas desde Lugares de Entrada hacia el Lugar de Salida (ver lado derecho de la Figura 2.17).

Las RdP se usan como herramientas gráficas y matemáticas gracias a que poseen numerosas propiedades. Estas características se dividen en: i) según la estructura, se denominan **Propiedades Estáticas** y ii) según el marcado inicial, se conocen como **Propiedades Dinámicas** (Yi-Liang Chen & Feng Lin 2000; Murillo 2008). Un resumen de las propiedades más importantes de las redes de Petri se describe mediante la Tabla 2.3.

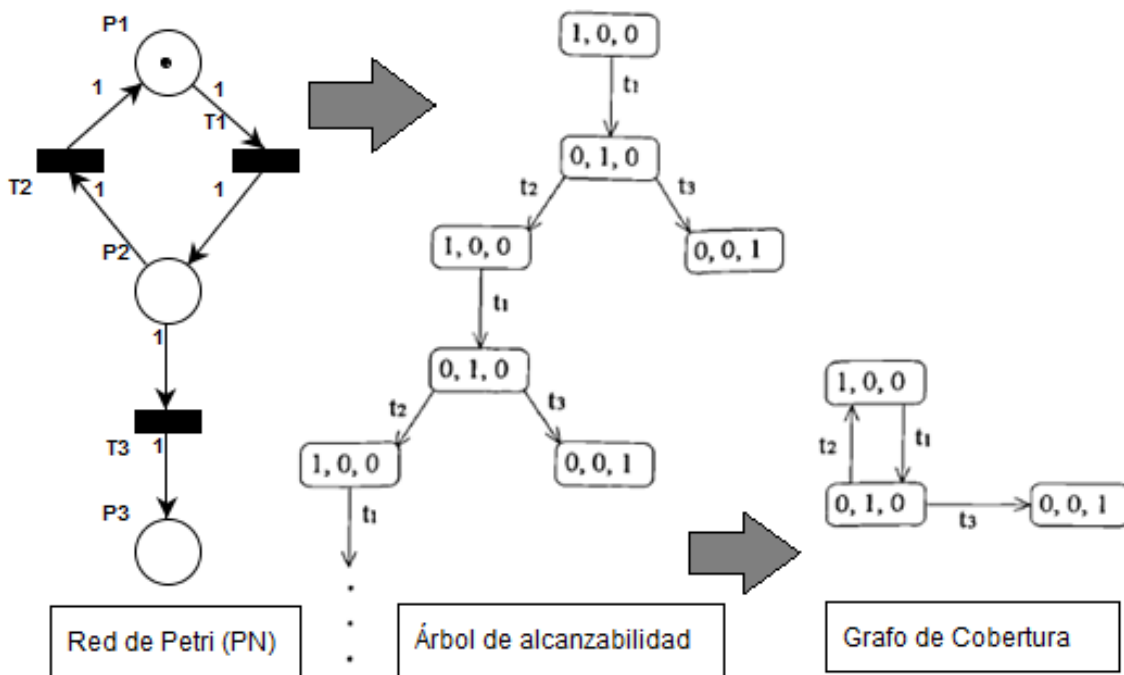
Propiedades Estáticas		Propiedades Dinámicas	
Controlabilidad	Cuando en una RdP se puede alcanzar cualquier marcado $\mu_k$ , desde el marcado inicial $\mu_0$ . Es decir, una RdP es completamente controlable en el Rango $(D) = m$ , de donde $D$ es la matriz de incidencia y $m$ los lugares	Alcanzabilidad	Cuando el marcado se cambia mediante el disparo de una transición habilitada. Si la RdP es pura, no posee auto-bucles. Es decir, que un marcado posterior a la inicial de la RdP, se alcanza a través del disparo conveniente de la(s) transición(es). Un marcado $\mu_i$ se alcanza desde un marcado inicial $\mu_0$ si hay una secuencia de disparos $\sigma = t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ que cambie las marcas desde $\mu_0$ hasta $\mu_i$ . Se expresa $\sigma   \mu_0 > \mu_i$
Limitado estructural	Si se limita dentro de cualquier marcado inicial finito. Se tiene en cuenta que el número de marcas en todo lugar siempre es menor o igual a un límite $\mu_0$	Limitada o Acotada	Si el número de marcas en cada lugar de la RdP no sobrepasa el umbral $k$ finito de marcas ( <b>k-limitada</b> ), esto para cualquier marcado alcanzable desde $\mu_0$
Consistencia	Es consistente cuando desde un marcado $\mu_0$ hasta $\mu_k$ , se presenta una secuencia de disparos $\sigma$ . Además las transiciones que se establecen en $\sigma$ se disparan al menos una vez	Seguridad	Si todos sus lugares (cualquier marcado dado en la red), no mantienen más de una marca. Esto se expresa como <b>1-limitada</b>
Conservabilidad	Puede ser total o parcialmente conservativa. Cuando se presenta un entero positivo $x(p)$ para cada –o para algún– lugar $p$ , tal que la sumatoria de las marcas, $\mu_0^T x = \mu^T x$ , sea constante para los marcados posteriores a $\mu_0$ . Esta ecuación precisa un invariante de lugar	Conservabilidad	El número de marcas en la RdP es constante para todos los marcados alcanzables
Vivacidad estructural	Si esta cuenta con un marcado inicial	Vivacidad	Cuando es posible una nueva secuencia de disparos $\sigma$ , sin tener en cuenta el marcado que se alcance. Una RdP es viva si sus transiciones lo son. Y si un sistema que se modele y controle mediante Redes de Petri es una RdP viva, implica que el sistema no tendrá bloqueos en su operación
Repetitividad	Es repetible cuando desde un marcado $\mu_0$ hasta $\mu_k$ , se presenta una secuencia de disparos $\sigma$ . Además las transiciones que se establecen en $\sigma$ se disparan infinitamente	Reversibilidad	Es reversible cuando $\mu_0$ es alcanzable desde cualquier marcado que se realice posterior a $\mu_0$

<b>Invariabilidad</b>	Se presenta <b>S-invariante</b> o <b>T-invariante</b> si $D^T x = 0$ o $Dy = 0$ , para un <b>n-vector</b> $x$ o <b>m-vector</b> $y$ , respectivamente	<b>Persistencia</b>	Cuando se presentan varias transiciones que se han habilitado, y el disparo de alguna de ellas no inhabilita a las demás
-----------------------	---	---------------------	--

**Tabla 2.3.** Principales propiedades de las Redes de Petri.

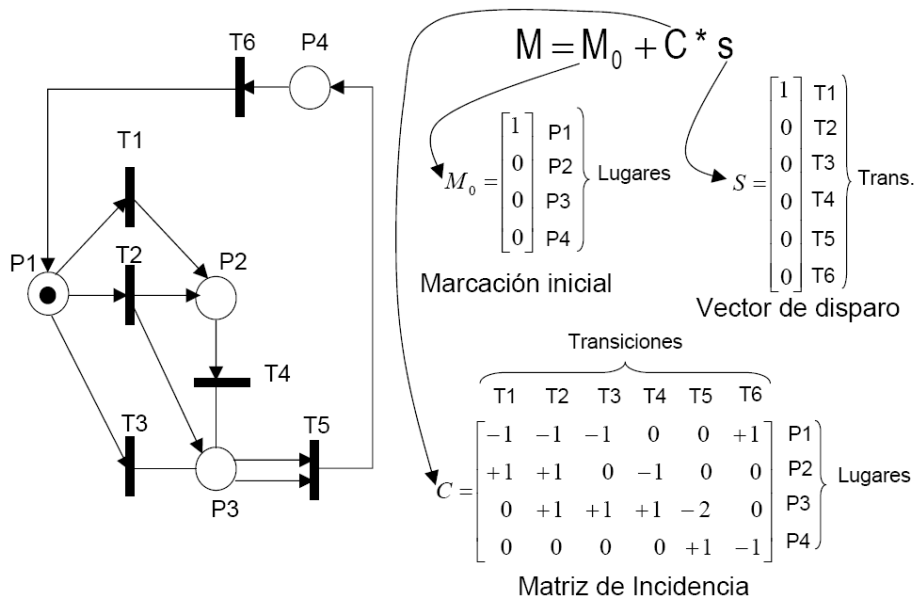
Se debe aludir que las *Propiedades Estáticas* se aplican para *Redes de Petri Puras y Ordinarias*. Esto significa que una RdP es pura si ningún lugar es a su vez, entrada y salida de una misma transición. Y una RdP ordinaria, se origina dado el caso en que el peso de todos los arcos se hace unitario.

En el análisis de las Redes de Petri dentro de las propiedades dinámicas, se presentan además tres técnicas (Murata 1989): i) Método basado en el grafo, ii) Método Matemático y iii) Reglas de Reducción. En la Figura 2.21 se puede observar una RdP con su respectivo árbol de alcanzabilidad y grafo de cobertura (Buchely & Ruiz C. 2012).



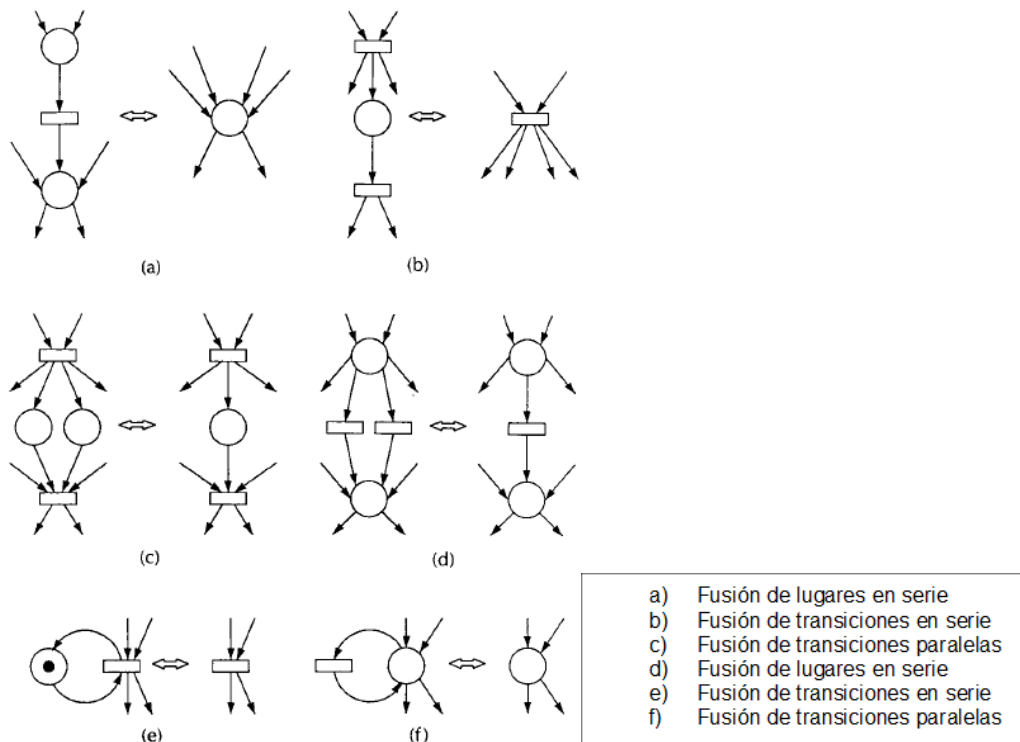
**Figura 2.21.** Métodos basados en grafo de Red de Petri (Buchely & Ruiz C. 2012).

En la Figura 2.22 se da un ejemplo del modelo matemático de Red de Petri mediante su ecuación de estado. En el modelo se muestra a partir de la RdP, la matriz inicial, su matriz de incidencia y su vector de disparo.



**Figura 2.22.** Representación matricial de una Red de Petri.

Existen reglas de reducción (Murata 1989), que se usan para convertir sistemas complejos, en sistemas más simples logrando disminuir el número de nodos de la RdP (lugares y transiciones). Este método permite que la nueva RdP conservar sus propiedades originales. Estas reglas de reducción se enlistan en el siguiente orden y se ilustran mediante la Figura 2.23:



**Figura 2.23.** Reglas de reducción en Redes de Petri (Murillo 2008).

## 2.4.2. Teoría del Control Supervisorio (SCT) con RdP

El diseño de un controlador o la aplicación de la Teoría de Control Supervisorio SCT (del Inglés, *Supervisory Control Theory*), permiten que las etapas o estados en un SED, se puedan dar de manera ordenada (Ramadge & Wonham 1989). Lo anterior se hace muy útil puesto que, en los SED, se presentan algunos estados que no se desean, denominados *Estados Prohibidos*. Estos estados incumplen con los requerimientos normales de un sistema y se convierten en típicos problemas de control. El diseño del supervisor se encarga de evitar que el sistema entre en los estados prohibidos y se apoya en la selección de un conjunto de eventos controlables.

La función principal que se debe cumplir en el diseño de un supervisorio, es entre otras, evitar que el sistema se pueda quedar bloqueado (en estados de bloqueo), y que el sistema nunca alcance los estados prohibidos. También es función del supervisor que este sea lo más permisivo posible. En el diseño de SED con Redes de Petri, se presentan dos enfoques que se denominan *Supervisor Mapeado* y *Supervisor Calculado* (Gaviria et al. 2015). El primer enfoque –el supervisor mapeado– se obtiene mediante el cálculo del controlador on-line, que a su vez hace la función de realimentación en el marcado del sistema. En segundo lugar –el supervisor calculado– se calcula teniendo en cuenta que, en la estructura de la RdP, se encuentra la política de control.

Sumado a las condiciones de los Estados Prohibidos y de las Secuencias deseadas, en el control supervisorio se incluye una serie de especificaciones denominadas con las siglas GMEC (del inglés, *Generalized Mutual Exclusion Constraints*). Estas se utilizan en la limitación del uso concurrente de recursos finitos. Una GMEC se encarga de condicionar la cantidad de marcas que se deben contener, dentro de una cantidad de lugares de la RdP (o subconjunto de la RdP).

Los GMEC se pueden implementar mediante el uso de un monitor. Un monitor es un conjunto de lugares que se conectan a transiciones mediante arcos. Así, los GMEC requieren de condiciones iniciales y lugares de control, que incluyen restricciones (Moody & Antsaklis 2000). Si se tiene  $\langle N, \mu_0 \rangle$ , una restricción  $(l, b)$ , se define en un conjunto de marcados válidos mediante la ecuación (2.4), así:

$$M(l, b) = \{\mu_p \in \mathbb{Z}^n, \mu_p \geq 0 \mid l^T \mu_p \leq b\}, \quad (2.4)$$

Donde,

- $M(l, b)$  es la RdP de un sistema con  $n$  lugares.
- $\mu_0$  es el marcado inicial del sistema.
- $\mu_p$  es el marcado del sistema.
- $b$  es un escalar entero.
- $l^T \mu_p \leq b$  es la ecuación algebraica lineal que define un invariante de lugar.

Un monitor surge gracias a que el objetivo del controlador es permitir que en una planta (RdP de  $n$  lugares y  $m$  transiciones), se cumplan las restricciones de la forma  $l^T \mu_p \leq b$ . Por ejemplo, si se necesita aplicar la restricción  $\mu_3 + \mu_4 \leq 1$ , esto se interpreta como que en uno de los lugares  $p_3$  o  $p_4$ , se puede contener tan sólo una marca en un instante de tiempo. En definitiva, siempre se puede obtener una ley de control máximamente permisiva para un conjunto de restricciones, cuando se implementa un conjunto de monitores.

Para el caso de los HMS, su comportamiento global se obtiene desde el acople de la dinámica del sistema de control, con las que se tienen en el proceso y los recursos (Zapata M. 2011). En la arquitectura UPH, por ejemplo, se fundamentan objetivos para cumplir con metas de producción, en donde se tienen entidades supervisoras (otros holones). Estas últimas se encargan de que las acciones se restrinjan a alcanzar los estados deseados y se evite alcanzar los estados prohibidos, como típicos problemas abordados desde la teoría de control supervisorio.

### **2.4.3. Propiedades de Autonomía, Flexibilidad, Cooperación, Proactividad en HMS**

Dentro de un HMS, un holón se ve como un recurso inteligente, que debe cumplir con unos objetivos y que debe cooperar (si se necesita) con otros recursos u holones (Chacón 2002). Un holón cuenta con planes de producción, y en términos de estos, se establece como será la forma de lograr sus metas.

Para el cumplimiento de metas en las arquitecturas holónicas de fabricación, se hace necesario el aprovechamiento tanto de las características inherentes (ver sección secciones 2.1 y 2.2), como de los atributos en las entidades que los componen (holones). De hecho, para que un sistema se considere HMS debe contar entre otras, con propiedades de Autonomía, Flexibilidad, Cooperación y de Proactividad. Lo anterior provee al sistema características que facilitan la tolerancia a fallos, descentralización, robustez y escalabilidad. Además, le brinda otras singularidades como la agregación, auto-similaridad y especialización (Arboleda C. 2011).

Las principales propiedades o los atributos de un HMS que se consideran como básicos y que se complementan en trabajos destacados (Zapata et al. 2014; Zapata M. 2011; Quintero H. 2009; Palacio B. 2013), se consiguen agrupar en los siguientes:

**Atributo de Autonomía:** se considera como la capacidad para que, en un HMS, un holón se cree, se controle y se monitoree sin la acción directa de un ente externo. Esto se hace, de acuerdo a la ejecución de sus propias metas y dentro de los planes de producción. Ello implica realizar las acciones correctivas y necesarias dado el caso en que se presente su mal funcionamiento. Un holón cuenta con su agenda de producción, en las que se incluyen actividades y el estado de su avance. El uso de esta información le aporta los datos necesarios para que se desarrolle de la manera apropiada en su propia misión. De esta manera, se entiende que el holón tiene la

habilidad de establecer y controlar sus objetivos, tomando sus propias decisiones y sin que se consulte a otras entidades (de orden superior en la holarquía).

**Atributo de Flexibilidad:** este se refiere a la habilidad de la que se puede beneficiar un HMS al adaptarse a múltiples situaciones, sin que se afecte considerablemente su desempeño. Un sistema se considera flexible porque se puede cambiar con el tiempo, basado en la demanda de los productos o en los requerimientos del cliente. También se hace flexible en el instante que se presenten acciones tales como: cuellos de botella, fallas de subprocesos (o máquinas), reconfiguración de órdenes de producción, ingreso de nuevas prioridades, entre otras. Así, esta propiedad requiere de una estructura de control robusta e inteligente, propia de los sistemas inteligentes de manufactura, como son los de tipo holónico (Mönch & Stehli 2006).

**Atributo de Cooperación:** este permite que en el HMS se generen diferentes acuerdos para que se ejecuten actividades mutuas, cuando se hace necesario. Este atributo provisiona a los holones de acciones e incidencias conjuntas como, por ejemplo, cuando se presentan perturbaciones en el sistema. La colaboración entre holones tiene como propósito la consecución de objetivos comunes y se hace mediante intercambio de información y la *Agregación*. Una agregación sugiere que se realizan cooperaciones dentro de un mismo nivel, es decir, entre holones subordinados. No obstante, un holón puede conformar más de una agregación, dentro de una HMS (Liu et al. 2008). Un holón se subordina de manera que se hace dependiente de la dinámica que se manifiesta en la holarquía temporal. Cuando un holón se separa de una agregación, se le denomina *Especialización*.

**Atributo de Proactividad:** es la destreza que se tiene en un HMS de manera que sus holones se pueden desarrollar con una iniciativa propia, pero que se basa en sus objetivos. Esta capacidad de respuesta (que se presenta en un holón), se desenvuelve dentro de un entorno determinado y sin que se espere algún cambio del mismo. No obstante, la función principal de este atributo en el HMS, es que el holón se anticipe a cualquier condición de falla. Así, en un HMS se pueden evitar futuras situaciones que se puedan convertir en riesgos o en el aumento de la probabilidad de incumplimiento de la agenda de producción. Para que se pueda ser proactivo y los objetivos se cumplan, el holón debe contar con mecanismos de toma de decisiones, como los expuestos en el atributo de autonomía.

**Atributo de Reactividad:** a diferencia de la proactividad, este atributo le permite a un HMS que responda ante cambios del entorno del sistema. Esto significa se pueden cambiar los objetivos internos de cada holón, dado el caso que se requiera salvaguardar alguna tarea (actual o futura) que falte por realizarse dentro de la agenda. Este atributo se encarga de mantener la productividad en términos de confiabilidad, de manera que se reduzca el tiempo de inactividad al detectarse inconvenientes o problemas.

## 2.5. Formalismos de Modelado Estructural y Dinámico en Sistemas

En sistemas de control de manufactura se presume de una arquitectura que se conserva en el tiempo y que permita su fácil comprensión, aplicabilidad y extensión. Esto se tiene en cuenta cuando se desea generar topologías que se consideren en sistemas de fabricación flexible y que respondan ante los actuales requerimientos mencionados en el capítulo 2 (ver sección 2.4.3). Así, para que se pueda desarrollar una aplicación computacional de manera eficiente y que cumpla con los requisitos de control, se requiere minimizar el trabajo de recodificar y crear líneas de código repetibles e inútiles. Esto se concibe en el desarrollo de sistemas desde perspectivas dependientes tanto del dominio del sistema como del tiempo. De esta forma existen características específicas pero que se complementan y que se deben analizar desde el punto de vista estructural (dominio del sistema), como otras de tipo dinámico (dependientes del tiempo).

Existen formalismos con el fin de obtener un modelo que represente lo suficientemente bien el sistema y las características que se deseen analizar. El modelado es la espina dorsal de todo desarrollo de software de Calidad Total<sup>8</sup>. Se construye un modelo de manera que se pueda comprender, en primera instancia por su creador. Así se evitan futuras ambigüedades y se disminuye el riesgo de poca trazabilidad en el diseño del sistema. El modelado de sistemas facilita solventar problemas que parecieran tener una solución imposible. Desde el punto de vista de los desarrolladores, sin un modelo no se podrían cumplir los plazos estimados, o no se consigue extender la aplicabilidad del sistema (Gutierrez P. 2015).

Además del proceso de abstracción, se presentan conceptos propios de la generación de modelos, provenientes de paradigmas como la *Programación Orientada a Objetos* o POO. Clásicos ejemplos que se tienen en modelado de sistemas son las jerarquías graduales en modelos de IDEF0 o las concepciones de Clases y Objetos<sup>9</sup>, típicos en diagramas UML. Ambos formalismos de modelado son sobresalientes en el modelado de sistemas y se detallan en las siguientes secciones.

### 2.5.1. Diagramas de Modelado IDEF0, características generales

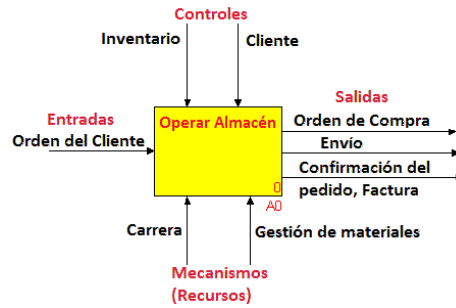
El IDEF0 (del Inglés, *Integration Definition for Function Modeling*) se define como una metodología para modelar las decisiones, acciones y actividades de la organización de una empresa o de un sistema (KBSI 2014). IDEF0 permite que se puedan comunicar expertos en el dominio del tema, de manera que se pueda realizar un consenso en la toma de decisiones mediante el uso de gráficos jerárquicos y simplificados. La sintaxis básica de un modelo IDEF0 se muestra en la Figura 2.24.

---

<sup>8</sup> Calidad Total se refiere a niveles de diferentes enfoques en las fases de un proyecto (informático, industrial, civil, entre otros).

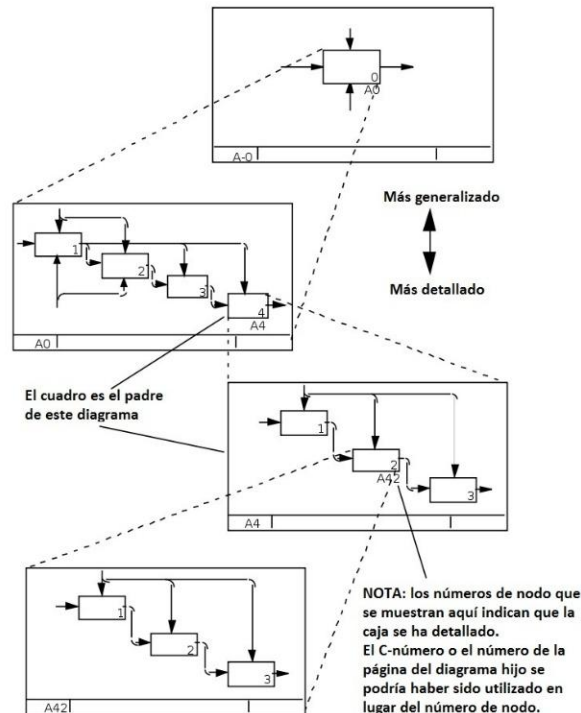
<sup>9</sup> Clases y Objetos, son representaciones abstractas que se relacionan, tienen el mismo patrón estructural y de comportamiento.





**Figura 2.24.** Esquemas básico de un IDEF0 (IBM 2014).

Un modelo de sistema mediante IDEF0 se puede crear para determinar que sucede con el comportamiento estático actual del sistema. En sus nociones básicas se sigue una representación a base de "cuadros y flechas". En estos esquemas se muestra una función del sistema como un cuadro y se le asocian interfaces hacia o desde la función mediante flechas entrantes o salientes de las cajas (de otras o de la misma función). Para que se expresen otras funciones, estas se deben entender como cuadros que se operan de forma simultánea. Se concibe que las flechas de interfaz se "limitan" a cuándo y a cómo las operaciones se activan y se controlan. Las flechas siguen un estándar ICOM<sup>10</sup> (ver Figura 2.24), y se trazan internamente como actividades operativas, o se dibujan fuera de las cajas para simbolizar una entrada (izquierda), actividades de control (arriba), de salida (derecha) o mecanismos (abajo).

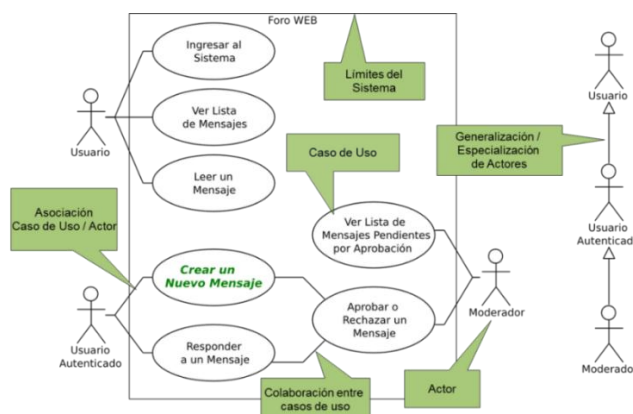


**Figura 2.25.** Descomposición de un modelo IDEF0 (IBM 2014; KBSI 2014).

<sup>10</sup> ICOM es un acrónimo en inglés utilizado en IDEF0 para *Input, Control, Output, Mechanism*.

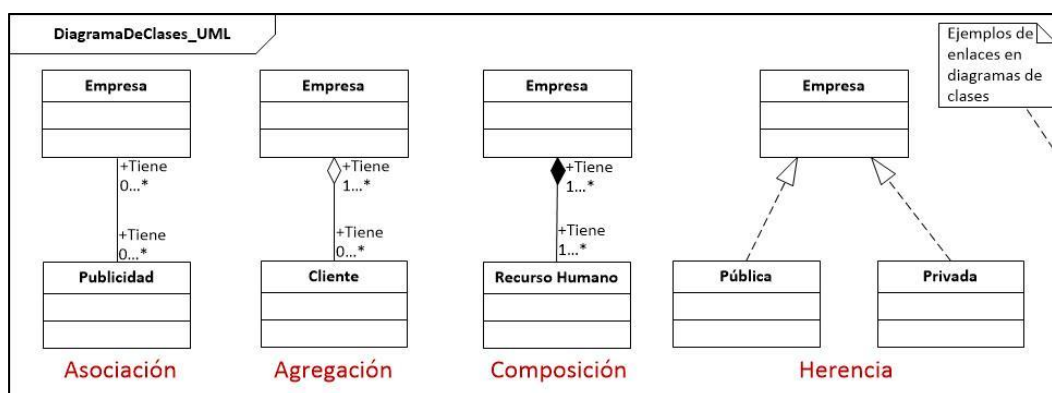
## 2.5.2. Lenguaje de Modelado Unificado UML, conceptos y tipos

UML<sup>11</sup> (del inglés, *Unified Modeling Language*) es un lenguaje de modelado estandarizado que se forma a partir de un conjunto de símbolos (notación) y un grupo de reglas (semántica). UML cuenta con varios tipos de diagramas para hacer análisis y diseño de sistemas de tipo estático (estructural) y dinámico. Dentro del análisis *estructural de sistemas* con UML, se encuentran las representaciones a través de: *diagramas de casos de uso*, *diagrama de clases* y los *diagramas de objetos*. En (Gutierrez P. 2015) se ilustra la Figura 2.26, un ejemplo representativo de un foro web mediante un diagrama de caso de uso.



**Figura 2.26.** Ejemplo de Diagrama UML de Casos de Uso (Gutierrez P. 2015).

En el caso de análisis *dinámico de sistemas*, se cuentan con varios modelos UML, que se denominan: *diagrama de actividades*, *diagrama de secuencias*, *diagrama de colaboración* y *diagrama de estados*. No obstante, el diagrama UML de clases es el principal diagrama de análisis estático para un sistema (no dinámico) puesto que se centra en los elementos del sistema de forma independiente del tiempo. En la Figura 2.27 se representan ejemplos sencillos de diagramas de clase y el uso de diferentes tipos de enlaces.



**Figura 2.27.** Ejemplo de Diagrama UML de Clases y las interrelaciones básicas.

<sup>11</sup> Página web oficial disponible en: <http://www.uml.org>

En el diagrama UML de secuencias se muestra la forma en que un grupo de objetos y clases se comunican o interactúan entre sí, transcurrido un tiempo (Gutierrez P. 2015). Un ejemplo clásico de diagrama de secuencias y sus partes se expone en la Figura 2.28, en donde se refleja la interacción de la secuencia de un mensaje de correo electrónico.

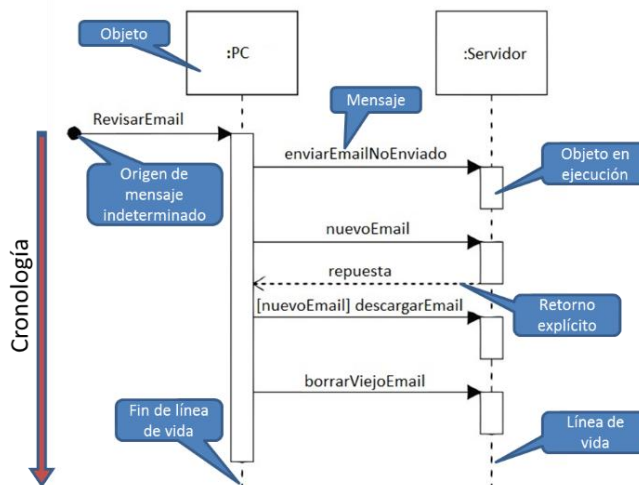


Figura 2.28. Ejemplo de Diagrama UML de Secuencias y sus partes (IBM 2014).

## 2.6. Supervisión de Procesos de Manufactura

Al respecto de los niveles de las etapas de producción y sus particularidades, se expone el estándar ISA 95 (también ANSI o IE62264). ISA 95 (ISA-95 2013), es una norma que indica, entre otros conceptos, la manera en que se formalizan las decisiones en los sistemas de fabricación (dónde y cómo). El estándar ISA 95 fue creado en 1996 y actualizado en 2013. Este estándar semejante a la pirámide CIM de cinco etapas (ver sección 2.1), se define por cinco capas, tal como se muestra en la Figura 2.29. Las cuatro etapas de ISA 95 se componen primero por los niveles de proceso, su control y supervisión (Niveles 0, 1 y 2); luego, por el de operaciones (Nivel 3) y finalmente el de negocios (Nivel 4).

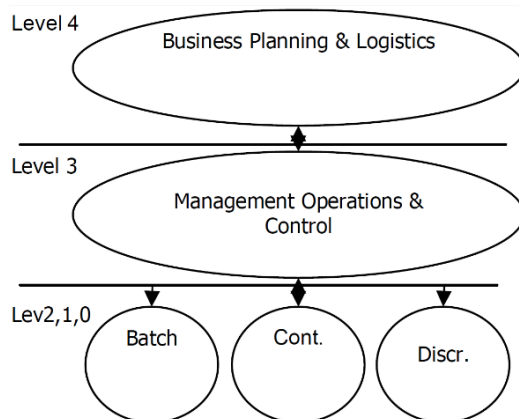


Figura 2.29. Niveles del estándar ISA 95 (ISA-95 2013).

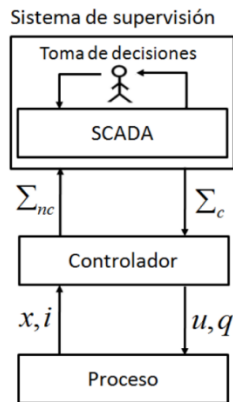
En ISA 95 los niveles 1 y 2 tienen como objeto el control de los equipos, de manera que se logra la ejecución del proceso de producción (Nivel 0) y la obtención de los productos. Estos niveles incluyen recursos como, por ejemplo, Sensores y Actuadores, PLC's (Controladores Lógicos Programables), CNC (Control Numérico Computarizado) y los SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos). Posterior a este se encuentra el Nivel 3, que también se llama MES (del inglés, *Manufacturing Execution System*). En cada una de las etapas de ISA 95 se define particularidades específicas, que se resumen en la Tabla 2.4.

Niveles en el estándar ISA 95	
<b>Nivel 4: Logística y Planificación de Negocios</b>	Define las actividades relacionadas con la empresa necesaria para gestionar una organización de fabricación
<b>Nivel 3: Administración de Operaciones de manufactura</b>	Define las actividades del flujo de trabajo para producir los productos finales deseados
<b>Nivel 2: Monitoreo y Control de Procesos</b>	Define las actividades de seguimiento y control de los procesos físicos
<b>Nivel 1: Administración de Operaciones de manufactura</b>	Define las actividades involucradas en la detección y la manipulación de los procesos físicos
<b>Nivel 0: Proceso</b>	Define los procesos físicos reales

**Tabla 2.4.** Definiciones de los niveles en la norma ISA-95.

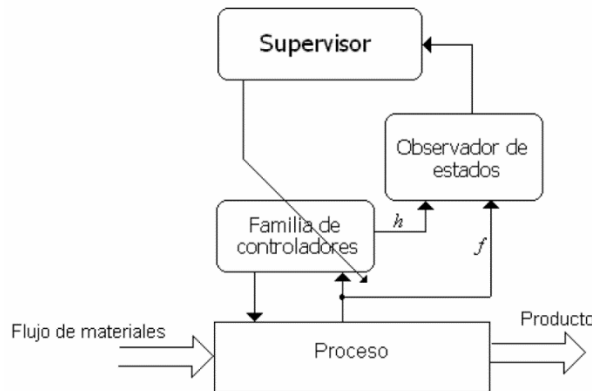
Centrándose en la distribución de niveles realizada por ISA 95, el tema de esta tesis se limita a desarrollar una propuesta de sistema de control de manufactura, que cubre al menos parcialmente, los niveles 1 y 2 desde el paradigma holónico. Esto implica que se deben considerar tanto los conceptos de control (ver secciones 2.3), como de supervisión dentro de las siguientes concepciones (Zapata M. 2011):

**Sistema de Supervisión Tradicional:** se basan principalmente en las enunciadas estructuras convencionales de la pirámide CIM (ver sección 2.1). Se encargan de dirigir el nivel de control (de tipo jerárquico) dentro de procesos de automatización, en lo que se incluyen: acciones de arranque y parada (de planta o de un proceso), determinación de puntos de operación, selección de estrategias o leyes de control, restablecimiento de operaciones y el monitoreo de variables (de variables físicas). Estas arquitecturas tienen como propósito permitir que el operador pueda entender el comportamiento del sistema y se pueda evaluar su estado. Usualmente se involucran tecnologías como los sistemas tipo SCADA, que habilitan a los operadores para obtener los datos y enviar acciones de control limitada; ambas actividades se hacen de forma distante al proceso. En resumen, un sistema de supervisión convencional se forma por la interacción conjunta de humanos y SCADA, en la toma de decisiones de los controladores que restringen el proceso, como se señala en la Figura 2.30.



**Figura 2.30.** Sistema de supervisión tradicional con SCADA (Zapata et al. 2011).

**Sistema de Supervisión Holónico:** es una actividad clave en la que se desenvuelven de la mejor manera los atributos en sistemas HMS (ver sección 2.4.3). gracias a la descentralización en la toma de decisiones que implica el paradigma holónico. En esta propuesta, tal como se presenta en (Chacón R. & Rojas A. 2006; Chacón et al. 2004), cada decisión que se toma por un holón se logra por medio de un supervisor. En un sistema de producción holónico que se constituye por unidades de producción UP (ver sección 2.3.2), la supervisión se puede modelar mediante un sistema híbrido, que se conforma por el acople de la dinámica del supervisor (comportamiento discreto del sistema de control) y del proceso (discreto y continuo), dado por la metodología de producción. La supervisión de la Unidad de Producción es una actividad que se encarga de iniciar, controlar, monitorear y finalizar operaciones que se realicen como parte de las actividades de control en la UP. El anterior esquema de supervisión holónico se puede evidenciar mediante la gráfica de la Figura 2.31.

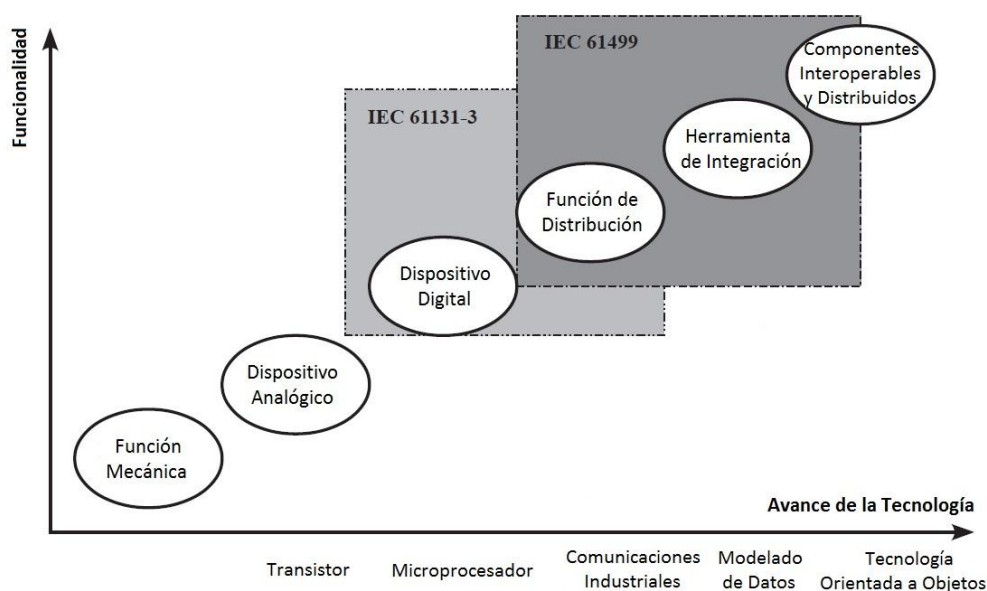


**Figura 2.31.** Representación de supervisión holónica (Chacón R. & Rojas A. 2006).

En síntesis, el supervisor holónico es un SED (ver sección 2.4), que tiene la función de forzar una mezcla de variables híbridas (continuas y discretas), en relación al estado que se presente en una unidad de producción. La mezcla corresponde a una combinación de transiciones que se activan ante las situaciones que el supervisor se ha diseñado. La combinación se aplica sobre los modelos de la UP en los tiempos de respuesta esperados. Las diferentes situaciones para el supervisor se clasifican como eventos controlables y no controlables.

## 2.7. Control Distribuido de Bajo Nivel en HMS mediante IEC 61131 e IEC 61499

En el sector industrial se requiere aplicar estándares para la programación de autómatas programables, usualmente PLC. La Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC<sup>12</sup>) fue fundada con el fin de que se diseñen y se actualicen normas en el sector eléctrico, electrónico y tecnologías afines, en donde se incluyen los controladores programables. Mediante la IEC se normaliza el diseño de hardware, instalación, pruebas, documentación, programación y de comunicación. Como resultado de sus actividades, se diseñaron los estándares IEC 61131 y la IEC 61499, que, junto con las nuevas tecnologías, tienen un gran impacto e influencia en el diseño e implementación de los sistemas de control industrial. Como se expone en la Figura 2.32, estas dos normas se relacionan estrechamente y con estas se crean las bases del desarrollo de sistemas de control (Zoitl & Lewis 2014; Bezák 2012). Así mismo, se actualizan progresivamente para las nuevas tecnologías en el futuro cercano.



**Figura 2.32.** Desarrollo de normas en el control industrial (Zoitl & Lewis 2014).

Para el caso del control de bajo nivel en sistemas altamente distribuidos, se requiere de propuestas como las de Christensen (Christensen 1994), en donde se expone el estándar IEC 61499. La norma IEC 61499 surgió por la necesidad de crear software modular que se pudiera utilizar en el control distribuido de procesos industriales (Cruz S. & Rojas A. 2014), y fue creada para aplicarse mediante estructuras denominadas diagramas de bloques, presentando un formato independiente a la implementación.

De manera específica, la IEC 61499 se apoya en su antecesora norma IEC 61131-3, desarrollada para los algoritmos compilados en autómatas programables

<sup>12</sup> IEC es la Comisión Electrotécnica Internacional. Página web oficial disponible en: <http://www.iec.ch>

como PLC. Esta última normativa –la IEC 61131-3–, fue publicada en diciembre de 1993 y su edición actual se realizó en febrero de 2013 (Vogel-Heuser et al. 2013; IEC 2012). En las siguientes secciones se despliegan estas normas y sus características.

### 2.7.1. Estándar IEC 61131 y sus Limitaciones en el Control de Procesos

Generalmente los sistemas de producción tradicionales se basan en dispositivos de control jerárquico (centralizado) y de tipo cíclico (scan). Estos se encargan de satisfacer las tareas del proceso a través de tres funciones fundamentales (Catalán C. 2016): i) Adquisición de variables mediante sensores, ii) ejecución de algoritmos de control y, iii) Acción sobre el estado de los actuadores. Un elemento fundamental en las anteriores tareas son los PLC. Estos dispositivos se constituyen con hardware y software robusto para que se pueda lograr un alto grado de habilidad, confiabilidad y disponibilidad en entornos industriales con características extremas (mecánica, eléctrica y ambientalmente). El desarrollo de programas para la ejecución de tareas en un controlador PLC se normalizó mediante el estándar IEC 61131-3 (IEC 2012).

La IEC 61131-3 es la tercera de ocho partes del estándar completo, que trata sobre los lenguajes de programación, definidos en lenguajes de tipo gráfico y de texto para los PLC (ver Tabla 2.5). A diferencia de la IEC 61131-3, la IEC 61499 aún no cuenta con una aprobación significativa en el actual sector industrial, sin embargo, se perfila como el nuevo estándar a seguir para los Sistemas de Control Distribuido Inteligente.

Denominación Original	Traducción	Siglas	Tipo
<i>Ladder</i>	Lenguaje escalera	LD	Gráfico
<i>Function Block Diagram</i>	Diagrama de bloque de funciones	FBD	Gráfico
<i>Structured Text</i>	Texto estructurado	ST	Texto
<i>Instruction list</i>	Lista de instrucciones	IL	Texto
<i>Sequential Function Chart</i>	Bloques de función secuenciales	SFC	Gráfico

**Tabla 2.5.** Lenguajes de programación en PLC de la IEC 61131-3 (IEC 2012).

Una de los principales inconvenientes que tienen los actuales modelos de programación para PLC, en particular la lógica de escalera *Ladder* de la IEC 61131-3, es que la ejecución del programa se hace de la forma convencional cíclica del PLC. Esto arroja como resultado una gran falencia en la flexibilidad de la programación, especialmente en la ejecución de eventos importantes, puesto que puede dar lugar a dificultades graves en el cumplimiento de requisitos complejos de control en tiempo real (Camacho & Patiño 2013; Luleå Tekniska Universitet 2012; McFarlane & Bussmann 2003).

Otros argumentos en (Catalán C. 2016), infieren que en los PLC y el estándar IEC 61131 se presentan varias limitaciones en los requerimientos de control de sistemas ágiles. Esto se alude porque en los PLC solo se permite la reconfiguración

de manera simple. Lo anterior se concibe como la causa de generación de situaciones imprescindibles y se considera como una técnica en la que se arriesga la confiabilidad de sistemas de producción.

Por ejemplo en los modelos de típicos de ejecución cíclica, se presenta una cantidad considerable de sobrecargas (*overheads*) en la combinación de controladores, que no se acopla bien sobre el control de tipo distribuido (Vyatkin 2014). Siento esto la causa (en el peor caso del control jerárquico), de que se provocan funcionamientos incorrectos en relación a su orden de ejecución. Gracias a las limitaciones que surgen sobre la aplicación del estándar IEC 61131-3, como control centralizado y cíclico, esta norma no se considera por si sola apropiada para la aplicación de sistemas de manufactura inteligente, como los HMS (Christensen 2005).

### 2.7.2. Estándar IEC 61499 como Complemento en el Control Distribuido

La norma IEC 61499 es una arquitectura de referencia que se creó para facilitar el diseño e implementación de aplicaciones de control distribuido (es decir, de lógica descentralizada). La estructura general del estándar se compone por 4 partes y cada una de estas se complementa, aunque se mantienen con objetivos independientes y diferentes. La Tabla 2.6 muestra las secciones en que se constituye el estándar, su descripción general y el estado de cada parte, a la fecha de este documento.

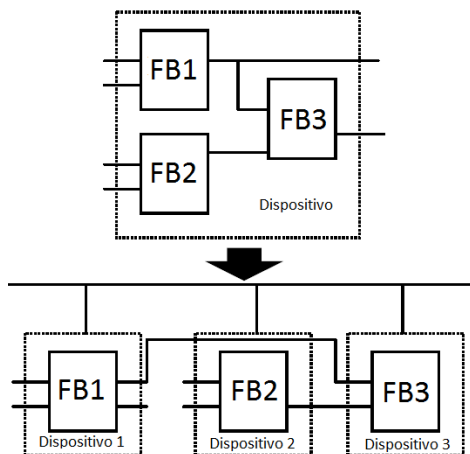
Parte	Nombre	Descripción	Estado
IEC 61499-1	<b>Arquitectura</b>	En esta se detallan los requisitos generales, definiciones y modelos de referencia. Se exponen además los conceptos y las reglas de comportamiento de los diferentes tipos de bloques de función denominados FB	Edición. 2.0. Se actualizó en noviembre de 2012
IEC 61499-2	<b>Requisitos de la herramienta computacional</b>	Se precisan los diferentes requisitos que se necesitan en Herramientas de software para la aplicabilidad de la norma. Indica que se debe soportar la ejecución de las tareas de ingeniería de sistemas y las especificaciones de los diferentes FB. Entre otras consideraciones, se describe el lenguaje XML para el intercambio de ficheros entre las distintas herramientas	Edición. 2.0. Se actualizó en noviembre de 2012
IEC 61499-3	<b>Manual Explicativo</b>	Expone información didáctica con el objetivo de entender la aplicabilidad, de la arquitectura de los sistemas de medición y control de procesos industriales (IPMCS). Da ejemplos de aplicaciones que cumplan con las descripciones del estándar	Edición. 1.0 (2007). Retirada porque se cree obsoleta
IEC 61499-4	<b>Reglas para Perfiles de Cumplimiento</b>	Describe las reglas para que se desarrollen perfiles de cumplimiento en el hardware y software compatible, de acuerdo a las partes 1 y 2 de la misma norma.	Edición. 2.0. Se actualizó en enero de 2013

**Tabla 2.6.** Partes de la norma de Bloques de Función IEC 61499 (IEC 2012).

En el estándar IEC 61499 se definió a los *Bloques de Función* como núcleo fundamental, que se basan en los diagramas de bloques de función definidos en la IEC 61131-3, permitiendo así implementarse en procesos productivos con características del control inteligente distribuido, de modularidad y de flexibilidad en el control (Zoitl & Strasser 2016). De manera conceptual, se puede definir que un bloque de función es una abstracción de un componente de tipo software o hardware dentro de un sistema (Vyatkin 2014).

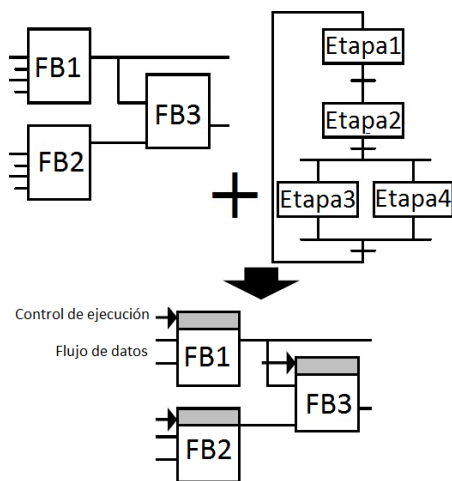


Como se ve en la Figura 2.33, el lenguaje en los nuevos programas del estándar, apoya todo tipo de aplicaciones descentralizadas a través de la distribución de bloques funcionales FB, conectados a redes de procesadores que se comunican entre sí, de manera más eficiente a los tradicionales FB. En relación a los resultados obtenidos de implementaciones del nuevo modelo, se tiene que el bloque de función de IEC 61499 ha adquirido mejoras significativas (Yoong et al. 2015).



**Figura 2.33.** Distribución de aplicaciones de IEC 61499 (Cruz S. & Rojas A. 2014).

La Figura 2.34 da una muestra representativa de la combinación de lenguajes antecesores del nuevo estándar, derivada de la combinación de los bloques de función FBD tradicionales y los diagramas de función secuenciales SFC semejantes al diagrama funcional de tipo *Grafcet* (del francés, *Grphe Fonctionnel de Commande Etape Transition*), ambos del estándar IEC 61131-3 (IEC 2012). Como se indica en la parte inferior de la Figura 2.34, tanto el *Control de la ejecución* del programa mediante los eventos y el *Flujo de datos* de los bloques de función típicos, se especifican en un único bloque de entradas y salidas. Lo anterior da lugar a la mejora significativa de los bloques de función, como se mencionó previamente en este trabajo.



**Figura 2.34.** Origen de Bloques de Función o FB's (Cruz S. & Rojas A. 2014).

En el resultado de la Figura 2.34 se muestra las partes sombreadas en color gris como las responsables del Control de la ejecución y las no sombreadas son los datos y algoritmos (Flujo de datos). En síntesis, la IEC 61499 extiende y complementa al estándar IEC 61131-3, a partir de los dos conceptos básicos de la distribución funcional y el control de ejecución de programa basado en eventos. De acuerdo a los resultados de las investigaciones que se han venido desarrollando alrededor de esta norma, es probable que este estándar suceda a las actuales formas de programación en los PLC, normalizadas bajo la IEC 61131-3, ya que posee ventajas y características significativas, tal como se enlistan en la Tabla 2.7.

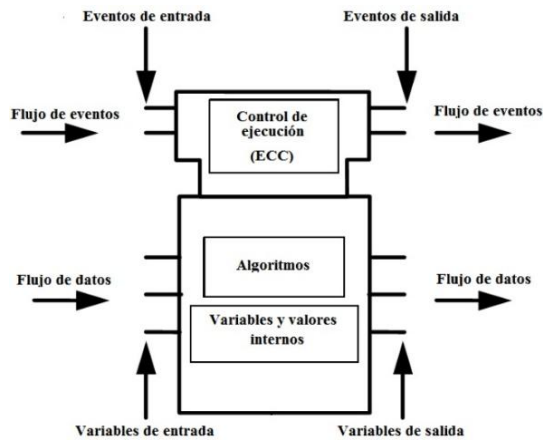
Características	Estándar IEC	
	IEC 61499	IEC 61131
<b>Ejecución del programa</b>	Controlada por eventos	De manera Cíclica
<b>Arquitectura de programación</b>	Sistemas completos	Controladores individuales
<b>Tiempo real (Real-time)</b>	Habilitado	Habilitado
<b>Compatibilidad entre programas</b>	Se pueden procesar sin importar/exportar	Deben importarse/exportarse
<b>Estructura de la lógica de control</b>	Puede distribuirse en varios controladores	Es centralizada
<b>Entendimiento entre marcas de equipos</b>	Diferentes librerías de equipos son compatibles	Normalmente las librerías no son compatibles

**Tabla 2.7.** Comparación de IEC 61499 e IEC 61131 (Cruz S. & Rojas A. 2014).

En general, la IEC 61499 suministra un modelo semántico, que utiliza formalismos provenientes de la teoría de Automatas, de Control Supervisorio y de las Redes de Petri, reconocidos en el diseño de SED que implementan grafos de control de ejecución de eventos y diferentes redes de condiciones y eventos (ver sección 2.4). Una descripción con más detalle del proveniente IEC 61499 y sus características asociadas, tales como, funcionamiento, aplicabilidad, recursos de implementación, entre otras propiedades, se consideran muy extensas y se encuentran fuera del alcance de esta tesis. Sin embargo, se pueden consultar los desarrollos de autores reconocidos en el área como Christensen, Lewis, Strasser, Vyatkin y Zoitl en (Zoitl & Strasser 2016; Vyatkin 2014; Zoitl & Lewis 2014; Christensen 2005), o se puede revisar en detalle la norma original de la IEC en (IEC 2012).

### 2.7.3. Descripción General de los Bloques de Función en la IEC 61499

Las propiedades estructurales de los bloques de función se pueden ver en la Figura 2.35. Sobre el segmento superior de este, se encuentra el denominado Grafo de Control de la Ejecución (del inglés, *Execution Control Chart or ECC*), quien aprueba a cada bloque para administrar el orden en que los algoritmos se ejecutan y la manera en que los eventos y las variables se interpretan en cada bloque (Zapata M. et al. 2012). El segmento inferior de los bloques de función, poseen los demás algoritmos a ejecutar y estos se pueden desarrollar en los lenguajes ya conocidos basados en la IEC 61131-3. Cada bloque de función se ejecuta dependiendo de un flujo de datos y un flujo de eventos, generados a partir del desenvolvimiento de los algoritmos en la parte inferior de bloque de función, como se ve en la Figura 2.35.

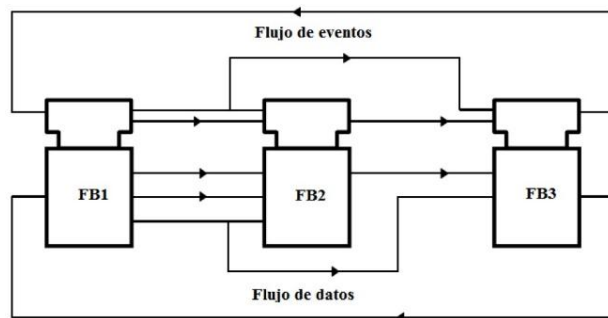


**Figura 2.35.** Partes de un bloque de función de IEC 61499 (Zapata M. et al. 2012).

El modo de funcionamiento de las funciones de bloques establecidos en el estándar, se resume en que cada bloque de función recibe y da información mediante eventos de variables de entrada y de salida, respectivamente (como se muestra en la Figura 2.35). En el flujo de eventos de entrada, estos van al ECC y pueden habilitar o deshabilitar la realización de un programa dentro del bloque de función.

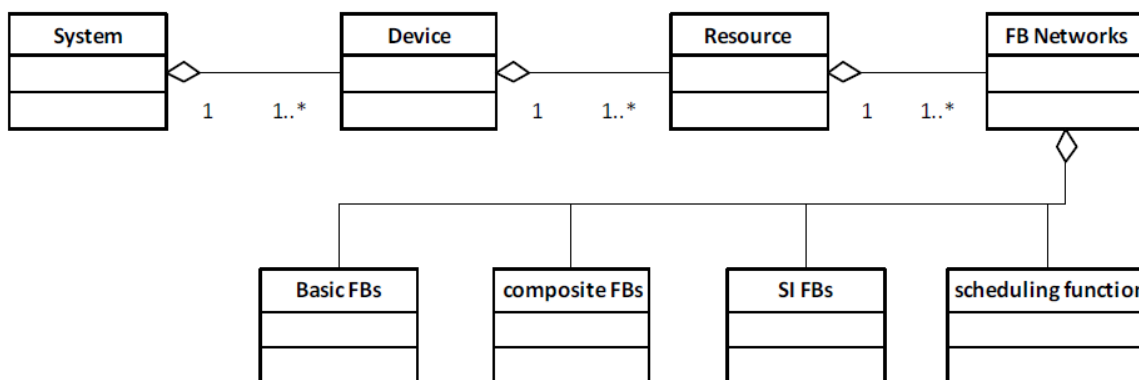
Los eventos mencionados, asocian como mínimo a una variable de entrada; la ocurrencia del evento permite que el bloque de función pueda renovar la información de la variable de entrada asociada en el programa, produciendo un flujo de datos de entrada. Por otro lado, el ECC genera eventos de salida derivados de la ejecución de los algoritmos en todos los bloques de función. Cada variable de salida relaciona con mínimo un evento de salida y es la ocurrencia de dicho evento lo que aprueba que la variable de salida se actualice desde el bloque de función, generando un flujo proporcional de eventos y datos de salida respectivamente (Christensen 2005).

La interconexión de diferentes bloques de función conforma la programación de un sistema completo, así como se ilustran en la Figura 2.36. Los eventos de salida se transforman en eventos de entrada de otros bloques de función, de la misma forma, los datos en las variables de salida se conectan a las variables de entrada de otros bloques, facilitando así propiedades de secuencialidad y correspondencia en concordancia de sus conexiones establecidas (Yoong et al. 2015).



**Figura 2.36.** Interconexión de FB's en IEC 61499 (Zapata M. et al. 2012)

La segunda edición de la IEC 61499 se realizó en el año 2013 (ver Tabla 2.6), con la intención de suministrar herramientas para representar los sistemas de control distribuidos y programados con bloques de función. El modelo de la actualización, resumido en la Figura 2.37, mediante un diagrama en Lenguaje Unificado UML (ver sección 2.5.2), es un resultado previo a la aplicación de los estándares S88 (ver sección 2.2.1), e IEC 61499 en un prototipo reciente de manufactura discreta (Camacho & Patiño 2013).



**Figura 2.37.** Diagrama de clases para IEC 61499 (Camacho & Patiño 2013).

Diversos investigadores han aplicado la norma IEC 61499 para la solución de problemas de control distribuido inteligente a lo largo de la última década (Luleå Tekniska Universitet 2012; Christensen 2005; Vrba et al. 2011; Catalán C. 2016; Tapoglou et al. 2015). A pesar de ese fuerte interés de la comunidad científica por el nuevo estándar (Vyatkin 2014), existe una gran falencia en el desarrollo de herramientas computacionales para la automatización y control de procesos industriales que sigan la norma. De manera general ya existen herramientas de software que pueden tener su centro alrededor de IEC 61499, aplicados en pruebas, prototipos y simulaciones, pero que en su mayoría, son sin duda plataformas no aptas para aplicaciones industriales confiables (Cruz S. & Rojas A. 2014). En (Luleå Tekniska Universitet 2012) al igual que la Tabla 2.8, se enlistan herramientas computacionales sobresalientes que implementan la norma IEC 61499.

Nombre del aplicativo	Características generales	
	Tipo de licencia	Atributos
Functional Block Development Kit (FBDK)	Libre (Open Source)	Facilita simbolizar y testear FB's en lenguaje XML (IEC 61499-2)
4DIAC-IDE	Libre (Open Source)	Extensible mediante plugins basados en el entorno de desarrollo libre Eclipse
NxtOne	Comercial	Se basa en componentes CAT ( <i>Compound Automation Types</i> ) y agrega HMI para visualizar el proceso de ejecución
ISaGRAF	Comercial	Funcionalidades de debug y test con soporte oficial de la compañía <i>Rockwell Automation</i> ®
Simatic Imap	Comercial	Funcionalidades de debug y test con soporte oficial de la compañía <i>Siemens</i> ®

**Tabla 2.8.** Software académico y comercial para IEC 61499.

#### 2.7.4. Modelos y Características Holónicas del Estándar IEC 61499

En la primera parte del estándar IEC 61499 se señala la *Arquitectura* (ver sección 2.7.2); esta parte se encuentra organizada jerárquicamente mediante diferentes modelos. Los modelos en conjunto se complementan para formar la arquitectura de un sistema distribuido, orientado en bloques de función. Los modelos más distinguidos de la norma para el desarrollo de la presente tesis son:

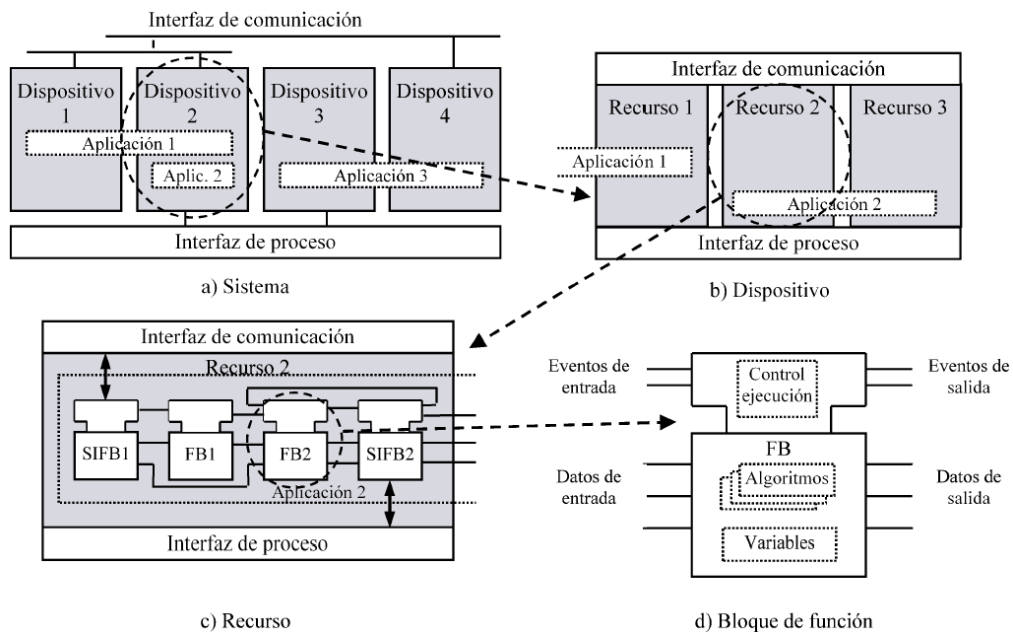
**Modelos de Sistema:** este modelo es el de mayor nivel de la jerarquía entre los demás. Se presenta como el conjunto de dispositivos que se pueden interconectar y comunicar de manera que se agrupan mediante diferentes aplicaciones en red. Así desde una perspectiva global del sistema, se obtienen aplicativos unitarios pero que se extienden descentralizadamente entre diferentes dispositivos. Esto se logra mediante los diferentes mecanismos de distribución del estándar.

**Modelo de Dispositivo:** en este se representa el hardware del sistema que se encarga de ejecutar los bloques funcionales en red. Estos dispositivos se componen de Recursos que tienen partes físicas, con interfaces de proceso y de comunicación. En primera instancia, la interfaz de proceso se encarga de proporcionar conectividad con la red de bloques funcionales. En segundo lugar, la interfaz de comunicación se conecta al proceso mediante sensores y actuadores, o con otros periféricos.

**Modelo de Recurso:** este se define mediante el conjunto de FB que se ejecutan de manera independiente a la aplicación (o a una parte de esta). Estos FB se pueden crear, redefinir, eliminar o crearse entre sí, sin que se afecten otros FB. La norma facilita que el flujo de las aplicaciones se realice mediante eventos, de manera que el recurso es quien se encarga de la gestión de su entrega. Esto implica que cada recurso se maneja independiente de los otros recursos del sistema. En síntesis, este modelo infiere que se tiene un conjunto de recursos dentro de un mismo dispositivo.

**Modelo de Aplicación:** se establece como el principal modelo para la función de control. Una aplicación en la norma se considera como una red de FB, que se interconectan y se unen mediante el flujo de datos y señales. Una FB es la parte base en la red o FBN (del inglés, *Function Network Block*), y se conforma mediante aplicaciones que se pueden distribuir. La distribución de FBN se puede hacer entre uno o varios recursos del mismo dispositivo, o entre recursos que se encuentran en diferentes dispositivos.

La distribución de FBN entre recursos de diferente o del mismo dispositivo se mantiene con las mismas características. La norma además facilita la posibilidad de que se asignen FBN's a dispositivos o recursos luego de que se realice el modelado. En la Figura 2.38 se ilustran y se relacionan los modelos que se describieron y que pertenecen a la arquitectura del estándar (IEC 61499-1).

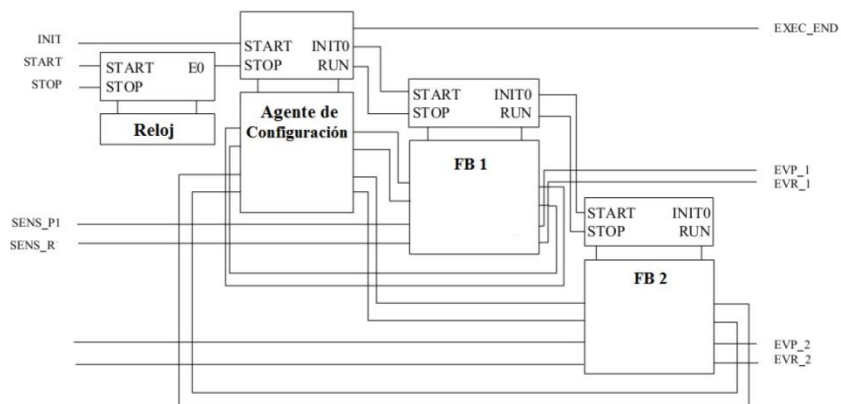


**Figura 2.38.** Modelos de la arquitectura del estándar IEC 61499 (Catalán C. 2016).

Mediante el estándar IEC 61499 se logra implementar la mayoría de los atributos holónicos (Vlad et al. 2010), gracias a que la norma se generó a partir de los trabajos expuestos para HMS en (Christensen 1994; Christensen 2005). Un bloque de función de IEC 61499, se considera con el mismo grado de inteligencia y con los mismos atributos en un holón; entre los que se destaca, el intercambio de información entre holones (de igual o nivel superior), jerarquización temporal y el anidamiento. En relación con HMS, se consideran además estas características (Catalán C. 2016; Zapata M. et al. 2012; Tapoglou et al. 2015):

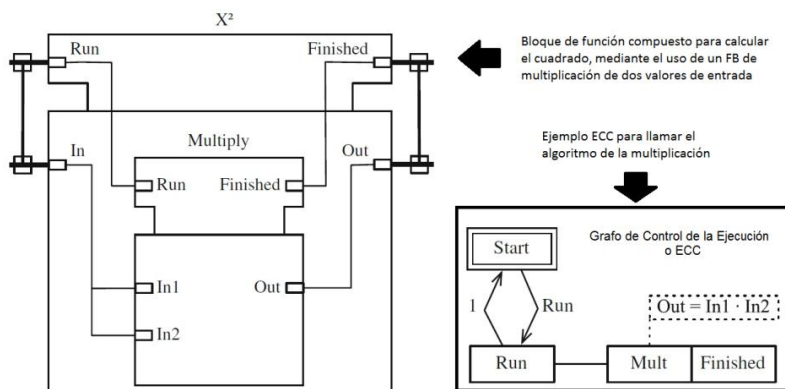
**Autonomía:** se presenta gracias a que el ECC otorga la inteligencia necesaria en control de sus algoritmos a los FB en una red. Lo anterior implica la supervisión y selección de algoritmos que se desean ejecutar en el FB. Esta autonomía se refleja además en el comportamiento distribuido y la capacidad que se tiene en una FB para que se cree, controle o se elijan las estrategias de su conducta en la red FBN.

**Flexibilidad:** se puede obtener desde el punto de vista de la implementación del control distribuido y la reconfigurabilidad. Con todo, no se tiene un grado de reconfigurabilidad si no se concibe un grado de inteligencia en control del sistema. Este atributo se adquiere con la norma cuando se emplea el *Administrador de Configuración*. La IEC 61499 establece este tipo de administrador el cual permite que se procesen cambios mediante la configuración del ECC. El administrador, además, genera los eventos necesarios para la nueva configuración. La implantación de este administrador se puede llevar a cabo mediante el apoyo de la recursividad y específicamente se realiza con un anidamiento (se explica más adelante).



**Figura 2.39.** Administrador de Configuración en un FB (Zapata M. et al. 2012).

**Recursividad:** se adquiere a partir de las características de cooperación o de coordinación de los FB. Como una propiedad holónica y al igual que la reconfigurabilidad esta se puede obtener cuando se implementan redes de FBN de forma anidada. Se describe como la manera en que, en un FB, se cuenta con un ECC y su algoritmo necesario para su propia ejecución. Esto implica que en otro nivel (más superior) se tienen otros FB con sus respectivos ECC, que poseen el control de los FB que contienen (anidamiento). De la misma forma este atributo se apoya con la concepción de una autonomía, gracias al control propio de cada ECC sobre el FB correspondiente. El formalismo para que se logre una recursividad extensa, se limita en este trabajo, no obstante, en la norma original se establecen los requerimientos necesarios para implementar este tipo de redes anidadas. El anidamiento en el estándar facilitaría también la concepción de holarquía (ver sección 2.2) establecidas en el paradigma de HMS. La Figura 2.40 expresa un ejemplo del cálculo de la función  $X^2$  mediante FB's anidados (Spöcker et al. 2014).



**Figura 2.40.** FB's anidados para el cálculo de una función (Spöcker et al. 2014).

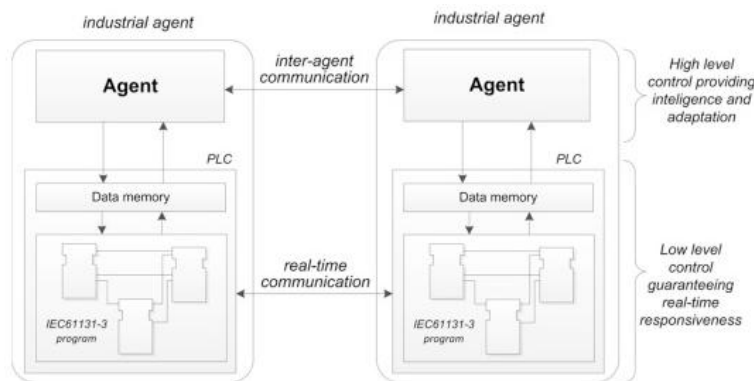
**Reactividad:** este atributo se puede aplicar cuando se generan aplicaciones de FB's, en las que se emite una cierta salida (reacción) después de un estímulo de entrada. Sin embargo, para esto se requiere de una definición explícita de la correspondencia entre las entradas y las salidas, lo cual no siempre se consigue de manera evidente. Uno de los requisitos más estrictos es dar la reacción dentro de cierto intervalo de

tiempo. De hecho, una aplicación de bloques de función da la salida a un estímulo de entrada, dentro de un intervalo de tiempo. Para ciertas aplicaciones con FB, se puede determinar la correspondencia explícita entre los eventos de entrada y de salida. En este caso, una aplicación se dice que preserva la secuencia de eventos, si la reacción (en el primer evento) se produce antes de la reacción (en el segundo).

**Portabilidad:** una aplicación de bloques de función es portable cuando se dan las mismas salidas para para mismas entradas que se ejecutan en cualquier dispositivo compatible. Se debe resaltar que la portabilidad es una de las principales características específicas de la norma IEC 61499. Sin embargo, los requisitos definidos por el estándar (en IEC 61499-2), no permiten que por ellos mismos se pueda garantizar la portabilidad, al igual que se mantenga la interoperabilidad y la configurabilidad. Se considera el formato de intercambio XML para valer este atributo.

En síntesis, los autómatas programables actuales tales como los PLC, combinan regularmente una aplicación de control en uno o varios equipos, mediante la dinámica de los sensores y actuadores (E/S). La integración de estos dispositivos conlleva a una constante tendencia de generación de equipos más pequeños y económicos, con propiedades cada vez más inteligentes y muy atractivos para el mercado de la automatización de procesos. No obstante, en la concurrencia de sus características, se hace necesario que tengan plataformas adaptables a los usuarios para su programación. Eso se logra mediante la implementación de los estándares IEC 611313 y su extensión IEC 611499.

Estas normativas tienen una fuerte tendencia hacia la programación orientada a objetos y la automatización inteligente de procesos mediante el control distribuido. En ambas normas (orientadas a autómatas programables), se demuestran características y propiedades que difieren cuando se requiere implementar tipologías holónicas. No obstante, de acuerdo a trabajos como (Christensen 2005; Vrba et al. 2011; Vyatkin 2014), se hace posible la consecución de HMS (con holones o agentes), con cada uno de los estándares y de manera complementaria (Vrba et al. 2011). La Figura 2.41 (Leitão et al. 2016), muestra la arquitectura que da una guía de cómo se puede implementar el control tanto a bajo, como alto nivel, involucrando los normas expuestas en esta sección.



**Figura 2.41.** Agentes industriales con IEC 61499 e IEC61131(Leitão et al. 2016).



## Capítulo 3

# Estado del Arte: Raíces, Presente y Expectativas de Nuevos Desafíos en HMS

En este aparte se presentan los trabajos más representativos de las arquitecturas de fabricación, con relevancia en las establecidas por holones. En primera instancia, se hace una breve descripción de los paradigmas que se sostienen. Luego, se establecen características como fortalezas y desventajas, y se detallan ejemplos particulares. Finalmente, se exponen las nuevas tendencias y los trabajos futuros por la que convergen y que prometen suceder las arquitecturas consultadas.

### 3.1. Pasado y Actualidad de los Sistemas de Producción

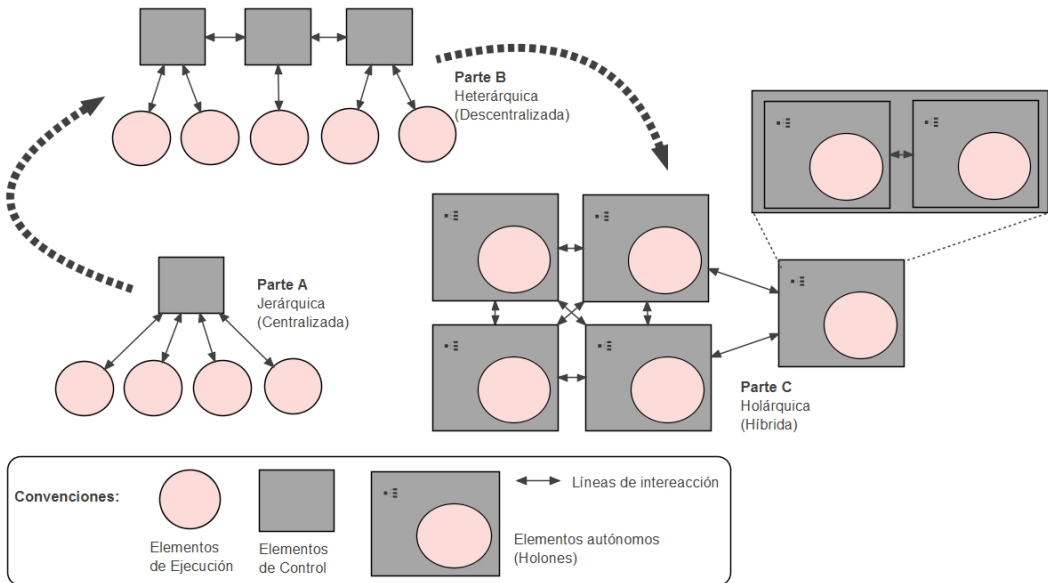
Las arquitecturas de control de tipo jerárquicas fueron las primeras en ser desarrolladas en el campo de los sistemas de fabricación, como se enuncia en el capítulo 2 (ver sección 2.1). La más exitosa de ellas –que se mantiene aún– es la *Fabricación Asistida por Computadora* o CIM como se manifiesta en (Cruz S. & Rojas A. 2013; ElMaraghy & Monostori 2014; Monostori et al. 2016), y se identifica por seguir una forma piramidal. La CIM definida por NIST, se promovió mediante la informatización de todo el ciclo de vida de producción, desde las primeras etapas de la fase de diseño, hasta la obtención del producto final. A pesar de la promoción de la integración de tecnologías, el enfoque de la CIM no es capaz de alcanzar los resultados deseados, debido principalmente a la heterogeneidad de las herramientas implicadas, la complejidad de la instalación y del mantenimiento (Mourtzis et al. 2016). Además, el fuerte enfoque centralizado limita el escalar el sistema y evitar fallas, como se presenta en (Cruz S. & Rojas A. 2014) .

Para los sistemas de automatización existentes, es fundamental que se pueda responder rápidamente a perturbaciones, de manera que se mantenga un funcionamiento estable y se usen eficientemente los recursos. Lo anterior promueve a que los sistemas de fabricación se sostengan dentro del dinámico y competitivo mercado global. Por ello, desde los orígenes de los sistemas de fabricación, hasta el reciente control “inteligente” que se les desea aplicar, se han caracterizado por ser capaces de asimilar algunos rasgos cognitivos del comportamiento humano (Galán et al. 2000). En efecto, los sistemas de fabricación contemporáneos, muestran una reciente generación de enfoques o paradigmas que buscan afrontar las nuevas exigencias desde diferentes perspectivas. Esto gracias a la necesidad de aplicación de

estándares y el desarrollo de los IMS, en búsqueda de la *Manufactura Inteligente* (Dumitrache & Caramihai 2010).

Por consiguiente, se mantienen presentes modelos como el estándar S88, adaptado como filosofías de diseño para describir equipos y procedimientos. De igual manera, surgen paradigmas de sistemas distribuidos inteligentes de manufactura, de los que provienen los multiagente SMA y los de arquitecturas basadas en manufactura holónica HMS. En (Palacio B. 2013; Chacón et al. 2012; Arboleda C. 2011; Zapata M. 2011; Salazar V. 2009; Barbosa 2015), se evidencian trabajos que dan muestra de un creciente interés en el mundo académico y la industria.

La Figura 3.1 ilustra el tipo de evolución en arquitecturas que se soportan mediante los requisitos expuestos en la primera *Conferencia Europea sobre HMS* en (Christensen 1994). En esta figura, los círculos son elementos de la ejecución, los cuadrados representan elementos de control, y las líneas representan la comunicación entre los elementos. Al final de la evolución, cada elemento –Holón– es autónomo y la *cooperación* se lleva con otros elementos de igual naturaleza. Esta se hace en la *holarquía*, mediante la comunicación y el acuerdo con otros holones, como se extiende en el capítulo 2 (ver sección 2.1, 2.2 y 2.3) de este trabajo.



**Figura 3.1.** Evolución de arquitecturas en sistemas de fabricación.

Con relación a estándares, en el 2010, en (ISA Committe SP88 2010) se actualizó el estándar S88 direccionado por lotes (del inglés, *batch*), aprobado por ISA desde 1995. Su versión original fue adoptada por la Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC), como la norma IEC 61512-1. Esta norma reconocida como S88, forma parte de un sistema de fabricación jerárquica convencional (ver Figura 3.1, Parte A). S88 promueve las buenas prácticas para el diseño y operación de procesos

sin importar el nivel de automatización de la empresa. Ello permite el desarrollo de los productos a elaborar en la planta –denominados *recetas*–, sin un conocimiento detallado de los sistemas de control. Además, estipula que tampoco se hace necesaria la programación de los ajustes de control para cada cambio en la receta.

Por otra parte, en trabajos iniciales como en (Hatvany 1985; Wooldridge & Jennings 1995), se hallan las arquitecturas de tipo heterárquicas, de las que proviene el sistema multiagente (SMA<sup>13</sup>), compuesto por múltiples entidades inteligentes que interactúan entre ellos, denominados agentes. Estos –los agentes– pueden ser utilizados para resolver problemas difíciles o irresolubles en un sistema monolítico, pues se considera descentralizado (ver Figura 3.1, Parte B). El estudio de los sistemas multiagente está entre otras cosas, *“interesado en el desarrollo y análisis de resoluciones a problemas sofisticados de inteligencia artificial (IA) y arquitecturas de control, tanto para sistemas con un único agente como sistemas multiagente”*(University of Hannover 2000).

De la misma manera, en (Christensen 1994; Höpf 1994; Valckenaers et al. 1994) se presentan los Sistemas Holónicos de Manufactura (HMS), que presumen ser estructuras altamente distribuidas, cuya inteligencia se divide entre las entidades individuales llamadas holones, las cuales se consideran autónomas, cooperativas e inteligentes (ver Figura 3.1, Parte C). Un holón, de acuerdo con Koestler en (Koestler 1989), es un sistema o fenómeno que es un todo en sí mismo, y a la vez parte de un sistema superior; es decir, *“una parte identificable de un sistema cuya identidad es única aunque conformada por partes subordinadas, y que a su vez es parte de un todo mayor”* (Quintero H. 2009).

Koestler también señala que los holones son unidades autónomas, que tienen un grado de independencia y manejan imprevistos, sin pedir autorizaciones superiores para obtener instrucciones. Al mismo tiempo, los holones están sujetos al control de (múltiples) mandos principales. La primera propiedad –su autonomía–, garantiza que los holones son formas estables, que sobreviven a las perturbaciones. La última cualidad –su control–, significa que son formas intermedias, que proporcionan la funcionalidad apropiada para el conjunto más grande (Bongaerts 1998). De este modo, en (Quintero H. 2009), se establece que en procesos de producción *“la estrategia de control holónico realiza una reagrupación de los elementos distribuidos necesarios para realizar las actividades de manufactura, identificando los tipos de holones o agrupaciones que deben realizarse”*.

Es indispensable establecer las responsabilidades, la estructura de la dinámica y de interacción entre holones individuales y sus agrupaciones. De allí que una jerarquía de holones recibe el nombre de holarquía. El modelo holárquico puede entenderse como un intento de modificar y modernizar las percepciones de la jerarquía natural como se evidenció en (Chacón et al. 2012). De esta forma, varias arquitecturas desprenden del enfoque holónico, de las que sobresale PROSA (de

---

<sup>13</sup> Página web disponible en: <http://mas.cs.umass.edu/index.html>

Arquitectura Producto-Recursos-Orden-Staff-Arquitectura) y presentada en (Van Brussel et al. 1998; Wyns 1999). Esta está provista de una arquitectura inter-holónica, que caracteriza los tipos de holones, sus responsabilidades y la forma en la cual interactúan. En (Brückner et al. 1998), se da muestra de que los holones son agentes cooperativos y autónomos. Esta estructura posee tres tipologías de holones primordiales: *orden de trabajo*, *producto* y *recursos*. Adicionalmente, el holón *Staff* es considerado como un elemento que involucra dominio e información importante dirigida hacia los holones básicos.

Los componentes de la arquitectura PROSA se organizan usando conceptos de la programación orientada a objetos (OOP), como la agregación y la especialización. Cada holón básico es responsable, respectivamente, de una parte del control en la producción. El holón *Recurso* sujeta una parte física (un recurso de fabricación dentro de un sistema de manufactura) y otra parte para se establece para el proceso de la información que domina el recurso, que extiende la capacidad y funcionalidad de producción a los demás holones. El holón *Producto* conserva la información de proceso y del producto para afirmar la elaboración correcta de este último, y opera como un “asistente” de información para los restantes holones del HMS. Finalmente, un holón *Orden de trabajo*, interpreta una tarea en un sistema de fabricación; responsabilizándose de elaborar el trabajo asignado de manera óptima y eficiente, es decir de forma correcta dentro de los tiempos máximos estipulados. Este último holón, también administra los productos físicos que se realizan, el modelo de estado de estos, y el resto de la información dinámica del trabajo a elaborar, evidenciado en (Valckenaers et al. 1994).

Otra arquitectura es *ADACOR* (de Arquitectura Holónica Adaptativa para el Control de Sistemas de Manufactura), introducido por Leitão en (Leitão 2004). *ADACOR* es uno de los enfoques más representativos, que define un HMS como autónomo e inteligente, y que promete mejorar el funcionamiento de sistemas de control de procesos identificados con frecuente ocurrencia de perturbaciones como en (Leitão & Restivo 2006). Se caracteriza por formar grupos de holones que representan los componentes en una fábrica. Este sistema distribuido se conforma tanto de recursos físicos (máquinas de control numérico CNC, robots, controladores programables como PLC, entre otros) como de entidades lógicas (productos, órdenes, etc.). *ADACOR* establece los holones de manufactura en tipos de holones *Tarea*, *Producto*, *Operacional* y *Supervisor*. Cada producto se simboliza por el respectivo holón, que sujeta todo el conocimiento relacionado con él y es quien realiza el proceso de programación.

Por otro lado, el grupo de investigación de la Universidad de Los Andes de Venezuela, liderado por el doctor Edgar Chacón, propuso el concepto de Unidad de Producción Holónica, referenciada como UPH e ilustrada en (Chacón 2002). Esta ofrece conseguir la elaboración e integración de sistemas de automatizados de control, mediante una concepción holónica de las unidades de producción (UP). En concordancia con (Chacón et al. 2008; Chacón & Indriago 2010), una *UP* se define como la combinación de un grupo de unidades primordiales o recursos organizados y

alineados de tal manera que se permita realizar procesos de transformación en la cadena de valor (ver sección 2.1), para que se obtengan los productos exigidos. Además, la UP establece sus propias decisiones (autonomía) en relación al logro principal. Sin embargo, una UP se obliga a dar conocimiento de su estado en la obtención de una meta, o si dicho objetivo no se puede cumplir por una(s) falla(s) o error(es) en su funcionamiento, como se concibió en (Palacio B. 2013).

La arquitectura holónica UPH, divide la UP en tres holones: *Misión*, *Ingeniería* (Método) y *Recursos*. En los cambios dinámicos del holón *Misión*, se define el producto a ser acabado, sus calidades y cantidades. En el holón *Ingeniería* se establece el método; allí, se relacionan los medios y materiales a fin de que se cumpla un objetivo propio de la actividad productiva del HMS. Los holones *Recursos* forman la agrupación de instalaciones, equipos, personal experto, servicios y de materia prima, fundamentales para que se realice un proceso de producción (Arboleda C. 2011; Chacón et al. 2012; Checa R. 2014; Devia M. 2004; Salazar V. 2009; Zapata M. 2011). Algunos de las características a ser representados mediante una UP son: *físicas* (infraestructura, productos, configuración de la UP, elementos de información); de *misión* (producto conseguido, calidad y cuantía, condición de la UP); de *avance* de la misión (estado de los recursos y del proceso respectivamente).

Varias de las propuestas de arquitecturas HMS tienen su fase de implementación en SMA, como *ANEMONA* en (Giret B. 2005; Marik et al. 2003). En este caso, se asignan tareas de acuerdo con las decisiones lideradas por los agentes de forma dinámica, delegando cuáles y quiénes las realizan (Durán F. 2005). *ANEMONA* se presentó como método para desarrollar sistemas holónicos de manufactura y ejemplariza cómo la tecnología SMA es apropiada para la aplicación de HMS debido a la semejanza de ambos enfoques.

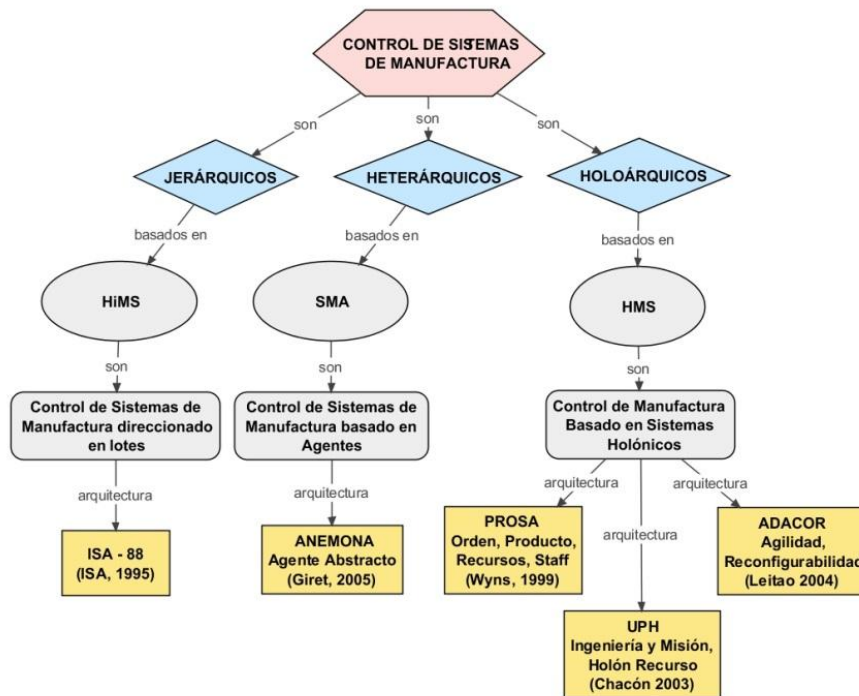
Los trabajos sobre arquitecturas de control que hasta ahora se relacionan en este trabajo, han presentado varias fortalezas y desventajas, y de acuerdo a (Quintero H. 2009) algunas de estas se resumen en la siguiente tabla (ver Tabla 3.1).

SISTEMA	ARQUITECTURA	FORTALEZAS	DESVENTAJAS
Holónico o HMS	PROSA (Wyns 1999)	Desarrolla una planta prototipo en el que se evidencia el impacto en el desempeño del sistema bajo esta arquitectura de control	No se tiene herramientas para validar y verificar que el sistema de control sea robusto y cumpla con los requerimientos de un controlador para un Sistema de Manufactura Holónico.
		El sistema de control es basado en un sistema de agentes los cuales son los autorizados para cumplir el propósito del control.	
		Es un enfoque genérico para el diseño de sistemas de control de fabricación.	
	UPH (Chacón 2002)	Consideración de técnicas de control clásica en el diseño de la estructura de supervisión de las unidades de producción.	No tienen una metodología de implementación de la arquitectura. No se establecen etapas de desarrollo. No se detalla cómo se convierte cada modelo de UP en algún medio de implementación.
La arquitectura tiene la posibilidad de ser extendida a los sistemas de producción continua.		No validan el comportamiento de la unidad de producción mediante	

			herramientas formales. No implementan un método para la especificación de control HMS ni para la estructura de dinámicas.
	<b>ADACOR</b> (Leitão 2004)	Usa instrumentos para validar, comprobar y evaluar los detalles de estructura y comportamiento del sistema de control.	No evalúa el comportamiento de los agentes para la representación eficaz de las características de ambientes HMS.
		Implementa funciones de control supervisorio	No realiza un punto de referencia en contraste con otras estructuras que aprueben el trabajo del sistema
		Implementación de herramientas de alto nivel para la representación de la dinámica de los holones	No se especifica cual es la relación que existe entre la estructura estática del sistema y los distintos modelos de comportamiento de los holones
<b>Basado en Agentes o SMA</b>	<b>ANEMONA</b> (Giret B. 2005)	Definición de una lista de requisitos de modelado para Sistemas Holónicos de Fabricación	Por ser una metodología netamente de modelado de HMS mediante agentes, no es posible a través de ella evaluar las especificaciones propias de los sistemas de control holónico
		Establecen etapas de desarrollo contando con metodologías específicas para HMS basadas en principios de la ingeniería del software	
		Se desarrolla un caso de estudio en una empresa del sector cerámico	
		Comparación del grado de adecuación de técnicas de desarrollo en tres áreas: HMS, Modelado de Empresas y Metodologías SMA	

**Tabla 3.1.** Relación de fortalezas y desventajas de arquitecturas HMS Y SMA.

En la Figura 3.2 se sintetizan las diferentes estructuras de control referenciadas en los anteriores párrafos, incluyendo su clasificación (Cruz S. & Rojas A. 2013).



**Figura 3.2.** Tipos de sistemas de control de manufactura (Cruz S. & Rojas A. 2013).

Con respecto a los HMS, la mayor parte de las investigaciones se han orientado a la definición de los conceptos generales del paradigma y al establecimiento de arquitecturas, no obstante, se han realizado pocos esfuerzos en definir metodologías para el modelado estructural y dinámico de estos sistemas. Lo anterior constituye un requisito indispensable para posicionar los conceptos más sólidos que apropien el paradigma. En (Burbano & López 2015), se presentan algunos trabajos que miembros del *Grupo de I+D en Automática Industrial* de la *Universidad del Cauca*, han venido profundizando en conjunto con la *Universidad de los Andes*, bajo el paradigma holónico y son un buen referente local. Así mismo, en (Jimenez et al. 2016) se exponen diferentes experiencias y avances con HMS. Estas arquitecturas, aunque similares, difieren de particularidades como los protocolos de comunicaciones implementados, propiedades de reactividad, características dinámicas entre otras. En la siguiente tabla (ver Tabla 3.2) se enlistan y se categorizan trabajos de arquitecturas HMS que prevalecen.

Arquitectura	Entidad Base	Protocolo de Comunicación	Propiedad de Reactividad	Tipo de Conmutación	Características Dinámicas	Referencias
PROSA	Agente	Coordinación (protocolo de comunicación directa)	Agentes de hormigas virtuales (explorar la viabilidad de la intención)	Conductual	Tiene un módulo propio de cambio de comportamiento hacia delante y hacia atrás	(Holvoet et al. 2009)
	Holón	Negociación (FIPA-ACL)	Una entidad de Holón activo programa la trayectoria del producto	Estructural	Los comandos de predicción se eliminan y la asignación se realiza de forma reactiva (negociados o no)	(Raileanu et al. 2012)
		Negociación (FIPA-ACL)	Asignación heurística			(Borangiu et al. 2015)
	Agente	Colaboración (protocolo de comunicación XML)	Agentes de hormigas virtuales (exploratoria e intencional)	Conductual	Cada agente adapta su comportamiento, comparando la programación y soluciones exploratorias	(Novas et al. 2013)
UPH	Holón	<i>Contract Net Protocol</i>	Holón Recurso (HR) encargado del manejo de disturbios	Estructural	El Modulo Holón cuenta con toda la dinámica examinada sobre el comportamiento del holón	(Quintero H. 2009)
	Holón	<i>Contract Net Protocol</i>	Holones guiados por los estímulos que éste genera		Permite una solución admisible tras un evento no controlable, en un tiempo apropiado, respetando especificaciones del nivel superior de una UPH	(Zapata M. 2011)
	Holón	<i>Contract Net Protocol</i>	Actor de Esquema Preconceptual realiza acción/reacción en el entorno		Las perturbaciones que se generan producen nuevas negociaciones para su auto-organización	(Arboleda C. 2011)
	Holón	<i>Contract Net Protocol</i>	Holón de la UP que responden ante cambios en el sistema		Un Coordinador dinamiza según sea la necesidad, en caso de contingencias el supervisor coopera y asume la coordinación entre el mismo nivel de agregación	(Palacio B. 2013)

	Holón	<i>Middleware</i> Orientado a Mensajes (MOM)	Unidad de Producción (UP) responde ante eventos en etapas o ciclos completos de producción		Cada orden de producción enviada a la planta es representada por un holón tarea responsable de administrar su ejecución	(Checa R. 2014)
ADACOR	Holón	Cooperación (agente de UML)	Guiados por comportamiento de toma de decisiones	Estructural	Holones aumentan el factor de autonomía y rechazan asignación propuesta	(Leitão & Restivo 2006)
	Holón	Cooperación (agente de UML)	Intenciones cliente servidor	Estructural/ conductual	Los módulos de razonamiento definen cómo evolucionan de acuerdo a la técnica de feromonas y el aprendizaje	(Barbosa 2015)

**Tabla 3.2.** Características de arquitecturas de control holónicas que se destacan.

La Tabla 3.2 establece elementos clasificatorios, que en concordancia con (Jimenez et al. 2016), muestran el desarrollo de las arquitecturas holónicas sobresalientes PROSA, UPH y ADACOR, y su categorización.

En los últimos años, se han aplicado tecnologías de agentes a la integración de empresas de fabricación y administración de cadenas de suministro, planificación de producción, asignación de recursos y control, manipulación de materiales, y desarrollo de nuevos tipos de sistemas de producción con sistemas holónicos, por ejemplo en (Botti N. & Giret B. 2003; Mařík et al. 2015). También, se han aplicado agentes inteligentes y sistemas holónicos en el desempeño de algunas tareas correspondientes a los niveles de la pirámide de automatización industrial, presentados en (Aguilar et al. 2013). Sin embargo, se presenta poca validación en la generación de los nuevos modelos de HMS, que deberían dotar de inteligencia a toda la arquitectura; por tanto, su aplicación en la industria aún no ha sido lograda plenamente, excepto en tareas específicas.

No obstante, no sólo HMS o MAS se utilizan para diseñar y desarrollar el control de la emergente fabricación distribuida. La *Arquitectura Orientada a Servicios* o SOA (del inglés, *Service Oriented Architecture*), por ejemplo, se ha pronunciado en los últimos años sobre el desarrollo del control distribuido. SOA es desplegada en (Borangiu et al. 2016), donde el requisito principal es la interoperabilidad transparente entre dispositivos. Ejemplos de proyectos europeos con SOA se aluden en (Barbosa 2015; Leitão et al. 2016).

### 3.2. Industria 4.0: el futuro basado en Sistemas de Producción Cyber-Físicos

Recientemente los sistemas de fabricación están asumiendo la descentralización de las capacidades de procesamiento y siguen una distribución en sus puntos críticos de decisión, en su mayoría, a través de entidades inteligentes. Esta nueva tendencia probablemente se impulsará de gran manera debido a la promoción de la *Industria 4.0* (Lee et al. 2016) y los emergentes adelantos de Ingeniería, en donde se incluyen el



Internet de las cosas (del Inglés, *Internet of Things*), en adelante IoT. Esta iniciativa parte del Ministerio de Industria del Gobierno Alemán y se ha extendido en toda Europa. Se antepone como un gran salto cualitativo dentro de la presente década, en la que se soporta la *Cuarta Revolución Industrial*, como se expone en (Vogel-Heuser & Hess 2016; Gobierno Alemán 2015; Wang et al. 2015; Monostori et al. 2016).

El termino Industria 4.0 o I4.0 (del alemán, *Industrie 4.0*) describe el desarrollo de lo que se hacen llamar como las “fábricas inteligentes”. En (Hehenberger et al. 2016), se explica que I4.0 se promueve gracias a la era de las nuevas tecnologías de comunicación y la entrada a la manufactura del IoT (Hossain & Muhammad 2016; Lin et al. 2016; Zhang et al. 2016), que en principio se le atribuye la búsqueda de redes de electrodomésticos inteligentes (Takenaka et al. 2016). Como se muestra en la Figura 3.3, la Industria 4.0 tiene su fundamento en nueve diferentes tecnologías como El Big Data, los Robots Autónomos, la simulación en 3D, entre otras de (Rüßmann et al. 2015; Terkaj et al. 2015).



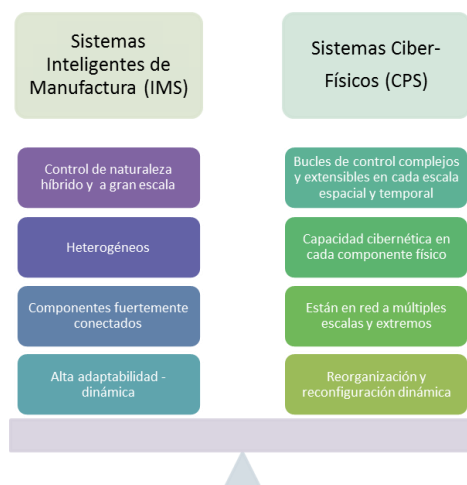
**Figura 3.3.** Las nueve tecnologías que soportan la Industria 4.0.

La base fundamental en que se apoya la I4.0, entre otras, son los Sistemas Ciber-Físicos o CPS. De acuerdo con (Asare et al. 2012) un CPS son integraciones de dispositivos (de tipo computacional), redes y procesos físicos. Además, son los que se encargan de que se supervise y se controle cualquier proceso mediante bucles de retroalimentación, que pueden incluir conectividad a la nube. Las tecnologías en que se basa los CPS son en entre tantas –de las más viejas pero que aún evolucionan–, los sistemas embebidos (Leitão et al. 2016). También forman parte, otras tecnologías o paradigmas que se despliegan como entidades de componente físico (hardware) y cibernético (software) que convergen hacia CPS, enlistadas en (Saumeth C. et al. 2015; EIMaraghy & Monostori 2014; Monostori et al. 2016) mediante la Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Convergencia en paradigmas de sistemas de manufactura.

Teniendo en cuenta las particularidades de IMS y de CPS, como se presenta en la Figura 3.5, estas se hacen semejantes y se evidencia su alta compatibilidad. Así, las empresas emergentes y las que prevalezcan en el futuro, se beneficiarán ampliamente de las características de la *Manufactura Inteligente*, que se enfoca desde la gestión del conocimiento, como se expone en (Dumitrache & Caramihai 2010).



**Figura 3.5.** Características semejantes y de compatibilidad entre IMS y CPS.

Los CPS se enlazan en redes digitales configurandos como una nueva generación de entidades, que en concordancia con los fines de la IoT, se desean interconectar local y globalmente (Hehenberger et al. 2016). Su aplicabilidad es amplia, de hecho la Universidad de Berkeley y el *NIST*, establecen una página oficial en que se pueden extender en detalle, las aplicaciones con CPS (Wang et al. 2015; Asare et al. 2012). El mapa conceptual de la Figura 3.6, muestra que los CPS se pueden implementar en aplicaciones de sistemas de transporte, automóviles, fábricas inteligentes, procesos de automatización industrial y edificaciones (hospitales, hogares, ciudades, oficinas), y en general, en dispositivos electrónicos personales.

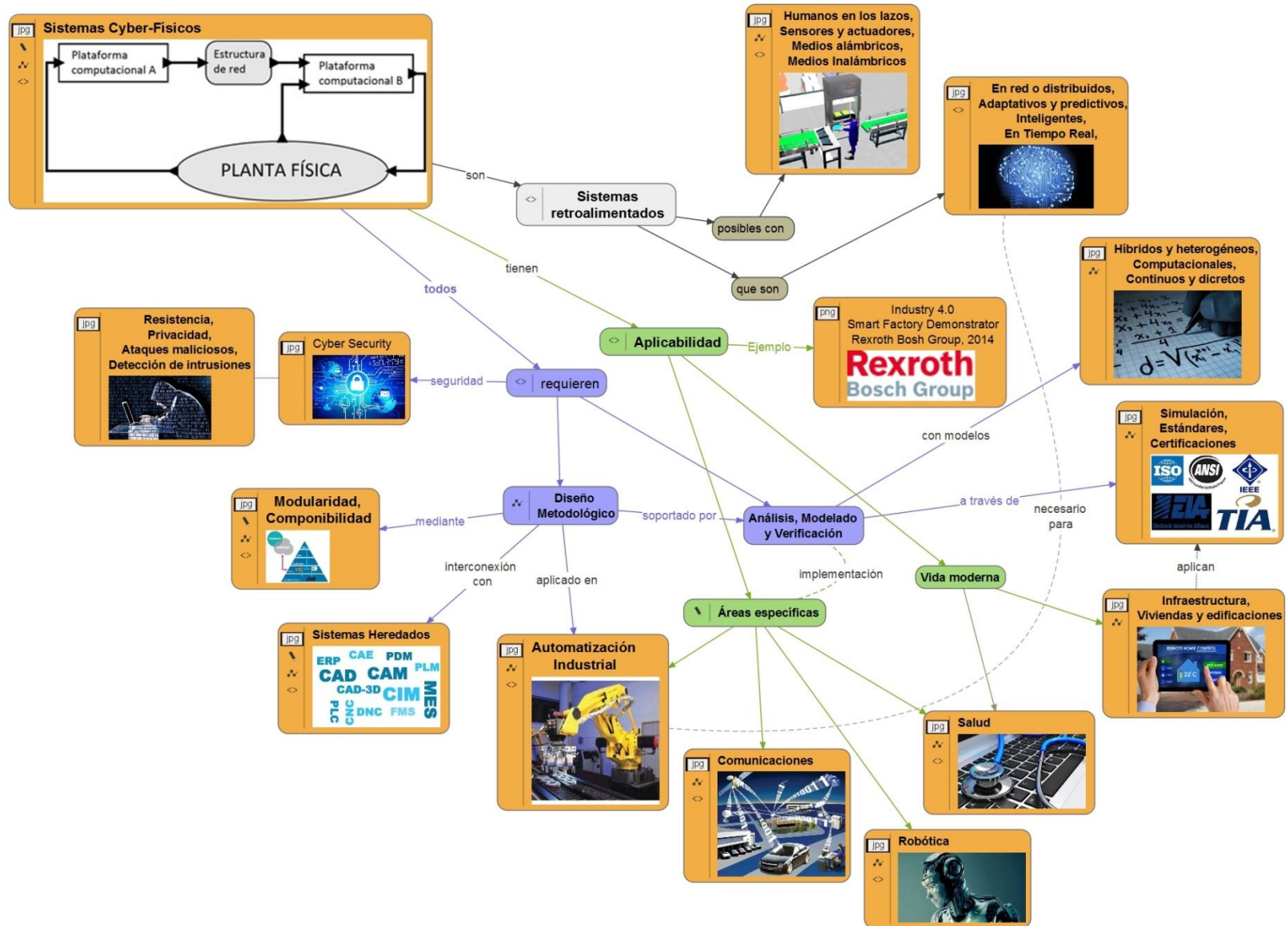


Figura 3.6. Mapa conceptual de CPS (Asare et al. 2012; Wang et al. 2015).

La Revolución Industrial es un concepto que se está desarrollando, y que viene generando un impacto considerable en la sociedad y la economía (IAS 2014; Wang et al. 2015). El término "Revolución" se puede definir como un cambio rápido y fundamental, pero no hay duda de que sus transformaciones más importantes se produjeron en un plazo relativamente corto. Desde que las Industrias han surgido, se han sustituido talleres de pequeña escala y talleres artesanales. En la Figura 3.7 se muestra la secuencia de las cuatro etapas de la emergente *Revolución Industrial*.



**Figura 3.7.** Cronología de acontecimientos que preceden la Industria 4.0.

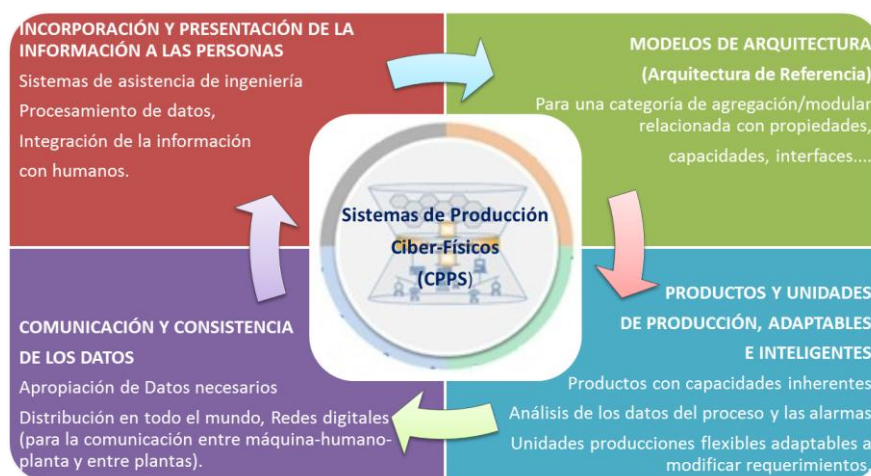
En la Figura 3.7, se ejemplariza que desde el primer telar mecánico, que data del año 1784 (hace exactamente 230 años), se pueden distinguir las etapas en el proceso en curso, de la enunciada cuarta *Revolución Industrial* (Rüßmann et al. 2015; Bauernhansl et al. 2014). Esta es la forma secuencial precedente a la I4.0: la *Primera Revolución Industrial*, se produjo hacia el final del siglo XVIII, a través de la “aceleración” de producción mecánica, que se basó de agua y vapor; posteriormente, la *Segunda Revolución Industrial*, se generó a principios del Siglo XX, con la introducción de la cinta transportadora y la producción en masa. Sobresalen los nombres de los iconos de esta época, tales como *Henry Ford* y *Frederick Taylor*; así, la *Tercera Revolución Industrial*, se concibe gracias a la automatización de la producción por medio de la electrónica y la informática.

Desde junio de 2015 en (Gobierno Alemán 2015), se exhibe una plataforma pública, en donde se coordinan actividades de I4.0, como base de consulta para entidades académicas o para pequeñas y grandes empresas. *Plattform-i40*<sup>14</sup> se apoya en el Ministerio Federal de Economía y Energía, y el Ministerio Federal de Educación

<sup>14</sup> Página oficial web oficial disponible en: <http://www.plattform-i40.de>

e Investigación, del Gobierno Alemán. Aunque la mayoría de proyectos modelos se limitan a la región germano parlante (Alemania, Austria y Suiza), en Francia<sup>15</sup> por ejemplo, se encuentran entidades como *Dassault Systèmes*, *EADS* y *Astrium*, que sobresalen en actividades de I4.0 y el Internet de las Cosas. En Estados Unidos, también se encuentra el *Smart Manufacturing Leadership Coalition* (SMLC), que se sitúa dentro de las modalidades de la fabricación del futuro.

Las unidades de producción, que ya se han venido implementando de acuerdo a los conceptos de I4.0, se denominan *Sistemas de Producción Ciber-Físicos* o CPPS (Vogel-Heuser & Hess 2016; Monostori et al. 2016; Lee et al. 2016). En (Vogel-Heuser et al. 2012), se definen los CPPS como la base para la Industria 4.0 se establecen características diferenciadoras. En (IAS 2014; Bauernhansl et al. 2014), se resumen las principales características técnicas de los CPPS, que se agrupan en cuatro sub-áreas, ilustradas mediante la Figura 3.8:

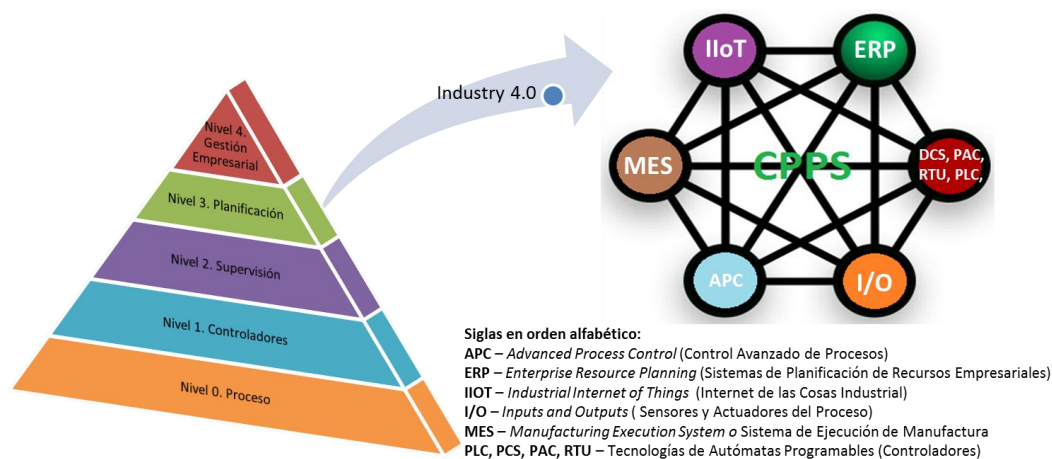


**Figura 3.8.** Cuatro sub-áreas de desarrollo para CPPS (Vogel-Heuser et al. 2012).

En resumen, los CPPS permitirán apoyar la comunicación entre las personas, las máquinas y los productos de manera más eficiente. Los elementos de un CPPS serán capaces de permitir la adquisición de datos en los procesos, de manera que este se pueda auto controlar de forma más autónoma. Aunque seguirá siendo necesario que en ciertas tareas se interactúe con los seres humanos, esto se obtendrá a través de interfaces más adaptables (reconfigurables) e inteligentes (eficientes).

Pese a los progresos considerables de CPPS, todavía prevalecen los niveles de control jerarquías típicos, que incluyen PLC comunes en los procesos. Paralelamente, se encuentran otros tipos de autómatas (DCS, PAC o RTU) que se implementan para ser capaces de proporcionar el más alto rendimiento de los bucles de control crítico. De este modo, se encuentra en aumento los niveles de la jerarquía CIM, pero se inquiera una manera más descentralizada, en la que cómodamente se basa el desenvolvimiento característico de los CPPS (ver Figura 3.9).

<sup>15</sup> Ver publicación online: <http://www.usine-digitale.fr/article/cebit-sap-declare-sa-flamme-a-l-internet-des-objets.N192816>



**Figura 3.9.** Descomposición de la pirámide CIM en aplicaciones distribuidas.

Los CPPS buscan romper en parte, con la limitada pirámide de automatización tradicional o CIM, señalada en el marco teórico de este documento (ver sección 2.1). En efecto, una aproximación general, inicialmente en (EIMaraghy & Monostori 2014), supone que un CPPS consta componentes funcionales principales pero que se están transformando en sistemas altamente distribuidos (Leitão et al. 2016).

Como se ve en el lado derecho de la Figura 3.9, en primera instancia, se tiene la adquisición de datos en tiempo real mediante los I/O, desde el mundo físico (proceso). Luego, se puede llevar la información hacia un espacio cibernético mediante IIoT. En otros puntos de la red basada en CPPS, se incorporan componentes de control avanzado (mediante autómatas programables), la gestión inteligente de datos, el análisis y las capacidades de computación constituidos por el espacio cibernético (sistemas ERP, MES y APC). Todos estas características se interconectan de alguna manera y se lleva a cabo una distribución más dinámica, descentralizada y autónoma (Bauernhansl et al. 2014).

A pesar de los avances salientes, la presencia de sistemas heredados (tradicionales), dificulta el paso a paso de las aplicaciones de CPPS en los sistemas de producción existentes. La transformación de un sistema tradicional –hasta un punto que se apropie de características de la Industria 4.0– implica problemas similares a los del enfoque holónico y los HMS.

Gracias a que la Industria 4.0 surge a partir de la manufactura avanzada y los CPS, el impacto final que se prevé siempre trascenderá a otros campos, en los que se incluyen los servicios públicos y las ciudades inteligentes o *Smart Cities* (Saumeth C. et al. 2015). En algún instante, todas las tareas de producción se coordinarán; inclusive, es muy probable que se suspendan para que se adapten a un nuevo aumento de demandas en la red inteligente. Finalmente, el reto de la industria 4.0 abre nuevas líneas de investigación y desarrollo en los influyentes Sistemas Inteligentes de Fabricación, incluidos los de manufactura holónica HMS.

## Capítulo 4

# Construcción del Modelado Estructural y Dinámico del HMS de Referencia

Se hace indispensable contar con metodologías de diseño que faciliten de manera clara y precisa la implementación de sistemas, específicamente los de tipo holónica. En la mayoría de trabajos de HMS no se muestran tales requisitos, tal vez gracias a que sólo se realizaron esfuerzos en la definición de la arquitectura, como insumo para su estado del arte (Quintero H. 2009).

Lo que se pretende con el desarrollo de este capítulo, representa uno de los principales aportes significativos en el Control y Supervisión de HMS's. Estos se extendería como un modelo genérico que se podría implementar en organizaciones de procesos de tipo Discreto y Lote (Batch). La metodología que se aplica a la presente validación, se comprende como la conceptualización y la implementación de secuencias estructuradas, mediante actividades claves en los diferentes componentes de un HMS de referencia.

En la construcción de modelados estáticos y dinámicos de sistemas holónicos se enfatizan formalismos como la notación UML, IDEF0 y las Redes de Petri (ver secciones 2.4 y 2.5). Esta sistemática se basa como una combinación parcial de los formalismos presentados en la metodología CIMOSA<sup>16</sup> (del inglés, *Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture*). CIMOSA es un marco de modelado empresarial, cuyo objetivo es apoyar la integración de la empresa de máquinas, equipos y personas, mediante diferentes lenguajes. Los trabajos en (Chacón et al. 2008; Leitão & Restivo 2006; Van Brussel et al. 1998; Vernadat 1993; Presley 1997), se muestran como ejemplos sobresalientes de HMS, en donde se siguen los mismos lenguajes de formalismo.

Justamente, en las siguientes secciones se busca especificar la arquitectura holónica de referencia mediante modelos IDEF0 y UML (diagramas de caso de uso, diagrama de clases y diagrama de secuencias), para su posterior validación. Su estructura tiene una fuerte visión hacia la metodología de desarrollo de software, como los diagramas de clase de la programación orientada a objetos. El modelo se basa como referencia para que se entienda el comportamiento estructural y dinámico del holón fundamental en la arquitectura. También, se detalla la supervisión y el control del proceso mediante Redes de Petri. En las RdP's se especifican los distintos

---

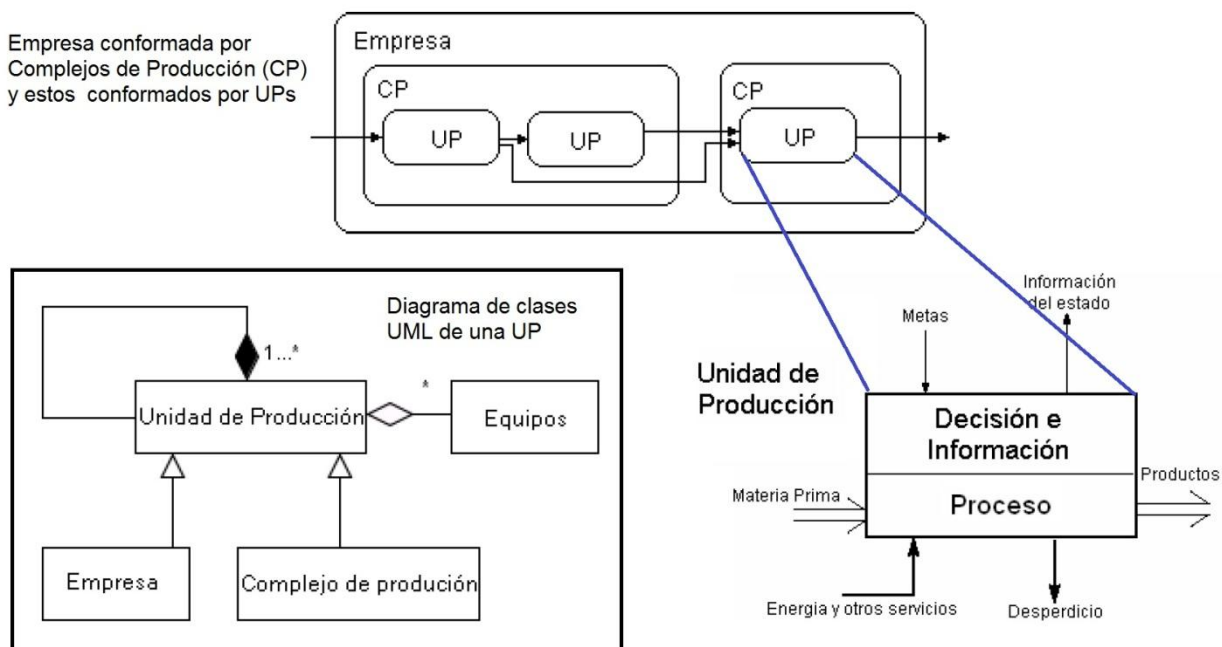
<sup>16</sup> Ver página web oficial en: <http://www.cimosa.de>

estados (eventos) y transiciones que se deben tener, además de precondiciones y poscondiciones de cada holón en la arquitectura.

Para el presente capítulo se tuvieron en cuenta el análisis, diseño y lo resultados, de los desarrollos previos en (Checa R. 2014; Zapata M. 2011; Arboleda C. 2011; Quintero H. 2009; Palacio B. 2013; Burbano & López 2015; Rojas A. 2010; Chacón et al. 2008)

## 4.1. Características y Justificación de la Arquitectura HMS de Referencia

La presente tesis toma como referencia la arquitectura de (Chacón R. & Rojas A. 2006; Chacón et al. 2008) denominada UPH. El principal componente de la UPH es la Unidad de Producción o UP (ver sección 3.1). La naturaleza de una UP se puede analizar desde la constitución de diferentes Unidades de Producción, que componen además un Complejo de Producción o CP. Así, la unión de CP's conforman una Empresa, tal como se muestra en la Figura 4.1. Tanto los UP como los CP, se pueden considerar holones. Cuando en una UP y sus elementos, se asimilan características de tipo holónicas, entonces se obtiene la arquitectura Unidad de Producción Holónica (UPH). En síntesis, esta arquitectura se caracteriza por su búsqueda de integración total y distribuida, basada en Complejos de Producción.



**Figura 4.1.** Características de la arquitectura UPH (Chacón R. & Rojas A. 2006).



Dentro de la UP se encuentra el *Proceso* y las actividades de *Decisión e Información*. En el *Proceso* o el sistema físico de la UP, se encuentran las interrelaciones entre dispositivos y demás acciones fisicoquímicas que se encargan de transformar la materia prima, en productos terminados. Por otro lado, en las actividades de *Decisión e Información*, se realiza el control y la regulación mediante el intercambio de información con otros sistemas (UP's). En esta última parte de la UP, también se regulan de manera global los CP's dentro de la empresa.

En la autonomía de las UP, se infiere que estas pueden decidir acerca de su misión. Por ejemplo, una UP puede elegir las acciones necesarias para realizar un producto, o detectar previamente, si una de sus metas será afectada por nuevas decisiones. Una UP se encarga además de informar si se ha terminado una meta, o si definitivamente ésta ya no se puede alcanzar.

La arquitectura que se toma como guía tiene ventaja porque se centra en sus tres partes fundamentales: Holón Misión (HM), Holón Ingeniería (HI) y Holón Recurso (HR); siendo este último, el principal elemento para el desarrollo de sus actividades en la CP. En la arquitectura UPH se hace énfasis sobre los HR, debido a que se logra una mejor gestión de recursos, mediante la asignación correcta de los mismos. Además, en los HR se tiene la supervisión constante de estos, mediante el monitoreo de su estado de forma constante. Con el estado de los HR se verifica la capacidad, cumplimiento y disponibilidad de las tareas que se han asignado dentro de cada UP. Por lo anterior, se entiende que el HR es el eslabón fundamental en la generación de holarquías dentro de la UPH (Burbano & López 2015).

Los holones en la UPH favorecen la escalabilidad y la reconfiguración del sistema, gracias a que se logra una supervisión y un control ágil, flexible y dinámico en la UP. El vector de estados de la UP, por ejemplo, se concibe como el conjunto de todos los estados parciales de la holarquía (en la CP). Esto agrega un valor que se diferencia en términos de reactividad y proactividad del sistema. Estas características se obtienen mediante la arquitectura UPH; lo anterior con base en que se realiza un constante monitoreo al estado global de los recursos, como a las misiones de estos.

Finalmente, la arquitectura basada en UP, facilita su modelado y desarrollo para casos de estudio prácticos basados en HMS. Sumado a esto, se tienen los constantes y actuales desarrollos bajo esta tipología. Con UPH se han realizado proyectos industrializados por diferentes grupos de investigación académicos. Por ejemplo, en el ámbito local, existe un número considerado de trabajos de éxito en la Universidad del Cauca y la Universidad Nacional.

Por otro lado, internacionalmente la arquitectura se posiciona gracias al trabajo desarrollado en el *Laboratorio de Sistemas Distribuidos y Automatización Industrial* (LaSDAI). Este es liderado por el Doctor Edgar Chacón en la Universidad de los Andes. Todo lo anterior permite el soporte necesario para que se lleve a cabo la validación de un sistema de control y supervisión, desde el paradigma holónico y con altas probabilidades de éxito.

## 4.2. Modelado de la Supervisión, Control y Reconfiguración de la UPH

En esta sección se presenta el modelado de sistemas holónicos, de acuerdo a los requisitos expuestos para HMS (Giret B. 2005; Höpf 1994). Se enseñan los modelos en torno a las características de SED, expuestas en el marco teórico de este documento (ver capítulo 2). Para ello se debe recordar que un sistema de producción, se entiende aquí como un sistema global y complejo denominado Unidad de Producción Holónica.

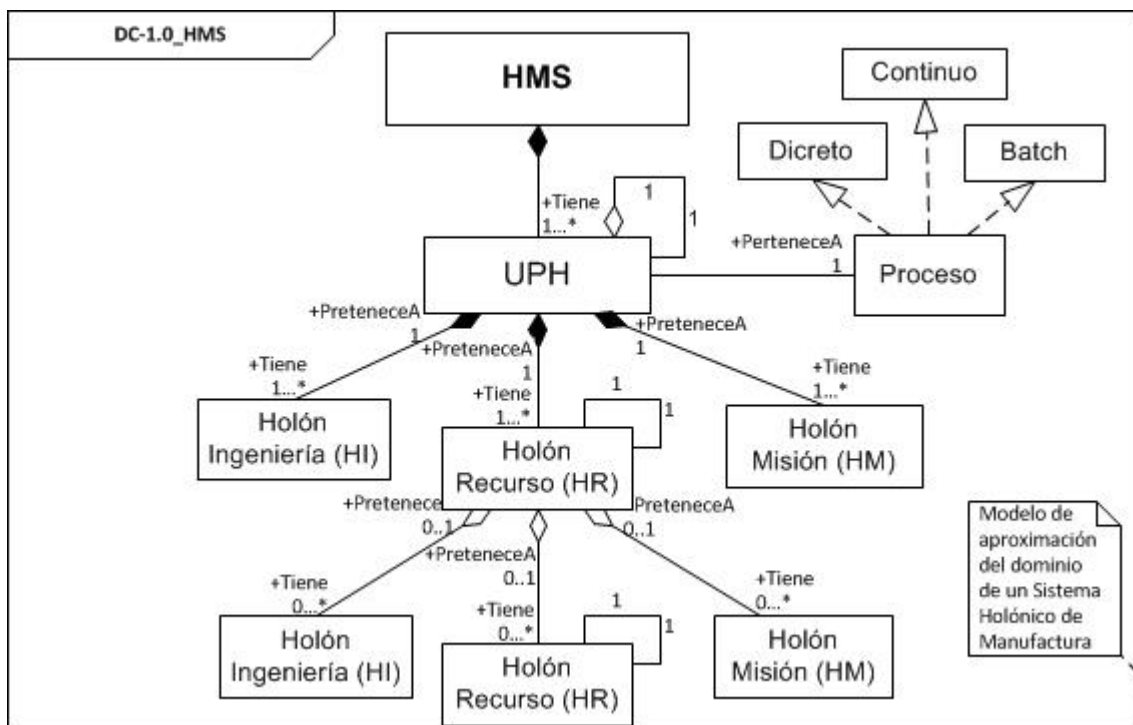
Conjuntamente, en un sistema de manufactura se puede incluir, entre las diversas actividades, la supervisión y el control dentro del proceso. El sistema se piensa desde la perspectiva holónica con el fin de cumplir con algunas de las características definidas por la “fabrica del futuro” (ver secciones 1.1 y 2.3). En efecto, estas consideraciones se tienen en cuenta como requisitos, que se identifican en los dos grupos: *Funcional e Ingeniería de Software* categorizados en la Tabla 4.1.

TIPO	REQUISITO	DESCRIPCIÓN
FUNCIONAL	Requisito 1	Los sistemas de control de fabricación requieren entidades autónomas que se organizan en estructuras que son a la vez jerárquicas y heterárquicas
	Requisito 2	Las unidades de control de fabricación principalmente requieren de un comportamiento basado en rutinas que es al mismo tiempo efectivo y con características de tiempo real. Este comportamiento puede ser tanto configurable o auto-adaptativo
	Requisito 3	Los métodos de programación deben proveer encapsulación de datos y procesos
INGENIERÍA DE SOFTWARE	Requisito 4	Los programas de control deben tener una semántica clara
	Requisito 5	Un método o metodología de desarrollo para sistemas de fabricación holónicos debe proveer una mecanismo de traducción de tareas de control, sobre un recurso de fábrica, o de funcionalidades de la fábrica a entidades con comportamiento autónomo
	Requisito 6	Un método o metodología de desarrollo para sistemas de fabricación holónicos debe ofrecer al ingeniero estructuras y mecanismos que permitan llevar a cabo procesos de análisis y diseño por capas de abstracción
	Requisito 7	Un método o metodología de desarrollo para sistemas de fabricación holónicos debe definir un proceso de desarrollo mixto que integra los enfoques <i>top-down</i> y <i>bottom-up</i>
	Requisito 8	Un método o metodología de desarrollo para sistemas de fabricación holónicos debe integrar el rango completo de actividades de producción, desde la recepción de una orden pasando por el diseño, la fabricación, y el mercadeo para lograr la empresa de fabricación ágil

**Tabla 4.1.** Requisitos de modelado para HMS (Giret B. 2005; Höpf 1994).

Siguiendo las particularidades de la arquitectura seleccionada, que se expone en el estado del arte (ver sección 3.1), se resalta que el comportamiento del holón en una UPH se guía a través de sus propios objetivos. La UPH se apropia de iniciativas (tiene autonomía), gracias a que toma decisiones para que se cumpla su objetivo. No obstante, se obliga a cooperar con los demás componentes e informar su estado en dependencia al cumplimiento de una misión o meta.

En la Figura 4.2 se visualiza un modelo general de un HMS con UPH, mediante diagramas de clase UML. Mediante el diagrama de clases de dicha figura se formula que un sistema holónico manufactura, se puede formar a partir de una o muchas Unidades de Producción Holónicas. Estas UPH's a su vez, se componen indispensablemente por los diferentes números de holones fundamentales (HR, HI y HM). La UPH pertenece a procesos de manufactura de una empresa, que pueden ser de tipo Lote (Batch), Discreto o Continuo. Además, la UPH se funda con atributos de autosimiliaridad, en donde se entiende que puede conformarse internamente por otros holones de la misma naturaleza. El holón base de la arquitectura UPH siempre será el holón recurso, el cual se considera como el mínimo componente dentro de la arquitectura.



**Figura 4.2.** Diagrama de clases general de un HMS basado en UPH.

En términos específicos de la presente propuesta, el concepto de UPH se adapta de manera particular. Se adecua sin que se pierda su concepción como un conjunto de unidades elementales y de recursos organizados (holones). De igual forma, las UP's se configuran de manera que se logren actividades específicas dentro

la cadena de valor (expuesta en sección 2.1). Aquí se propone adaptar la arquitectura UPH con el propósito de obtener productos exigidos de una *Lista de Despacho Inicial*. Se cumple así, que las actividades se ven como la agregación de UP cooperantes de la propuesta original. No obstante, se deben tener las siguientes consideraciones del paradigma holónico, acomodados de la arquitectura original (Zapata M. 2011; Burbano & López 2015):

**Holón Recurso (HR):** como componente primordial de la UPH, se concibe como un recurso relacionado a un equipo en específico. Este holón se provee de una parte para su toma de decisiones y la UPH, le facilita cooperar con otros holones. Este HR posee metas y un vector de estado, que contiene entre tanto, su información de capacidad y disponibilidad. Este recurso también está previsto de supervisar su propio comportamiento y se puede ajustar de manera que pueda responder ante las perturbaciones que se reciban. La agregación de HR constituye una UP, que forman las holarquías de los Complejos de Producción de la UPH.

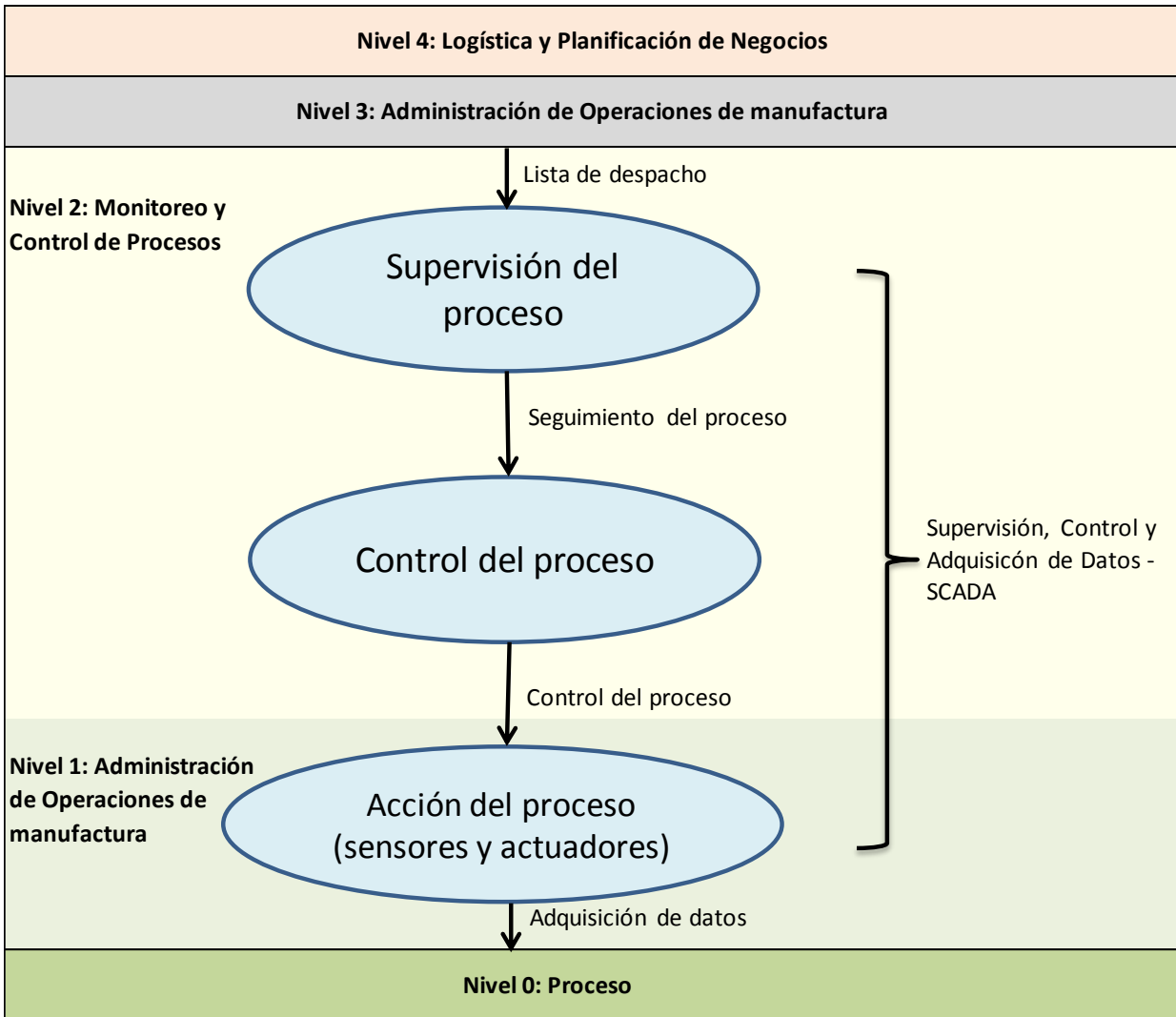
**Holón Misión (HM):** se concibe como el producto (o los productos) que se debe(n) producir en un acuerdo establecido. Lo anterior se debe cumplir dentro de un lapso de tiempo que se pacta y se acepta por una UP. A un HM se le faculta para acordar metas y realizar el respectivo seguimiento.

**Holón Ingeniería (HI):** se describe como la información del holón para que se creen los productos. Este se resalta como un elemento diferenciador sobre otras arquitecturas holónicas. Por ejemplo, en PROSA, el holón producto se considera estático, mientras que un HI en una UPH tiene condiciones dinámicas porque se agiliza activamente en el proceso de acuerdo de misiones. En resumen, un HI contiene los diferentes pasos y las operaciones programadas (metodología), que se asocian a la fabricación de un producto. Este holón infiere sobre los recursos (HR's) que son requeridos por cada meta acordada (por HM's).

Con una tipología de HMS mediante UPH's se busca responder a funciones parciales, pero críticas de un proceso de manufactura convencional. Específicamente este trabajo se refiere a funciones que se plantean desde ISA 95 para la integración de sistemas y S88 para el control de procesos (ISA Committe SP88 2010; ISA-95 2013). La propuesta que se desarrolla aplica una validación de características holónicas, desde la perspectiva de los SED y los diferentes modelos estructurales y dinámicas que se plantean en este capítulo.

Entre las principales actividades de la UPH se encuentran el *Proceso de Producción*, el *Plan de Producción*, los *Recursos* y los mecanismos de *Control y Supervisión* (Zapata M. 2011). Estas últimas actividades de un sistema de manufactura –control y supervisión– se hallan distribuidas dentro de los niveles 0, 1 y 2 de ISA 95. Tanto la supervisión como el control, son el énfasis del presente trabajo y se extienden en detalle a lo largo de este capítulo.

Mediante la gráfica de ISA 95 de la Figura 4.3, se detallan actividades del nivel 1 y 2. En estos niveles se encuentran definidos subprocesos, que se realizan con el fin de intercambiar información y regular el Proceso (nivel 0). Se resalta que la actividad Despacho de *la Producción*, proviene del nivel MES (nivel 3), y por este motivo no se entra en detalle en la presente propuesta. Sin embargo, en esta subfunción se dispone de la *Lista de Despacho*. De esta forma mediante la presente propuesta, se puede complementar la actividades de *Programación de la Producción*, realizadas desde el paradigma holónico en (Burbano & López 2015).

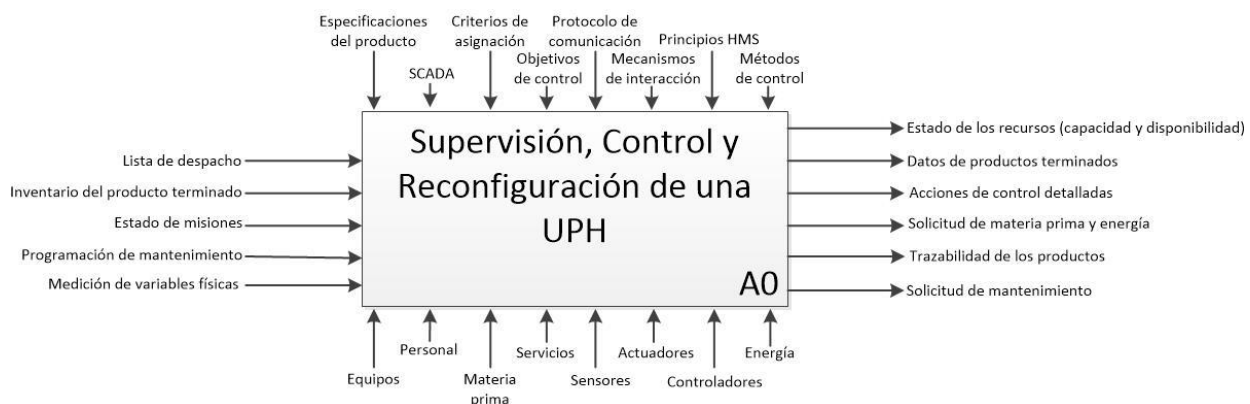


**Figura 4.3.** Extensión de niveles de Control y Supervisión en ISA 95.

Para la siguiente validación se tiene que desde el nivel 3 se recibe una *Lista de Despacho*. En esta se establecen las diferentes órdenes de trabajo que se deben seguir, controlar y enviar al nivel de piso de planta del proceso. Las diferentes subfunciones de la propuesta se denominan, Supervisión del Proceso, Control del Proceso y las Acciones del Proceso de sensores y actuadores.

Desde un enfoque holónico, se concibe que la supervisión y el control tiene la autonomía de generar diferentes holarquías y misiones, mediante sus diferentes tipos de holones en la UPH. Esta arquitectura se desenvuelve en torno al cumplimiento de objetivos; siempre y cuando no se descuide el desempeño óptimo y se sobrepase las capacidades y disponibilidades de los recursos del sistema HMS

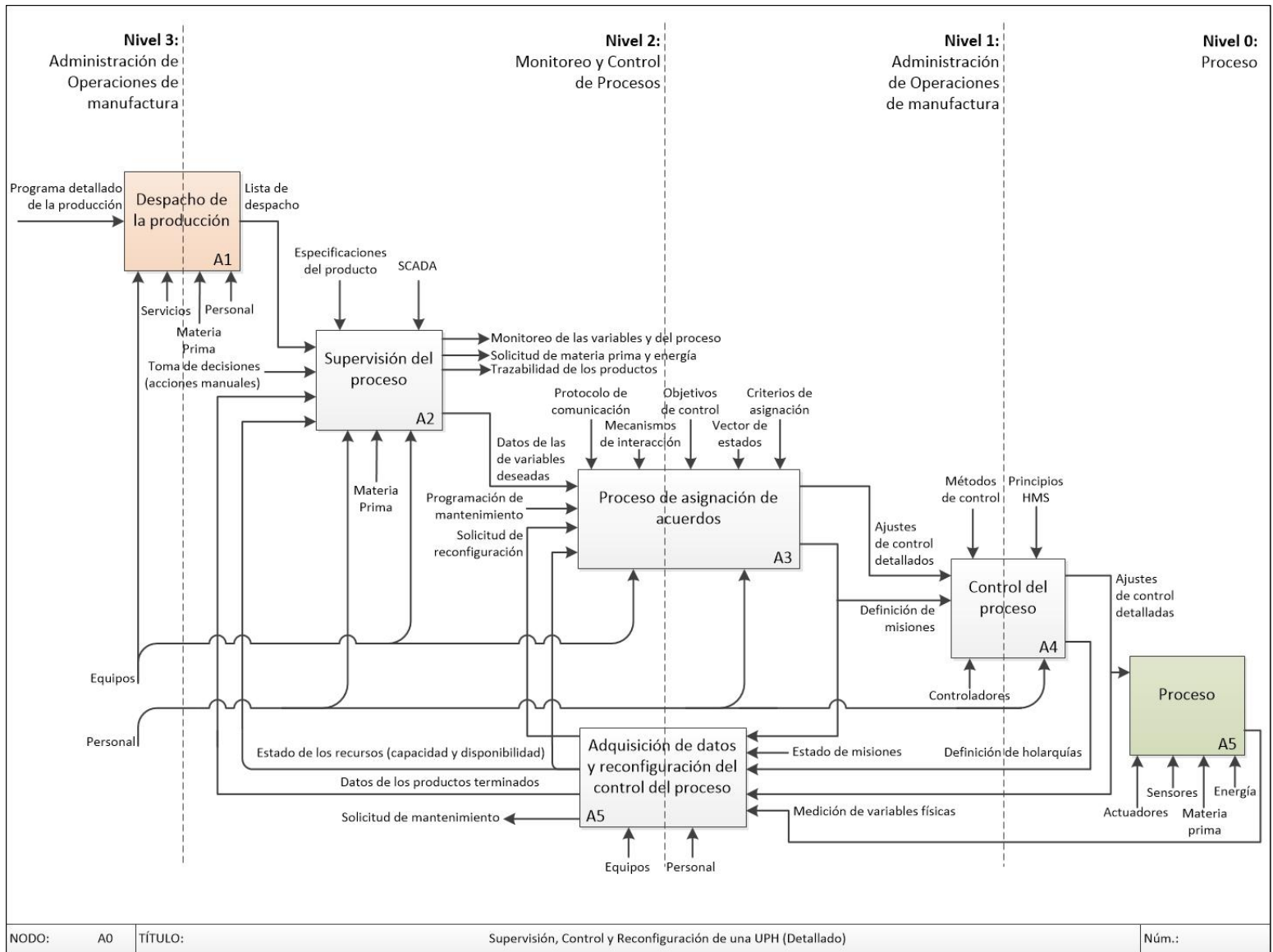
Para un mayor entendimiento, en el posterior detalle de actividades de la propuesta, primero se realiza una descripción global de la UPH a implementar. Para esto se hace uso de la técnica IDEF0 (ver sección 2.5.1) y se modela la Supervisión y Control de la UPH. Este modelo se ilustra en la Figura 4.4.



**Figura 4.4.** Supervisión, Control y Reconfiguración en la UPH (Modelo General).

En el modelo A0 de la Figura 4.4 se ilustra la abstracción más generalizada, que se considera base para la función de Supervisión, Control y Reconfiguración en la UPH. En este modelo se establecen los principales flujos de información a la entrada y salida del sistema holónico. Además, se exponen en el modelo, los mecanismos (recursos) y demás elementos de control que se requieren para delimitar estas actividades en el sistema de manufactura. A estos flujos de información se les concibe una perspectiva holónica, por ende, se orientan hacia la consecución de objetivos y metas dentro de holarquías.

Se hace necesario la comprensión del modelo A0, mediante su extensión en el diagrama hijo de la Figura 4.5. En este esquema se detallan las subactividades del flujo de información interno del modelo padre (Figura 4.4), en torno a la UPH. En el modelo extendido de la Figura 4.5, se limitan los diferentes niveles concebidos por ISA 95. Se resalta del diagrama la interfaz del *Despacho de la Producción* (A1), que se tiene desde el nivel 3. De allí proviene la *Lista de Despacho*, que se debe cumplir por el sistema holónico propuesto, mediante las actividades de A2, A3, A4 y A5.



**Figura 4.5.** Supervisión, Control y Reconfiguración en la UPH (Modelo Extendido).

En el modelo extendido de A0 (Figura 4.5), se revela la subfunción de *Asignación de Acuerdos* (A3), que no se había referenciado hasta el momento. A3 se considera una actividad en medio de la Supervisión (A4) y el Control (A5) del proceso. También se identifica en el esquema el subproceso de *Adquisición de Datos y Reconfiguración del Control del Proceso* (A3). A2, A3, A4 y A5 se complementan dentro de toda la arquitectura propuesta y se describen con propiedades dinámicas. Estas últimas actividades al igual que las primeras del modelo completo, se detallan en las siguientes secciones.

#### **4.2.1. Modelo de la Supervisión del Proceso (A2)**

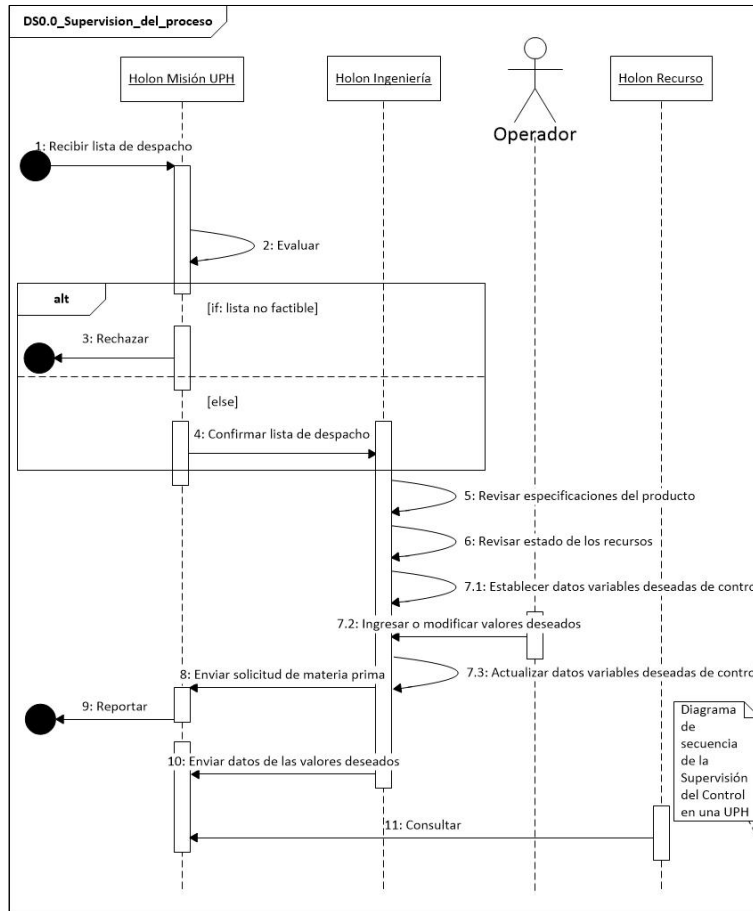
En el modelo A2 del diagrama hijo extendido (ver Figura 4.5), se encuentra la primera actividad denominada *Supervisión del Proceso*. El propósito principal que se tiene en esta actividad es el monitoreo, generación y la modificación de datos provenientes de una *Lista de Despacho* inicial. El flujo de trabajo en esta actividad (A2) se deriva en primera instancia del nivel 3 (MES) del sistema. De este nivel se desprende el programa que se ha confirmado previamente por otro tipo de UPH, en la subfunción *Despacho de la Producción* (A1).

La *Lista de Despacho* se cruza por la frontera del nivel 3, para que esta sea recibida por la subfunción *Supervisión del Proceso*. Con base al control que se ejerce desde un SCADA y las determinaciones y *Especificaciones del Producto*, se envía la información correspondiente al *Proceso de Asignación de Acuerdos* (A3). El sistema hace uso de *Equipos y Personal* que se encuentra responsable de esta actividad, con el fin de que se alcancen los objetivos establecidos.

Para cada uno de los ítems que se desglosan en la *Lista de Despacho*, se determina un número de recursos y se informa de las falencias de materia prima o energía (dado el caso). Para que se lleven a cabo las tareas de la actividad *Supervisión del Proceso* de manera factible y eficiente, se hace necesario desglosar el comportamiento de este modelo. Lo anterior se logra mediante el análisis dinámico del diagrama de secuencias UML, que se expone en la Figura 4.6.

En este esquema, se resalta la labor de un operador dentro del sistema de supervisión. El Operador se habilita para interactuar a través del SCADA, de manera que puede realizar acciones para iniciar, controlar, monitorear y finalizar operaciones que se realicen como parte de las actividades de control en la UPH (ver sección 2.6). Las diferentes acciones tomadas por el operador o por el sistema (de manera autónoma), hacen que se activen e interactúen los diferentes elementos (holones) en la arquitectura HMS.





**Figura 4.6.** Diagrama de Secuencias de la Supervisión del Proceso.

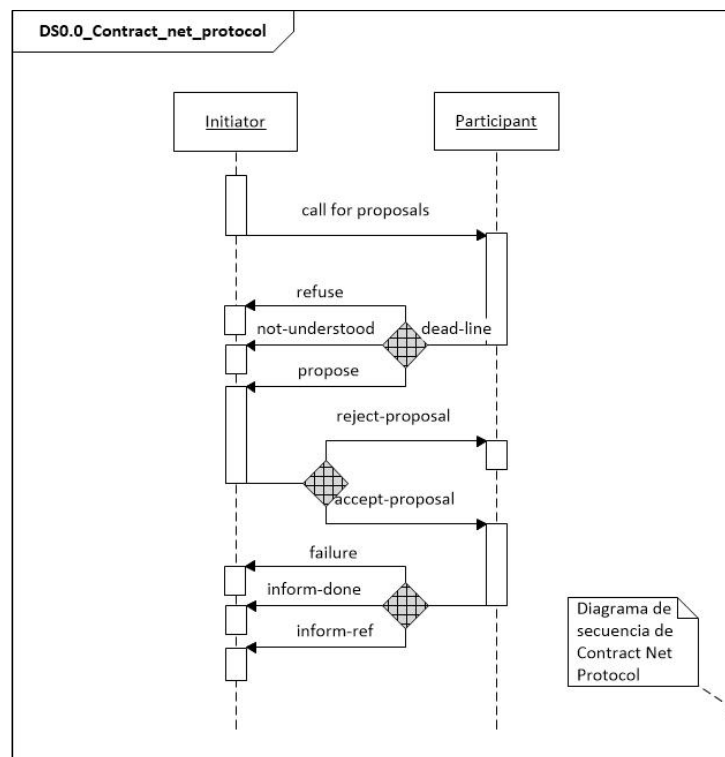
#### 4.2.2. Modelo de Asignación de Acuerdos (A3)

Este modelo se refiere a la *Asignación de Acuerdos* como segunda actividad del esquema padre A0 (ver Figura 4.4). El propósito fundamental de esta es asignar recursos para obtener los diferentes *Datos de Variables Deseadas* de la UPH. Esto implica que mediante este proceso se generan las diferentes misiones de forma local, por cada HR que se requiera en la UPH. En este punto se realizan los diferentes acuerdos de operaciones y se forman las holarquías necesarias para llevar a cabo las determinadas misiones.

Siguiendo el proceso de intercambio de información de la actividad *Supervisión del Proceso* (A2), mediante el presente modelo (A3) se hace la recepción de diferentes *Datos de Variables* deseadas. Se incluyen diferentes tipos de *set points*, o demás información relevante para el control y supervisión del sistema. Un *set point* contiene especificaciones de variables físicas, en el desarrollo de una cantidad determinada de productos.

Mediante las especificaciones de los diferentes productos de la *Lista de Despacho*, se desglosan diferentes misiones. Allí se establece la dinámica de los HM's que se encargan de realizar solicitudes y acuerdos para el cumplimiento de estas misiones. Con base al estado de los recursos y el contraste de necesidades, se realizan los acuerdos correspondientes. Un acuerdo se lleva a cabo de forma eficiente gracias a la implementación de protocolos de comunicación adecuados para este fin.

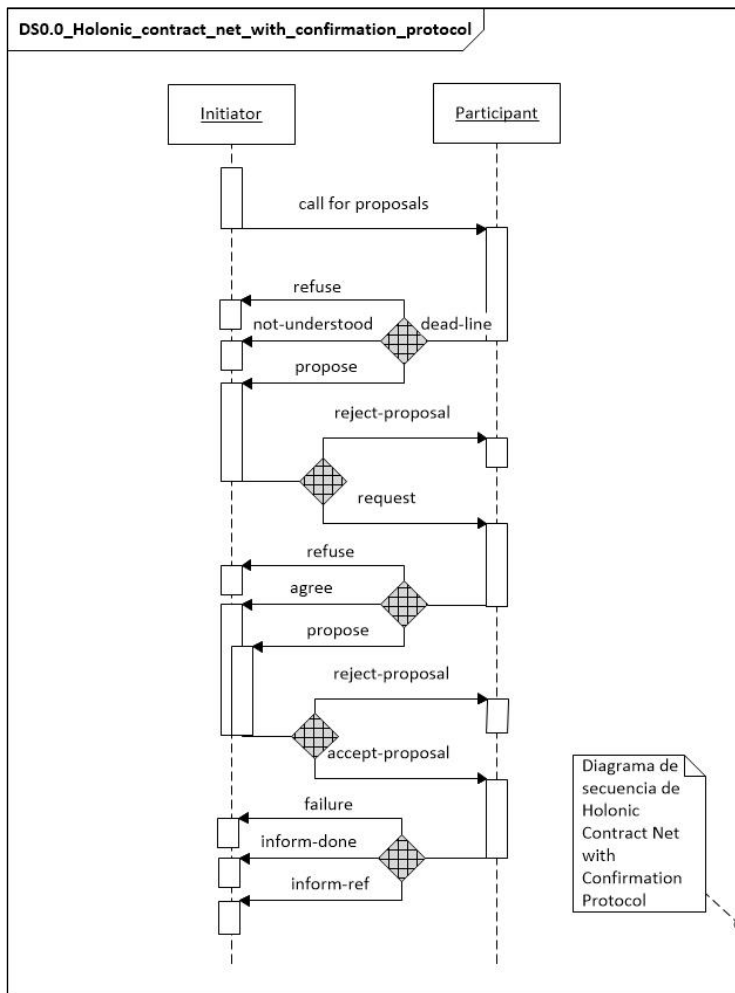
A través de un *Protocolo de Comunicación* se establecen las diferentes fases, su secuencia y los actores que se involucran para alcanzar una misión. En los sistemas de manufactura de tipo distribuida, existen múltiples arquitecturas de protocolos de comunicación, que se basan en actores denominados iniciador y participante (Burbano & López 2015). El protocolo *Contract Net Protocol* (CPN) por ejemplo, se concibe como un mecanismo de asignación de tareas (o contratos), originalmente para sistemas multi-agente. CNP se basa en un administrador y de los demás participantes que interactúan en varias etapas diferentes de negociación, como se muestra en el diagrama de secuencias de la Figura 4.7.



**Figura 4.7.** Dinámica del protocolo de comunicación CNP.

Una nueva versión que se denomina *Holonic Contract Net with Confirmation Protocol* (HCNCP), se originó con el fin de realizar mejoras optimizando el proceso de negociación. HCNCP agrega características holónicas y se propone evitar inconvenientes como la transposición de compromisos (Quintero H. 2009). Por este motivo en HCNCP se crea una etapa de confirmación y se puede añadir una

contrapropuesta a una solicitud (si esta existe). En la Figura 4.8 se muestra la dinámica del protocolo HCNCP.



**Figura 4.8.** Dinámica del protocolo de comunicación HCNCP.

Sin importar el protocolo de comunicación distribuido que se elija, lo que más se requiere de este en la *Asignación de Acuerdos (A3)*, es que el flujo de información externo interno se realice lo más eficiente posible. En este flujo se incluye la identificación de los requerimientos operacionales que se necesitan para llevar a cabo un ítem dentro de la *Lista de Despacho*. Con base a esto, se debe aceptar las ofertas de los HR's que estén en la capacidad de cumplir con estos requerimientos

Una vez se determinen las disposiciones de los HR's, se actualizan sus estados respectivos en términos de capacidad y disponibilidad. Así mismo de forma consecuente, se genera un intercambio de información con Holones Ingeniería de manera que se establecen costos de operaciones y consumibles (tiempo y materia prima necesaria). Los HR's elaboran propuestas por misión, que se comparten con los

HM's encargados, limitados por un *Vector de Estados* en la UPH. Un HR se mantiene con autonomía para determinar si puede ofertar para acordar una misión.

El *Vector de Estados* es un elemento base de control en esta actividad, en donde se guarda y se organiza la información relevante en los HR's de la UPH. Este existe con el fin de que se logre efectuar de manera exitosa el proceso de acuerdos de las misiones correspondientes (efectuadas por HM's). Las características como el tipo y el número de datos (o variables) que se almacenan en el vector, se determinan según la naturaleza de los requerimientos del sistema de manufactura. También se deben considerar *Criterios de Asignación de Recursos* y demás lineamientos de la empresa (en la Supervisión, Control y Adquisición de Datos del Proceso). Una muestra de *Vector de Estados* se ejemplarizó en (Burbano & López 2015) y se ilustra en la Figura 4.9.

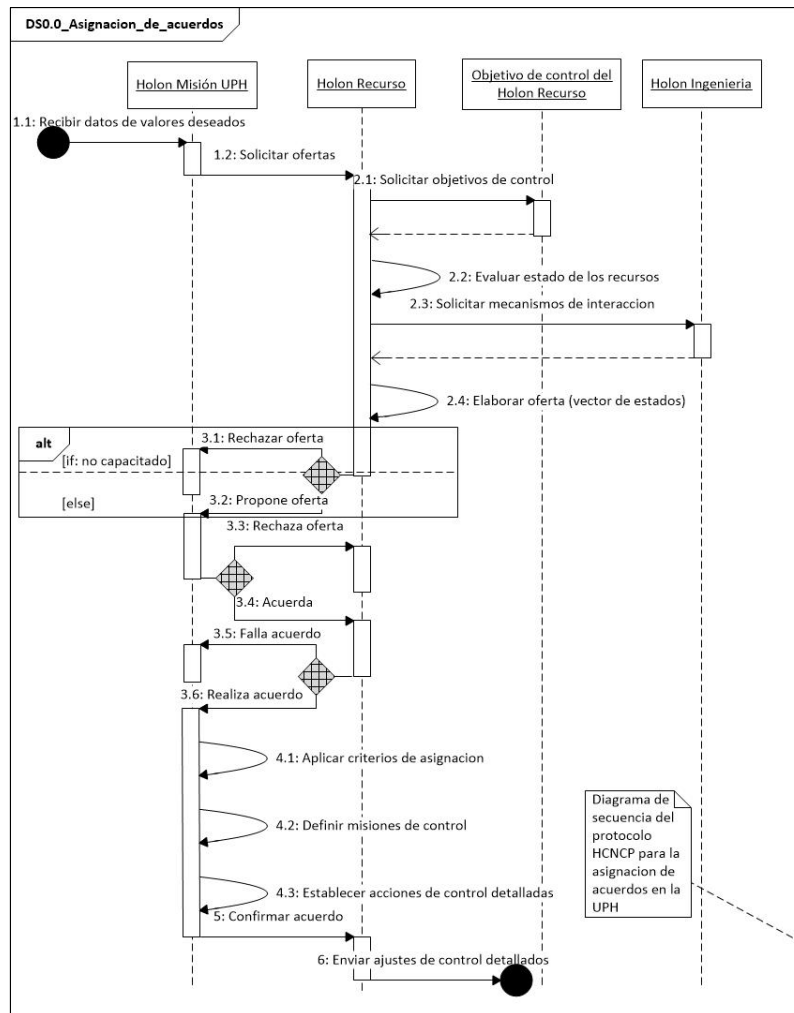


**Figura 4.9.** Ejemplo de un Vector de Estado (Burbano & López 2015).

En síntesis, en la actividad de *Asignación de Recursos* (A3), se presenta la dinámica de los diferentes holones a través de un protocolo definido, para que se acuerden las actividades operacionales de los holones recurso. En este proceso se tiene como fundamento, la información que se almacena a través de diferentes *Vectores de Estados* y la administración de los HM's. En un *Vector de Estado* se puede incluir por ejemplo, datos de la *Lista de Despacho* en términos de cantidades y gastos en las acciones que se tomen (consumibles), determinados por HI's. Así, se busca que los acuerdos sean estratégicos de manera que se elijan las mejores ofertas en los HR. Un Holón Misión se apropia de sus atributos de autonomía de manera que se generan decisiones autónomas en la asignación de acuerdos (delimitados por *Criterios de Asignación*, entre otras consideraciones).

La subfunción de este modelo se hace relevante dentro de un sistema HMS basado en UPH's, porque es la que se encarga de aplicar criterios de optimización en la asignación de recursos del sistema. No obstante, la definición de dichos criterios y técnicas que se empleen son dependencia de la naturaleza organizacional (la Empresa) del sistema de manufactura. Dentro del alcance de este trabajo de tesis, no se contempla el diseño estructurado de criterios de asignación de recursos, tampoco se incluye una técnica precisa o un algoritmo de optimización; sin embargo se puede ilustrar la dinámica de este proceso, mediante el diagrama de secuencia UML de la

Figura 4.10. Esta actividad se desarrolla entonces con la independencia del autor para que se establezcan criterios de asignación de mayor prioridad; esto es, que se tienen en cuenta factores como tiempo de finalización de tareas y el máximo aprovechamiento en la capacidad operacional de los recursos en la UPH.



**Figura 4.10.** Dinámica de secuencias en la actividad Asignación de Acuerdos.

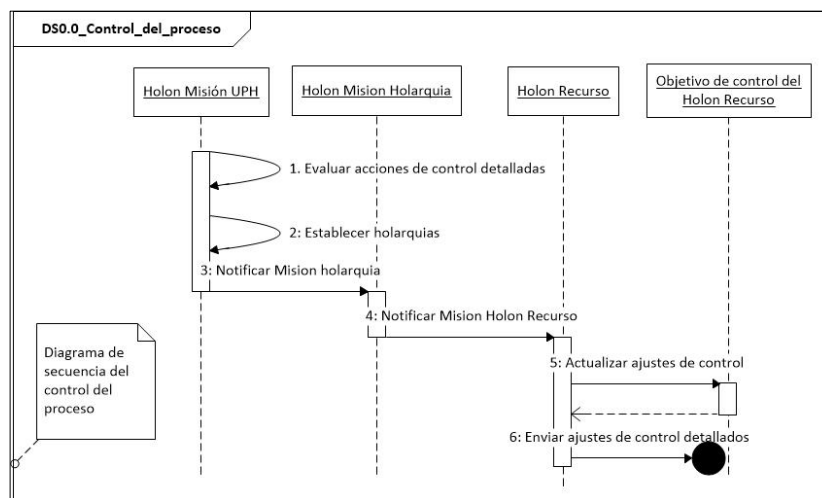
### 4.2.3. Modelo Control del Proceso (A4)

El modelo de *Control del Proceso* (A4) del esquema padre (Figura 4.4), tiene como función principal delimitar el proceso a través de ajustes de control, recibidos de la actividad *Asignación de Acuerdos* (A3). Su propósito se logra a través de la generación de holarquías y la configuración de los controladores de la UPH. En una holarquía de esta actividad, se tiene internamente un cronograma y la respectiva configuración de la secuencia de controladores, en el proceso (piso de planta). Todo lo anterior se complementa con el fin de alcanzar los productos especificados de la *Lista de Despacho* del sistema manufactura.

En la actividad previa A3 se establecen unos *Ajustes de Control Detallados*, que se concluyen luego de la *Asignación de Acuerdos*, mediante el protocolo de comunicación. En el *Vector de Estados* de esta misma actividad previa, se han almacenado los datos que relacionan los HR en la consecución de las misiones respectivas. Luego de que se confirme un acuerdo (misión) por un HR, se procede el proceso de formación de holarquías mediante la agrupación de diferentes HR. Estas jerarquías temporales que se orientan a las diferentes misiones, se guían de acuerdo al cumplimiento de la *Lista de Despacho*.

En el caso del *Control del Proceso* (A4), se aclara que una holarquía se constituye por los diferentes holones que se encargan de realizar la restricción necesaria para alcanzar los valores deseados (en la *Definición de Misiones*). Adicionalmente en la distribución de HR dentro de las holarquías de esta actividad, se concibe el hecho de que un HR se puede agregar a múltiples holarquías a la vez, con el fin de cooperar entre los mismos. Dentro la holarquía se cuenta con un cronograma de ejecución local, que se considera un HM interno dentro del HR. En el HM dentro del HR se guarda información en relación a la consecución de sus propias misiones. Es decir, se forman holarquías de manera que a cada una se le asigna un cronograma de sus tareas, y las agregaciones de estos cronogramas, se trifurcan en el *Vector de Estados* de la UPH.

Como se ve en el esquema del modelo de esta actividad (Figura 4.5) se asumen los *Ajustes de Control Detallados* para que se efectúen posteriormente sobre el proceso. Eso se hace de manera que se mantienen lazos retroalimentados de control, aplicándose tanto *Principios* de manufactura holónica, como *Métodos de Control* apropiados. Mediante la Figura 4.11 se observa el diagrama de secuencia UML que representa la interacción de los actores de la UPH, en torno al cumplimiento de la actividad A4.



**Figura 4.11.** Dinámica de secuencias en la actividad Control del Proceso.

Mediante esta actividad (A4) se pueden resaltar atributos del paradigma holónico, en relación a que se identifica la autonomía de Holones Recurso (con base a su cronograma local). Además, se suma la cooperación que tienen los mismos para realizar trabajos en conjunto, mediante las diferentes holarquías que se pueden formar para el control del proceso. Se presenta el atributo de colaboración igualmente cuando ocurre una falla, porque se puede asociar a la misión del Holón Recurso afectado un nuevo HR (o varios). Finalmente se tiene autosimilaridad, recursividad y escalabilidad, en la medida que se constituyen las diferentes holarquías basadas principalmente en Holones Recurso.

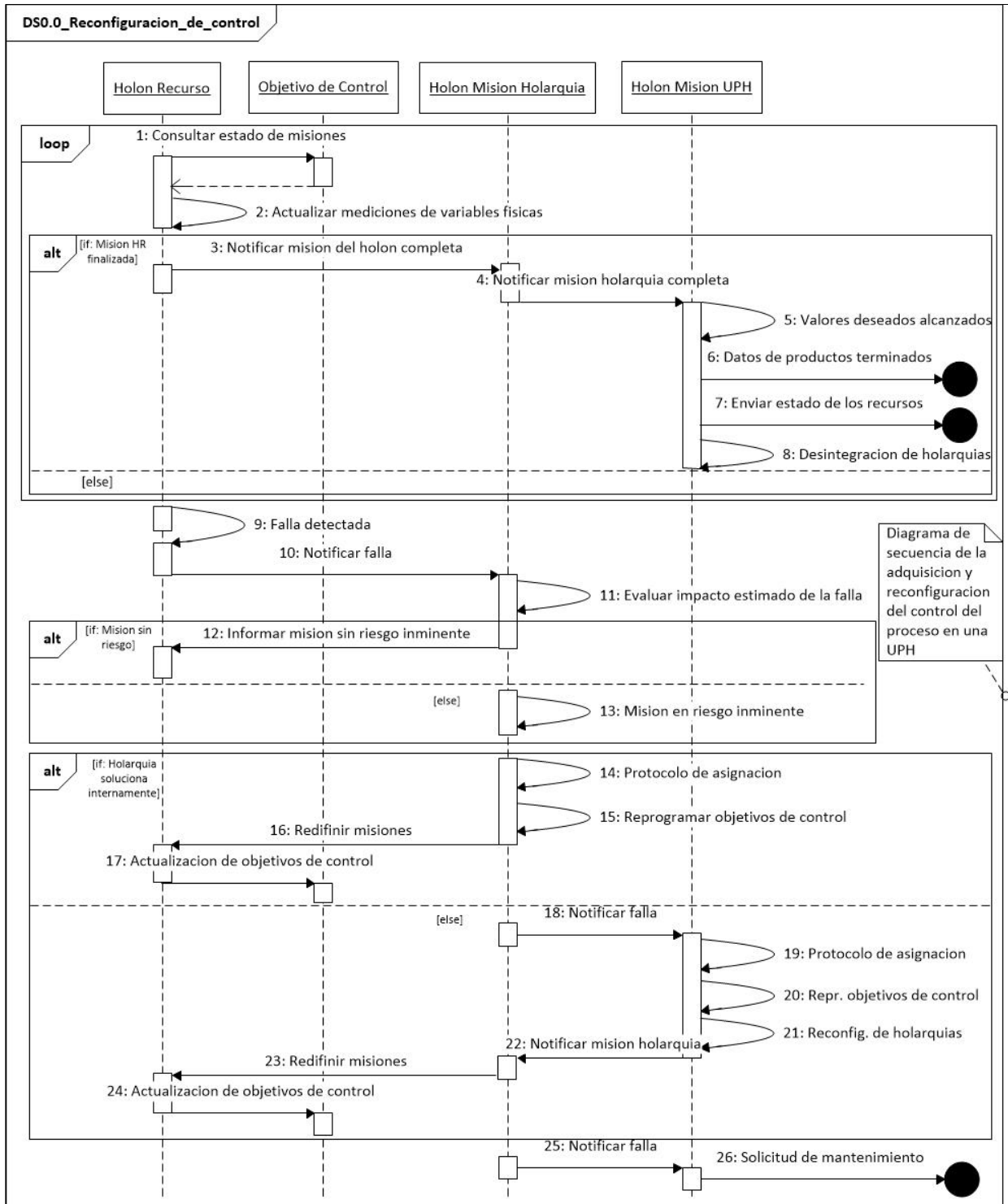
#### **4.2.4. Modelo Adquisición de Datos y Reconfiguración del Control del Proceso (A5)**

El Modelo *Adquisición de Datos y Reconfiguración del Control del Proceso* (A5), es la última actividad que se encarga de adquirir, reunir y procesar los datos del nivel de piso de planta (nivel 0). El objetivo principal que se le encarga a esta actividad es la de asegurar el cumplimiento de cada misión en las holarquías. Para ello, primero se hace necesario realizar la adquisición de datos. Posteriormente se le incluye a esta actividad, las acciones que se requieren para el monitoreo constante del estado de las misiones y sus respectivos avances (esto por cada HR).

Cada HR dentro de una holarquía es autónoma de ciertas decisiones, pero se le obliga informar su estado o avance de su misión designada. Se debe notificar a cada HM mediante el *Vector de Estados*, cualquier situación o inconveniente que se presente y que no se ha previsto en el cumplimiento de una misión.

Mediante el diagrama UML de secuencias de la Figura 4.12 se representa la dinámica del flujo de información de la presente actividad. En esta se hace énfasis en el manejo de fallas y la notificación de mantenimiento. Aquí un HR se desenvuelve dentro de un proceso constante, en donde se le monitorea su avance de misiones correspondiente, dentro de cronograma en la holarquía. Lo anterior, en búsqueda de que se prevenga y se reaccione ante futuras situaciones que alteren el normal desarrollo de las operaciones. Así, mediante esta actividad se le otorga atributos de reactividad y proactividad al sistema.

Cuando se ha terminado de manera exitosa las misiones que se acuerdan a cada HR de la holarquía, se notifica y se confirma al respectivo HM. Justamente, como cada holarquía se debe asociar a un ítem de la *Lista de Despacho*, cuando se cumple la misión de todas se entiende que se realizó el número total de productos requeridos de la lista. De la misma manera el holón HM se encarga de informar los *Datos de los Productos Terminados* por la UPH, en cada misión a un nivel superior (3). Esta actividad se encarga además de informar al MES, la *Solicitud de Mantenimiento* (cuando falla o fallará algún recurso) y el *Estado de los Recursos*.



**Figura 4.12.** Diagrama de secuencias en la actividad reconfiguración de la UPH.

Luego de que una misión se realiza con éxito, la holarquía que se conformó se disuelve. Los HR correspondientes actualizan sus Vectores de Estado y en estos se

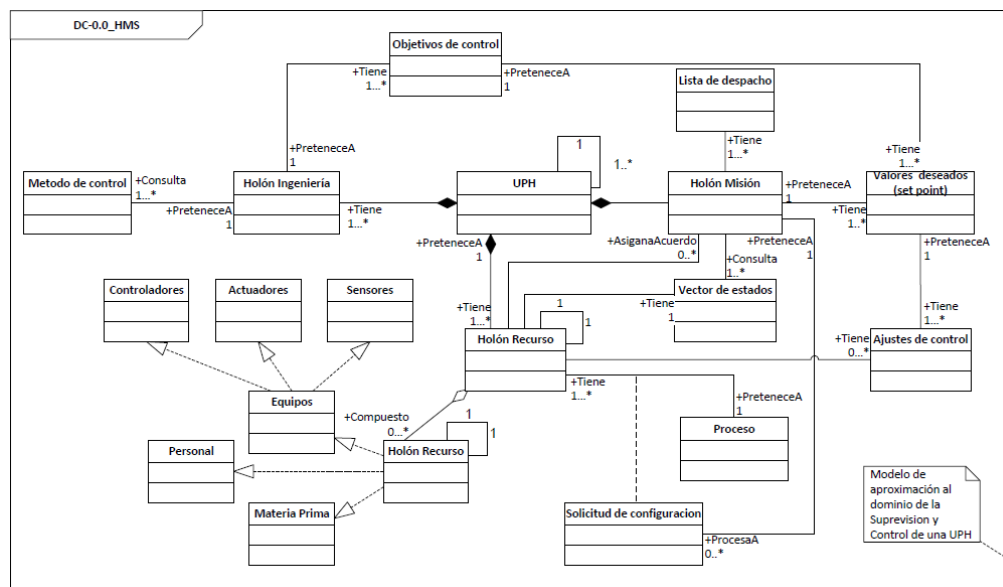


incluye, su nueva capacidad y disponibilidad. Prontamente como cada misión se completa, los HR's se disponen prestos para la recepción de nuevas misiones.

Dado el caso que exista una situación de falla en el avance de un HR, se genera un flujo de trabajo en relación a la corrección del mismo. Luego de que el HR que incurre en la falla notifica al HM, este genera una nueva asignación a un nuevo HR. Si la falla puede generar un incumplimiento en la misión, se puede crear una reconfiguración. La holarquía intenta que se solucione una falla internamente, de lo contrario se procederá a reprogramar acuerdos entre los HR que la compone.

Esta actividad se apoya en el protocolo de comunicación de la actividad de *Asignación de Acuerdos* (A3). Esto se hace efectivo si la holarquía no logra solucionar el inconveniente, de manera que se informa la falla al componente misión de la UPH. Inmediatamente de que se incurre en un evento inesperado, la UPH acude nuevamente a las diferentes opciones de la actividad de *Asignación de Acuerdos*. Esto se mantiene para cualquier HR del sistema. Así una vez se solucione el inconveniente, se actualizan los cronogramas y se configuran nuevamente las holarquías. Por último, se notifica al nivel superior la falla, con el fin de efectuar la respectiva función del mantenimiento en el equipo (al nivel MES).

Finalmente se concluye el detalle de las cuatro actividades (A2, A3, A4, y A5) del Sistema de Supervisión, Control y Reconfiguración de modelo hijo extendido (A0) de la UPH (Figura 4.5). Cuando se desarrollan cada una de estas actividades se evidencian otras tareas y características, que extienden los procedimientos a detalles más complejos. No obstante, a partir de la gráfica del diagrama de clases expuesto en la Figura 4.13, se hace un marco general de la relación de actores involucrados en el desarrollo de la Supervisión, Control y Reconfiguración de la UPH.



**Figura 4.13.** Diagrama de Clases UML para la Arquitectura de referencia.

El propósito final que tiene esta adaptación de la arquitectura UPH, es realizar el control, incluyendo algunas situaciones de supervisión del sistema, de manera conjunta y eficiente. Esto se soporta en la programación estructurada y distribuida en bajo nivel, el manejo interno de flujos de información, las diferentes interfaces, los modelos y demás conceptos basados desde el marco teórico de este documento (ver capítulo 2).

Es complejo representar la conducta dinámica de cada subfunción de la UPH dentro del proceso productivo. Por lo tanto, en la siguiente sección se busca analizar el comportamiento de cada UP, en la supervisión y el control global de la UPH. Así, en esta sección posterior se efectúa el respectivo modelado dinámico a partir de los parámetros anteriores, con el objetivo de visualizar en más detalle el comportamiento de la UPH. A continuación, se proponen una serie de Redes de Petri con sus respectivas características (Lugares, Transiciones, marcas, etc.), para complementar el método de Supervisión, Control y Reconfiguración en la UPH.

### **4.3. Comportamiento de la Supervisión, Control y Adquisición de Datos con Redes de Petri**

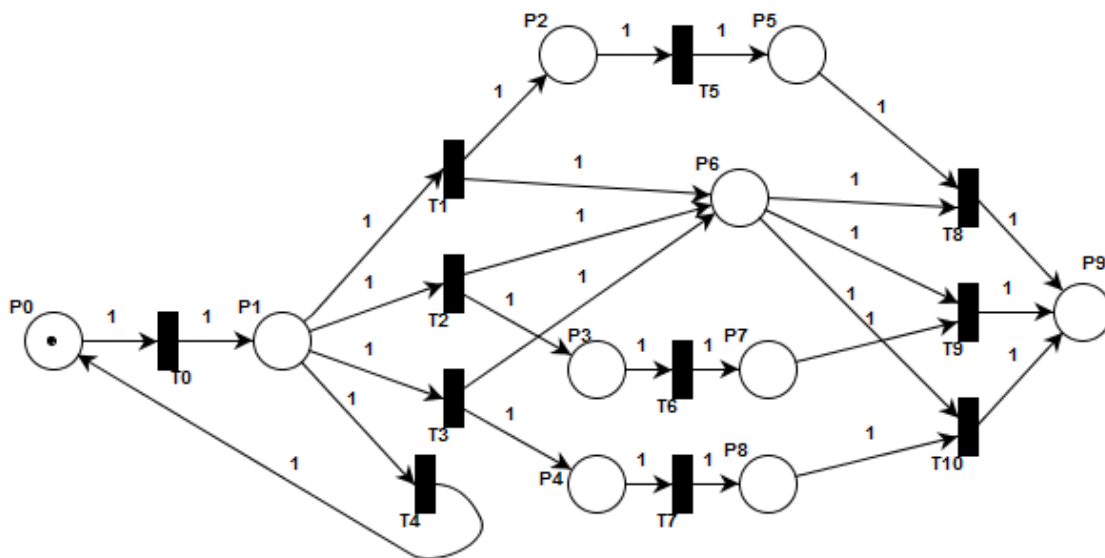
La arquitectura del sistema UPH se considera autónoma, pero con la capacidad de autoregularse. La dinámica de todo el sistema holónico se obtiene como resultado del comportamiento del sistema de *Supervisión, Control y Adquisición de Datos* de la UPH en sus composiciones. Es decir, como resultado de los cambios (interacción de los holones) dentro de las subfunciones del proceso. Este comportamiento se caracteriza porque es dinámico y se puede describir mediante SED.

De hecho, la dinámica de cada subfunción se puede modelar con una RdP, que depende de los eventos y las transiciones respectivas (ver sección 2.4.1). De manera general dentro de una UPH, se tiene un estado o lugar inicial que luego se ve afectado por la ejecución de un evento. Luego de que se dispara una *Transición*, el *Lugar* inicial de la UPH se modifica y pasa a otro estado. Para que cualquier transición pueda ser disparada se necesita cumplir con una serie de requerimientos, como por ejemplo la existencia de materia prima (o energía), métodos o acciones de control establecidos, disponibilidad de equipos, entre otras. Cada una de estas situaciones se representa por marcas, que también se denominan *tokens*.

Una situación común en una UPH es que no se presente la disponibilidad de un equipo, ya sea porque este falle o se encuentre ocupado en un proceso. El estado posterior ante la solicitud puede ser que el proceso se active, si está trabajando de manera adecuada (o que se ejecute). Otra opción es que el proceso se desactive (o finalice el proceso), porque se presentó una falla.

Otro estado habitual en la UPH para que se inactive, es la ausencia de los requerimientos de energía o materia prima. Un evento se puede llamar “Materia prima disponible”, de manera que se indique de forma general, que se puede abastecer determinada cantidad de material para elaborar un lote o un número de productos. En la ausencia y luego la presencia se hace un cambio automático para la reactivación del proceso, dada esa situación. Cuando un proceso se termina dentro de una UPH, este se puede considerar como estado inactivo puesto que se encuentra a la espera de iniciar un nuevo proceso.

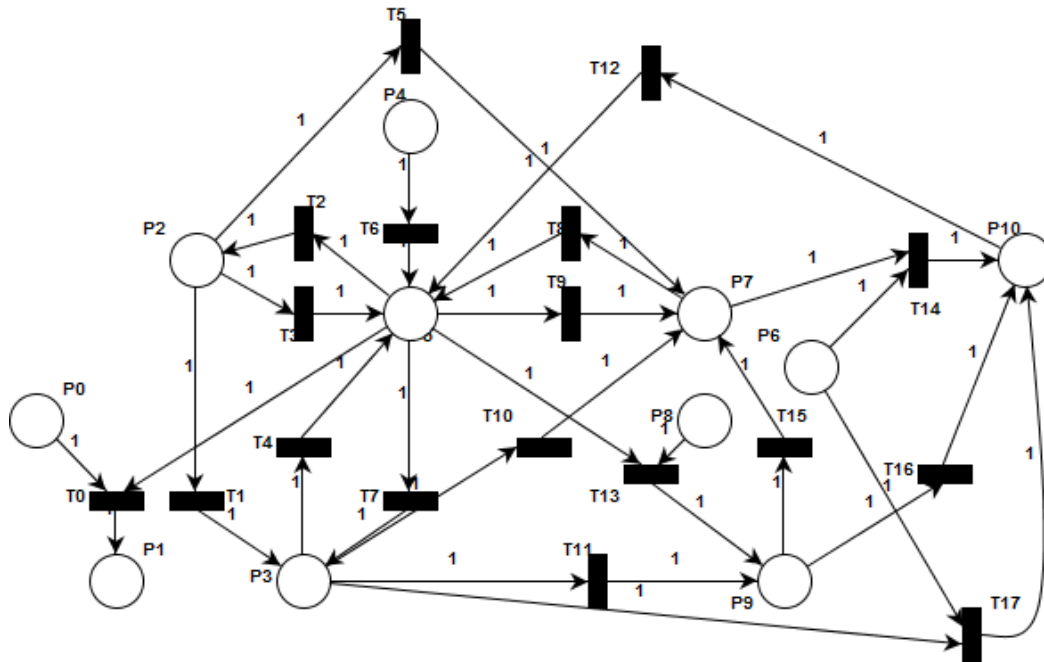
Para que el funcionamiento se verifique dentro el correcto funcionamiento, se necesita realizar una *Supervisión en la UPH*. Su principal tarea se centra en comprobar el desarrollo del proceso y realizar el seguimiento del mismo. La supervisión de la UPH tiene la propiedad de seguir los cambios de recursos y demás eventos que puedan ocurrir en el sistema. El seguimiento que realiza esta función en la UPH se representa de manera dinámica por la RdP de la Figura 4.14.



Lugar	Descripción	Trans.	Descripción
P0	Proceso en estado de espera	T0	Inicio del proceso
P1	Proceso en estado activo	T1	Existencia de falla en equipo
P2	Equipo en mantenimiento	T2	Inexistencia de materia prima
P3	Falta de materia prima	T3	Existencia de falla en el método de control
P4	Método de control ineficiente	T4	Fin del proceso
P5	Equipo recompuesto	T5	Recomposición del equipo
P6	Proceso en estado Inactivo	T6	Suministro de nuevo materia prima
P7	Materia prima disponible	T7	Ajuste de método de control
P8	Método de control eficiente	T8	Reactivación del proceso del equipo
P9	Acción de control acordada	T9	Reactivación del proceso de la materia prima
		T10	Reactivación del proceso de control

**Figura 4.14.** Red de Petri de la Supervisión en la UPH.

La *Asignación de Acuerdos* es una parte fundamental de la *Supervisión*, por lo que se requiere de entender su dinámica con una RdP independiente. Los compromisos que se adquieren por un Holón Recurso (acuerdos), se expresan en su agenda y se asigna por un Holón Misión. Un estado de la misión se obtiene a partir del contraste entre lo que se tiene en la agenda y el avance del objetivo (o meta) de la producción. La Figura 4.15 representa la RdP en donde se incluyen los múltiples estados en una misión o acuerdo.

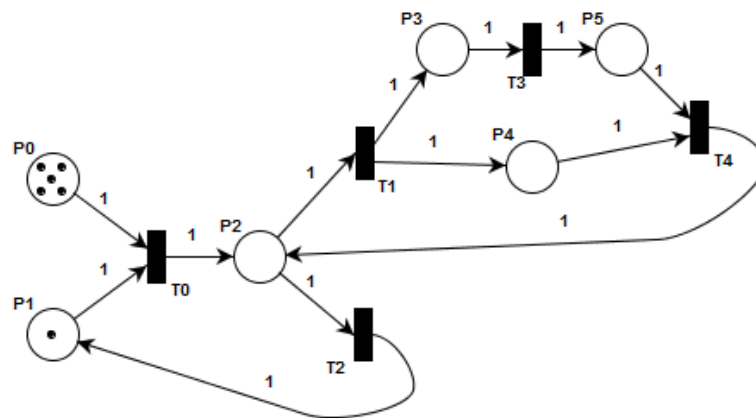


Lugar	Descripción	Trans.	Descripción
P0	Acuerdo sin terminar	T0	Acuerdo finalizado
P1	Acuerdo terminado	T1	Probable incumplimiento de acuerdo
P2	Acuerdo desviado	T2	Desvio de acuerdo
P3	Acuerdo en riesgo	T3	De acuerdo desviado a normal
P4	Acuerdo asignado	T4	Acuerdo en riesgo normal
P5	Acuerdo en avance normal	T5	Incumplimiento de acuerdo
P6	Reacuerdo en proceso	T6	Inicio de acuerdo
P7	Acuerdo incumplido	T7	Probable incumplimiento de acuerdo
P8	Acuerdo sin abortar	T8	De acuerdo incumplido a normal
P9	Acuerdo abortado	T9	Incumplimiento de acuerdo
P10	Misión recordada	T10	Incumplimiento de acuerdo
		T11	Abortar acuerdo
		T12	De reacuerdo a normal
		T13	Abortar acuerdo
		T14	Reacuerdo autorizado
		T15	Incumplimiento de acuerdo
		T16	Operación degradada
		T17	Reacuerdo autorizado

**Figura 4.15.** Red de Petri de la Asignación de Acuerdos en la UPH

Los diferentes estados de una misión se pueden denominar así: sin terminar, terminado, desviado, en riesgo, asignado, avance normal, en proceso, incumplido, sin abortar, abortado y recordado. Mediante un generador de eventos se pueden diferenciar la agenda de los diferentes HR por cada misión acordada. Adicionalmente se ingresa también en el Vector de Estado (ver sección 4.2.1), la capacidad actual del recurso, para que se establezca el evento o de probable falla que haya lugar.

Mediante la Figura 4.16, se ilustra la dinámica del *Control para la UPH*. Este depende del uso de recursos denominados controladores. Para que en el equipo se pueda activar el Control, se necesita que este se encuentre en un estado inactivo (disponible), y que además se presenten o existan métodos de control.

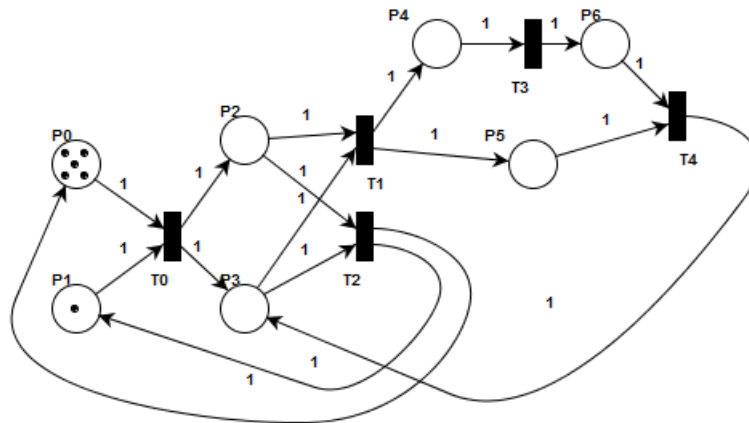


Lugar	Descripción	Trans.	Descripción
P0	Método de control existentes	T0	Inicio del proceso
P1	Proceso en estado de espera	T1	Existencia de falla en el método de control
P2	Proceso en estado activo	T2	Fin del proceso
P3	Método de control ineficiente	T3	Cambio al método de control
P4	Proceso en estado inactivo	T4	Reactivación del proceso
P5	Método de control eficiente		

**Figura 4.16.** Red de Petri del Control de Proceso en la UPH.

Dado el caso que se presente un lugar de *Proceso en estado activo*, se pueden derivar en cualquiera de los dos eventos siguientes. Primero que se genere la *Existencia de falla en el método de control* (o que sea ineficiente). Segundo, que se realice un cambio o ajuste en los diferentes parámetros para que el método de control sea el adecuado. Eso también puede ocurrir, cuando se detenga el proceso (de manera natural o forzada) o ante la presencia de una falla.

La RdP de la Figura 4.17 se refiere a la *Adquisición de Datos* del proceso mediante los diferentes recursos. Para ello se debe habilitar las condiciones de equipos en modo disponible. Esta red presenta estados similares a la RdP de control (ver Figura 4.16), porque estas RdP dependen de recursos.



Lugar	Descripción	Trans.	Descripción
P0	Equipo disponible	T0	Inicio del adquisición de variables
P1	Adquisición en estado de espera	T1	Existencia de falla en equipo
P2	Equipo no disponible	T2	Fin de la adquisición de variables
P3	Adquisición en estado activo	T3	Recomposición del equipo
P4	Equipo en mantenimiento	T4	Reactivación de la adquisición de variables
P5	Adquisición en estado Inactivo		
P6	Equipo recompuesto		

**Figura 4.17.** Red de Petri de la Adquisición de Datos en la UPH.

En la RdP de *Adquisición de Datos* se presentan dos casos, luego de que se active. En primera medida el proceso está activo y los equipos están en uso, lo que significa: equipos no disponibles. La segunda opción es cuando se presentan fallas, puesto que se desactiva. Si se logra solucionar cualquier falla presentada, se permite reactivar la adquisición de variables, al igual que en cualquier equipo de la UPH. Cada vez que se realice la adquisición de cualquier variable, esta se sigue realizando de manera cíclica o durante todo el tiempo necesario del proceso de la UPH.

## Capítulo 5

# Desarrollo, Resultados y Validación del Prototipo

Siguiendo la estructura de control y demás características que se estipularon en los capítulos anteriores, en el presente capítulo se desarrolla la aplicación de esta teoría mediante un caso de estudio simulado que se acerca estrechamente a la realidad. El enfoque del prototipo se realiza mediante el control de un sistema de manufactura de tipo discreto, simulado en 3D (tridimensional) por medio del software **Factory I/O**<sup>17</sup> en una PC convencional.

Para lo anterior, se selecciona un proceso industrial típico de tipo distribuido, que contiene partes virtuales como robots, bandas transportadoras y otras máquinas. Todos los equipos se traducen en el software 3D como interconexiones de sensores y actuadores (analógicos y digitales), que se manipulan en el PC mediante un controlador externo o PLC físico (real). El siguiente esquema muestra un ejemplo macro de la aplicación Factory I/O®, de la empresa Real Games® (ver Figura 5.1).



**Figura 5.1.** Descripción del aplicativo Factory I/O (<https://factoryio.com>).

La planta que se configura en el aplicativo de simulación 3D, permite realizar la implementación del control del sistema holónico, en donde se le incluye parte de la supervisión del proceso de manera embebida. El control del proceso de manufactura

<sup>17</sup>**Factory I/O**® de Real Games® es un software de simulación de fábricas en 3D para el desarrollo aplicaciones de automatización. Permite construir plantas virtuales utilizando una variada selección de piezas comunes en la industria y realizar el control mediante su interconexión a diferentes familias de PLC. Ver página web oficial de la compañía en: <https://realgames.co>

cuenta con un autómata programable PLC de gama media, con características suficientes para implementar los estándares IEC 61131 y IEC 61499.

## 5.1. Descripción y Características del Proceso de Manufactura

El proceso de fabricación se divide en dos subplantas que se componen por cuatro *Máquinas Centrales* (MC1, MC2, MC3 y MC4), dos *Máquinas Ensambladoras* (EM1 y EM2), dos *Switchs* o *Clasificadores* (SW1 y SW2) y varias *Bandas Transportadoras* (BT). Las primeras –las máquinas centrales– incluyen cuatro robots para la fabricación de piezas cuadradas (en forma de tapa o base), de dos colores respectivamente.

Las bandas transportadoras según su longitud, tienen la capacidad de transportar diferentes números de piezas, mientras que un switch solo se configura para transportar un único material. El switch es un clasificador de ruedas pop-up de 45°, que se diferencia de una banda transportadora, debido a que tiene la opción de conmutación de bandas, dependiendo del sentido que se le programe. De este modo, un switch se utiliza para desviar artículos a tres direcciones diferentes, a través de rodillos rodantes y giratorios (pivotados). La Figura 5.2 muestra los diferentes tipos de material que se procesan y los equipos que se ubican en la planta prototipo tridimensional.

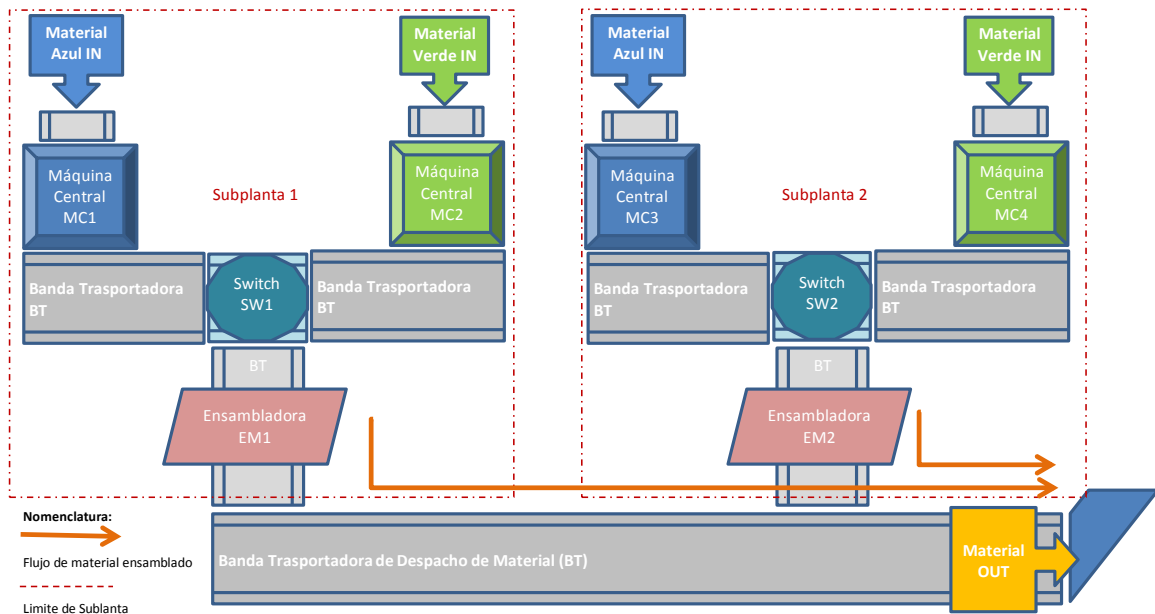


**Figura 5.2.** Clases de material y equipos en la planta prototipo.

Mediante las bandas Transportadoras y los Switchs, las tapas o bases se llevan desde la salida de las partes material en las máquinas centrales, hasta las ensambladoras. El proceso de cada pieza se finaliza al unir cada base con su respectiva tapa. Las máquinas centrales al igual que las ensambladoras, pueden



trabajar simultáneamente en dos piezas iguales o distintas. No obstante, cada MC o EM, sólo puede trabajar para generar una pieza a la vez y los robots de las MC, procesan un sólo color (verde o azul, nunca ambos). Existe una última banda transportadora que recopila todo el material procesado en la planta (piezas ensambladas), para ser despachadas al final de esta misma banda. En la Figura 5.3 se muestra de manera general la distribución de la planta prototipo.



**Figura 5.3.** Vista superior de distribución de la planta prototipo.

El material o materia prima llega a través de bandas transportadoras a las diferentes entradas de las máquinas centrales. Allí se procesa el material bruto y se convierte en una tapa o base, de color verde o azul, según sea el caso. Procesar el material se tarda un tiempo determinado y es de resaltar que una tapa dura más tiempo en fabricarse que una base (tapa: 6 segundos y base: 3 segundos).

En síntesis, el propósito de este sistema de manufactura flexible es producir cuatro tipos de productos diferentes, constituidos por bases y tapas (verdes o azules) que se ensamblan. Entre estas máquinas centrales y las ensambladoras se encuentran las *Bandas Transportadoras* y *Switchs* que se encargan de trasladar los materiales hacia los diferentes puntos de trabajo. La ejecución de manufactura se realiza a partir de un plan de proceso establecido (considerado desde el sistema MES), repartido en diferentes misiones en el control del sistema.

La Figura 5.4 hace una vista lateral de la planta prototipo implementada con el aplicativo de Factory I/O® (ver Figura 5.4). El **Anexo A** del presente trabajo, se muestran las especificaciones en detalle de cada parte utilizada en la planta 3D.



**Figura 5.4.** Vista lateral de la planta prototipo en Factory I/O®.

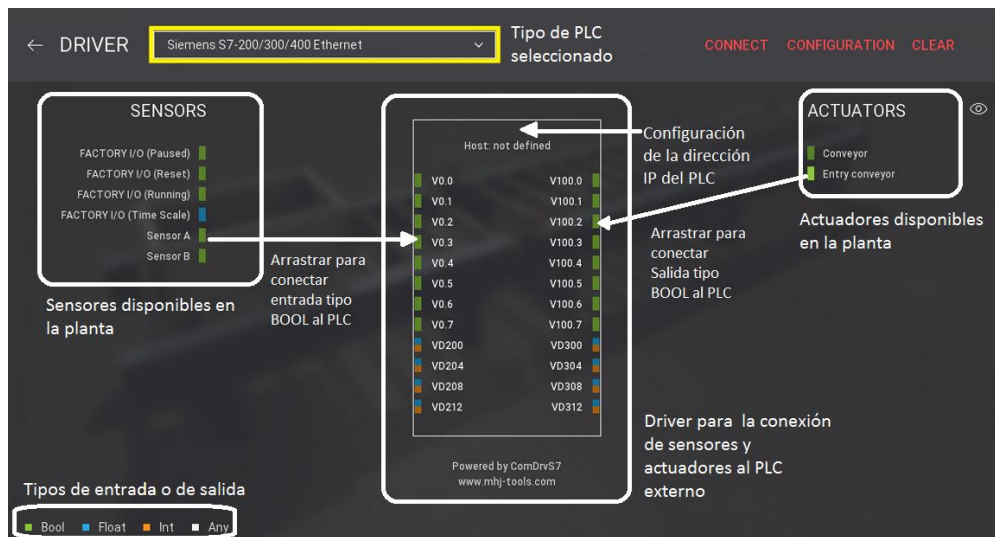
### 5.1.1. Lista de Equipos y Resumen de Variables de la Planta

Cada equipo o máquina asociada al sistema de manufactura se constituye por una serie de sensores y actuadores o I/O (analógicos y digitales), los cuales se integran dentro del aplicativo Factory I/O®. Las diversas señales de I/O en la planta virtual, se clasifican en diferentes tipos de datos, así: BOOL, INT, WORD o DWORD. Las características de cada tipo de dato se enlistan en la Tabla 5.1.

Tipos de Señal	Digitales		Analógicos	
	Tipo de Dato	Descripción	Tipo de Dato	Descripción
Sensor o Actuador	BOOL	Señales de tipo ON (1) - OFF (0) o falso y verdadero (On: true; OFF: false)	WORD	Valores <b>flotantes</b> van desde -10V y 10V y se linealizan entre 27648 y 27648. Valores <b>flotantes</b> que van desde 0 y 10V están linealizados entre 0 y 27648. Valores <b>enteros</b> se convierten en enteros de 16 bits.
			DWORD	Valores <b>flotantes</b> se codifican como números de <b>punto flotante</b> de 32 bits (REAL). Valores <b>enteros (INT)</b> se codifican como enteros de 32 bits.

**Tabla 5.1.** Tipos de datos en sensores y actuadores en Factory I/O®.

La conexión del autómatas y al aplicativo virtual, se hace a través de la red del PC y una dirección IP, manteniendo el mismo dominio. El tipo de PLC, al igual que las entradas de los sensores y actuadores a la planta, se conectan externamente al controlador mediante un *Driver*, así como se muestra en el ejemplo de la Figura 5.5.



**Figura 5.5.** Driver para conectar el PLC y sensores y actuadores en Factory I/O®.

La siguiente lista resume las variables en la planta (ver Tabla 5.2) y se enumeran las señales de sensores y actuadores que se incluyen en todo el sistema de manufactura. Adicionalmente, se agregan variables auxiliares que se utilizaron en el desarrollo del programa del PLC. El detalle de todas las variables se muestra en el **Anexo B** del presente documento.

Ítem	Máquina, Estación o Tipo de Contacto	TAGS	Tipos de Dirección	Cantidad por ítem	Digitales			Análogos			Total de variables del programa		
					# Sensores	# Subtotal Sens.	# Actuadores	# Sensores	# Subtotal Sensores	# Actuadores			
1	Máquina Central	MC, iMC, oMC	I, Q, IW, QW	4	4	16	6	24	2	8	1	4	247
2	Ensambladora	EM, iEM, oEM	I, Q, IW	2	9	18	9	18	2	4	0	0	
3	Switch	SW, iSW, oSW	Q, IW	2	0	0	10	20	2	4	0	0	
4	Banda Transportadora	BT, iBT, oBT	I, Q	7	2	14	2	14	0	0	0	0	
5	Pulsador en el PLC	iPLC	I	1	4	4	0	0	0	0	0	0	
6	Marca (Auxiliar)	-	M, MW	1	30	30	0	0	16	16	0	0	
7	Timer (Temporizador)	-	T	1	25	25	0	0	0	0	0	0	
8	Otras Variables		FB, DB, FC, OB	1	28	28	0	0	0	0	0	0	
Subtotal de variables del programa						135	27	76	22	32	1	4	

Tabla 5.2. Resumen de variables de entrada y salida de la planta.

## 5.2. Implementación del Modelo de Referencia a la Planta

La planta prototipo se considera una Unidad de Producción Holónica (UPH) y se asume que pertenece a un Complejo de Producción (CP), tal como se menciona en (Chacón R. & Rojas A. 2006) y el capítulo 4 (ver sección 4.1). Esta UPH se constituye por diferentes elementos que se consideran holones, como se evidencia la Figura 5.6.

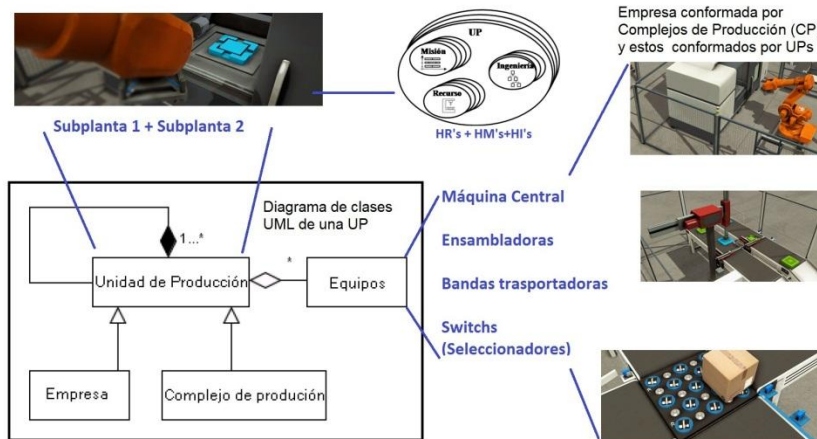


Figura 5.6. Arquitectura UPH de la planta prototipo.

### 5.2.1. Consideraciones sobre el Caso de Estudio Seleccionado

Para que se evidencien las características holónicas enunciadas a lo largo de este trabajo, se realizaron varios aplicativos para el control de manufactura de la planta. Sin embargo, para que se entienda más en detalle el trabajo que se realiza, primero se deben considerar algunas características de la planta, enlistadas a continuación:

- La planta tiene como finalidad producir cuatro tipos de piezas de forma cuadrada, con un peso de 12 kg cada una. Cada pieza se obtiene del ensamble de una tapa de 5 kg y una base de 7 kg. Tanto la tapa como la base se combinan entre dos colores diferentes (verde o azul).
- Las opciones de las cuatro piezas a producir en la planta se expresan como *Servicios*, así: **S1)** Tapa verde – base azul **S2)** Tapa azul – base verde **S3)** Tapa verde – base verde **S4)** Tapa azul – base azul.
- Una estación de mecanizado (Máquina central MC) sólo puede trabajar un color, pero se configura automáticamente para producir una tapa o una base, según sea el caso de la orden y la misión asignada.
- Existen dos plantas similares (subplantas o UPH's) que se establecen a partir de la exigencia del armado de las piezas. Esto es, que cada máquina central se encarga de hacer una base o una tapa, pero no de forma simultánea. De esta forma dos máquinas centrales (de diferentes colores), se interconectan mediante dos bandas transportadoras y un switch seleccionador (ver Figura 5.4). El fin de esta configuración de equipos es suministrar las debidas de tapas y bases para la correspondiente ensambladora (única por subplanta).
- Cada uno de los equipos de las subplantas (máquinas centrales, ensambladoras, bandas transportadoras y switchs seleccionadores) se consideran Holones Recurso o HR. Estos HR se constituyen por otros holones (HR, HM o HI). Por ejemplo, los holones recurso de una máquina central o MC son: un Robot, una banda transportadora de entrada, otra banda de salida y un Panel de control (con botones de control). Adicionalmente, una MC se asocia a una respectiva misión (HM) y a su ingeniería de requisitos (HI).
- Los valores de capacidad máxima de cada HR se encuentran configurados por defecto y de acuerdo a las características generales del aplicativo Factory I/O®. Por ejemplo, la velocidad máxima de una banda transportadora o BT es 0.6 m/s (en modo configuración digital).
- La velocidad máxima del sistema de producción, se da por la suma de las capacidades de las subplantas de la UPH (dos, en este caso). La capacidad máxima del sistema de producción se establece a partir de a disponibilidad de las máquinas centrales y las ensambladoras.
- Existe una interfaz hombre máquina o HMI (del inglés, *Human Machine Interface*) que permite la interacción de un operador con la planta. Esto se consigue a través de la emulación de un panel de control, integrado al software del controlador PLC.
- El panel HMI tiene varias opciones donde se evidencian, los recursos (HR) disponibles y su disponibilidad. A partir de una configuración inicial se establece las misiones HM y se envía los acuerdos a la UPH desde la HMI.
- La información de cada Holón Ingeniería (HI), se crean por defecto de acuerdo a las características de la naturaleza de la planta. Por ejemplo, para crear una tapa verde se necesita materia del mismo color, una máquina central y un tiempo de proceso promedio de 38 segundos (incluye transporte y mecanizado del material).

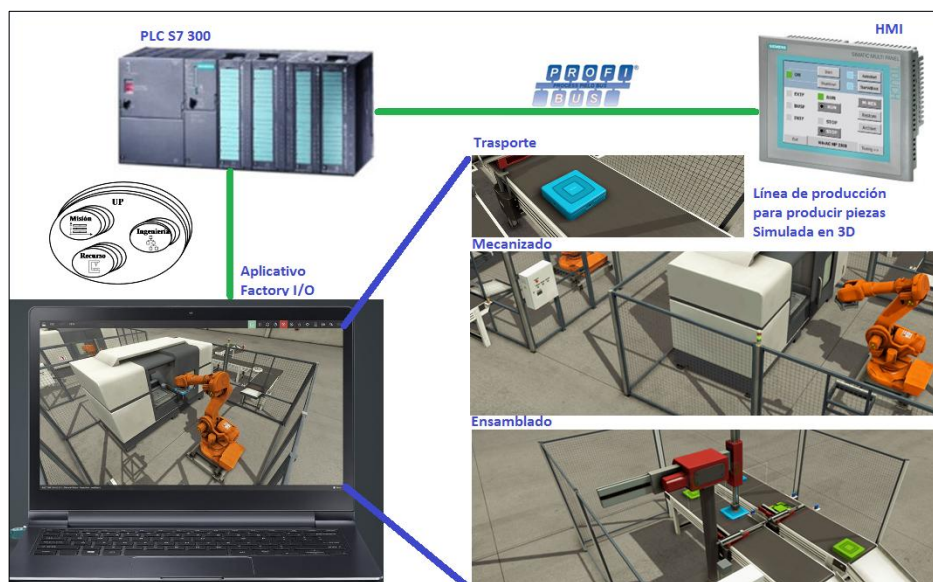
- El proceso se controla por un PLC de la marca Siemens® de gama media, serie S7-300. La programación del autómatas incluye un coordinador embebido que limita y organiza y el comportamiento de la UPH (ver sección 5.2.2).

Bajo las consideraciones anteriores se hace necesaria la aplicación de hardware (PLC) y se usan diferentes tipos de software. La tabla siguiente enlista los diferentes aplicativos que se utilizaron para determinar el desarrollo de los programas del presente trabajo (ver Tabla 5.3). Estos se detallan a lo largo de este capítulo.

Nombre del Software	Función	Tipo de Licencia	Información Oficial
<b>Factory I/O (ver. 2.1.0)</b>	Simular la planta del Caso de estudio	Comercial	<a href="https://factoryio.com">https://factoryio.com</a>
<b>PIPE 2.0</b>	Crear Redes de Petri de la planta prototipo	Libre	<a href="https://sites.google.com/site/supervisorpetri">https://sites.google.com/site/supervisorpetri</a>
<b>CRP</b>	Generar el supervisor y los códigos para PLC, a partir de las RdP del aplicativo CRP	Libre	<a href="http://pipe2.sourceforge.net">http://pipe2.sourceforge.net</a>
<b>Simatic Step 7 (ver. 5.5)</b>	Programar el código para el controlador PLC Siemens® (estándar IEC 61131)	Comercial	<a href="http://w3.siemens.com/mcmsg/simatic-controller-software/en/step7/step7-professional/Pages/Default.aspx">http://w3.siemens.com/mcmsg/simatic-controller-software/en/step7/step7-professional/Pages/Default.aspx</a>
<b>Simatic IMAP (ver. 3.0)</b>	Programar el código para el controlador PLC Siemens® (estándar IEC 61499)	Comercial	<a href="https://support.industry.siemens.com/cs/pd/478480?pdtdi=td&amp;dl=es&amp;lc=en-WW">https://support.industry.siemens.com/cs/pd/478480?pdtdi=td&amp;dl=es&amp;lc=en-WW</a>
<b>WinCC Flexible 2008</b>	Desarrollar el aplicativo para la interfaz hombre máquina (HMI) Siemens®	Comercial	<a href="https://support.industry.siemens.com/cs/pd/539470?prod=33927&amp;pdtdi=pi&amp;lc=en-WW">https://support.industry.siemens.com/cs/pd/539470?prod=33927&amp;pdtdi=pi&amp;lc=en-WW</a>

**Tabla 5.3.** Software usado para el desarrollo de sistema de control holónico.

El aspecto global del sistema, se constituye por los elementos de la Figura 5.7. En las siguientes secciones se establece la relación de la planta y la arquitectura estructural desarrollada. También, se realiza un modelado dinámico basado en RdP y la generación del código para un autómatas programable PLC.



**Figura 5.7.** Apariencia de los elementos del sistema implementado.

### 5.2.2. Aplicación del Modelado Estructural de la Planta

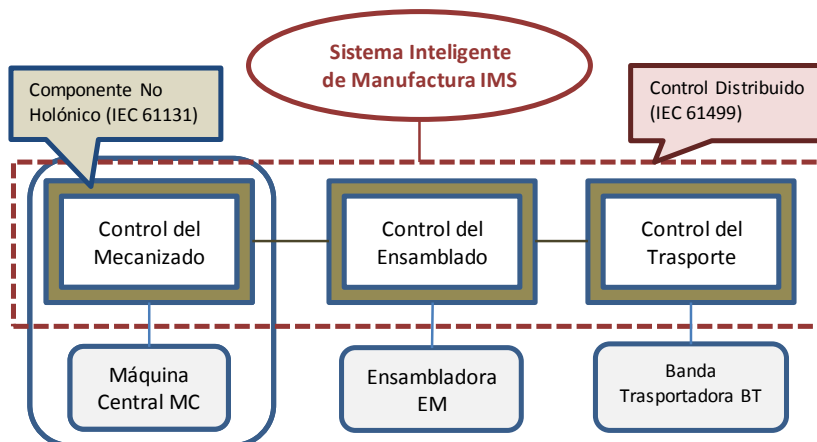
El modelado se obtiene con el propósito de cumplir los requisitos para HMS expuestos en (Giret B. 2005; Höpf 1994), extendidos en el marco teórico de este trabajo (ver Tabla 4.1, sección 4.2). Dentro la estructura general, se hace necesario la creación de un Coordinador UPH para el manejo de cada UP (las subplantas del sistema).

En la arquitectura seleccionada (ver sección 4.1), varios holones de inteligencia simple pueden agruparse dentro de un hólón de inteligencia compleja, formando una unidad de fabricación (o UP). En esta situación se desenvuelve el hólón de coordinación para supervisar el desarrollo de actividades específicas a otros holones. El coordinador UPH asegura el manejo de las perturbaciones del sistema, como lo pueden ser, el fallo de un equipo o la ocurrencia de órdenes precipitadas.

El Coordinador UPH representa un hólón especial de inteligencia simple, para ayudar a la ejecución de una tarea y el cumplimiento de las misiones. Se incluye dentro de la programación del PLC y se asigna un acceso parcial a este mediante un dispositivo HMI (o Panel táctil externo). Así, un humano puede considerarse un componente físico del hólón al que pertenece.

Las entidades no holónicas (sin inteligencia), se pueden representar en sistemas de fabricación a través de dispositivos de automatización, junto con su aplicación de control. Un hólón de inteligencia simple puede encapsular uno o más de tales dispositivos, mediante un componente de software inteligente y se forma un sistema de fabricación inteligente (Vlad et al. 2010).

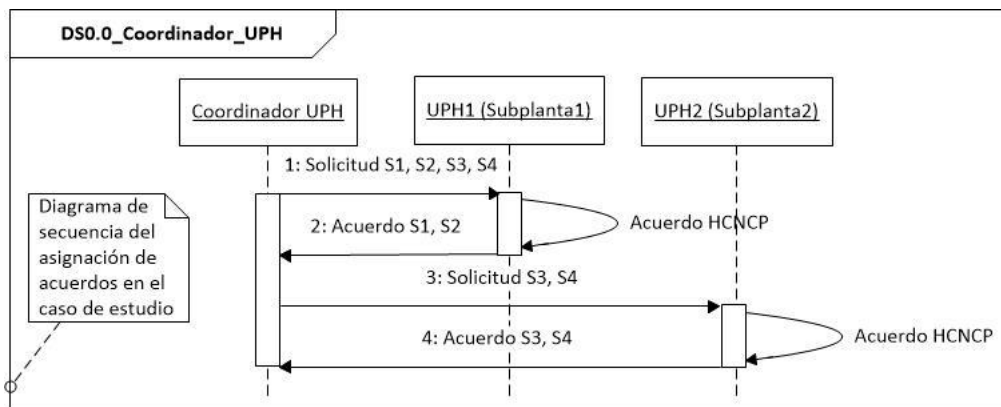
Como ejemplo de tal tipo de hólón, es la estación de mecanizado, formada por el robot articulado y un conjunto de dispositivos de transporte, que colaboran bajo la dirección de un componente de software inteligente. El sistema de inteligente de manufactura se forma además por los otros componentes, como son la ensambladora y las bandas transportadoras, tal como se muestra la Figura 5.8.



**Figura 5.8.** Hólón de inteligencia de componentes no holónicos.

Durante la exploración de la disponibilidad y ejecución de manufactura en cada una de las subplantas, el Coordinador UPH se encarga de identificar el conjunto de sus recursos y los servicios que cada HR está en capacidad de proporcionar. Sobre la disponibilidad que se obtiene, se asigna el acuerdo con su debida confirmación para cada subplanta, siguiendo en protocolo HCNCNP (ver sección 4.2.2).

En la Figura 5.9 se muestra un marco general de como se hace la solicitud y el acuerdo de las misiones dentro de la UPH, basado en (Gamboa Q. et al. 2016). Por ejemplo, en la misión HM1 Coordinador UPH envía una solicitud a HR1 (subplanta 1), para la misión con servicios S1 a S4 (diferentes cantidades los tipos de partes). UPH1 analiza su disponibilidad y responde con una propuesta alternativa para el producir S1 y S2, y UPH2 para S3 y S4, que se adaptan mejor a los objetivos de cada subplanta.



**Figura 5.9.** Dinámica global del Coordinador de la UPH.

La idea detrás de esta estrategia es reducir el número de nodos de exploración que se logra encapsulando el proceso de ramificación en una sola misión. Así, para un conjunto de  $n$  servicios independientes en una solicitud compuesta (o HM), el número de nodos de exploración se reduce a un factor de  $(n! - 1)$ , como se muestra en (Gamboa Q. et al. 2016). Se intentan programar más servicios como sea posible en un mismo recurso, en equidad con la disponibilidad de toda la UPH.

La reconfiguración de la UPH se da por la toma de decisiones desde el Coordinador UPH. No obstante, cada subplanta tiene la capacidad de autonomía, dado el caso que necesite realizar modificaciones en su proceso (para alcanzar cada HM acordada). La sección 5.3 y 5.4 muestra cómo estos modelos se programan dentro de las especificaciones de las normas IEC 61131 e IEC 61499.

En el modelo A0 hijo de referencia, que se detalló previamente (ver Figura 4.3, sección 4.2), se observan las actividades involucradas en el control y supervisión del proceso. Esto implica que el prototipo que se valida en el presente capítulo, se desenvuelve en los niveles 0, 1 y 2 de ISA 95 (ver Figura 4.3, sección 4.2), tal como lo detalla la relación de aplicativos en la Figura 5.10.



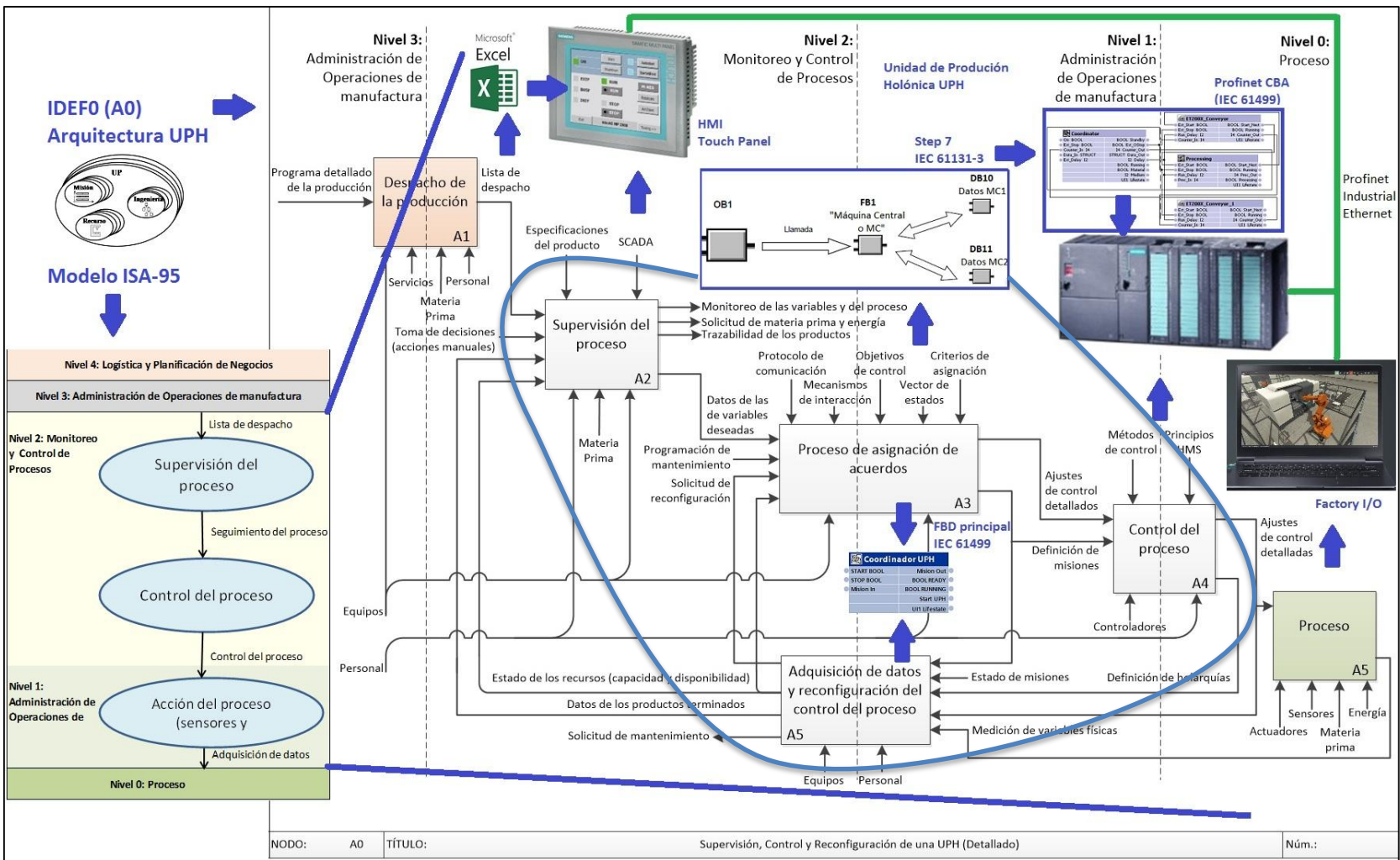
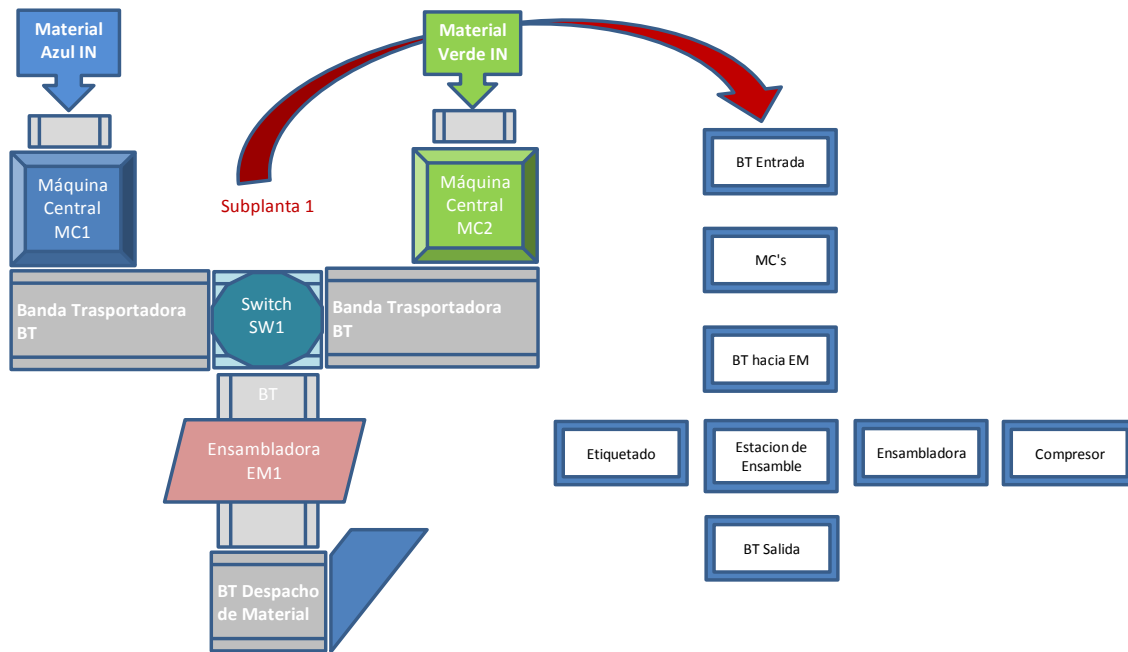


Figura 5.10. Aplicación de Modelo de referencia A0 al caso de estudio.

### 5.2.3. Características Dinámicas de la Planta mediante RdP

Para que se realice el modelo de la planta mediante RdP, se determinan los estados y las transiciones a partir del análisis de cada subplanta. Además, para cada subplanta se consideran unas macroetapas que ayudan a reducir los subprocesos dentro del sistema, como se muestra en la Figura 5.11. Para este modelo se omite la acción de selección que se realiza mediante el switch seleccionador, puesto que se considera una subsunción de una BT o banda transportadora que lo sucede.



**Figura 5.11.** Macroetapas de cada Subplanta para el modelado en RdP.

El modelado se continúa tomando como ejemplo la Subplanta 1, el cual se puede replicar para la Subplanta 2. La materia prima llega a las máquinas centrales (MC1 y MC2), mediante bandas transportadoras de entrada. En cada MC es procesada una base o tapa, que luego son llevadas por otra BT y un Switch (omitido en el modelado) hasta la ensambladora EM1. Allí se ensambla una sola pieza a partir de una tapa y base, que se logra gracias a EM1.

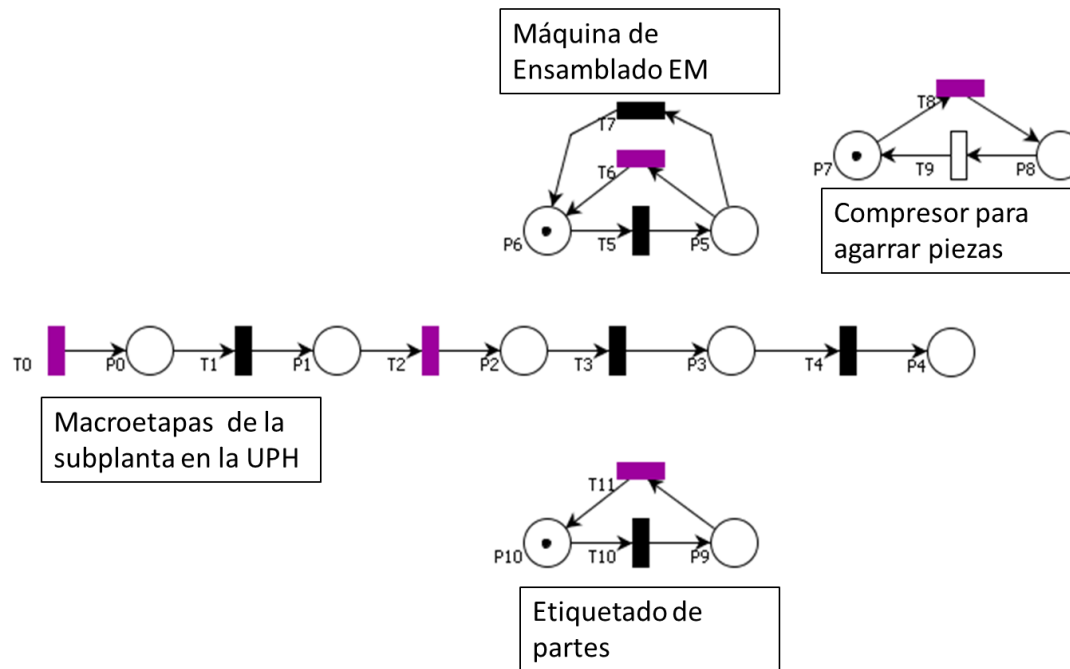
Paralelo al ensamblado de EM1, se incluye un etiquetado y el uso de un compresor para agarrar las piezas. El etiquetado y el uso de aire comprimido, son subprocesos comunes y necesarios en la manufactura de este tipo de piezas. No obstante, ambas acciones solo se aparentan (no se ven en la planta prototipo 3D). Finalmente, se lleva una pieza final ensamblada hacia una BT de despacho de material.

De acuerdo a lo anterior y teniendo en cuenta que todas las máquinas se encuentran en estado disponible (MC's, EM, y BT's), las restricciones que se determinan son las siguientes:

1. C0 representa la condición que la máquina central MC1 o MC2 solo puede trabajar con una pieza a la vez. Esto se expresa como  $\mu_1 \leq 1$ .
2. C1 es que la BT de espera a la estación de ensamble, aloja máxima tres piezas (para tapas y bases). Se interpreta como  $\mu_2 \leq 3$ .
3. C2 establece que la estación de ensamble solo puede fundar o trabajar una pieza. Implica que  $\mu_3 \leq 1$ .
4. C3 es para las etiquetas de marcado, que se colocan solo cuando hay una base y tapa, así  $-\mu_3 + q_5 + q_{10} \leq 0$ . Además, antes de ensamblar se han de colocar las etiquetas, que se traduce como  $v_5 - v_{11} \leq 0$ .
5. C4 tiene que ver en caso de falla del compresor. Este se debe apagar junto con la máquina de ensamblado EM1, esto es  $-\mu_8 + q_7 \leq 0$ . Adicional a esto, se debe esperar a que se reinicie tanto el compresor como la ensambladora, de la siguiente manera  $-\mu_7 + q_5 \leq 0$ .
6. C5 por supuesto, refleja que se debe retirar cada pieza ensamblada después de terminado su proceso (ensamble y etiquetado). Esto es que, al colocar etiquetas se debe aventajar por un disparo al retirar una pieza, que se representa como  $v_{10} - v_4 \leq 1$ ; y debe haberse terminado de ensamblar y etiquetar para que se esté habilitado el sacar la pieza, así  $2v_4 - v_6 - v_{11} \leq 0$ .

La Red de Petri del modelo que representa una de las subplantas, dentro del proceso seleccionado en este trabajo, se expresa en la Figura 5.12. Allí se establecen los estados y las diferentes transiciones anteriormente descritas. Se debe tener en cuenta que las transiciones no controladas de la planta se resaltan de un color diferente.

El logro de las especificaciones que se requieren, se obtienen a partir de formalismos y métodos en SED y el diseño de un supervisor, de acuerdo a lo que se expone en el marco teórico del presente trabajo (ver sección 2.4). El supervisor es quien busca mantener la trayectoria deseada del sistema, a partir de la generación de eventos controlables. En efecto para ello se aplica software computacional de código libre, mediante el uso de PIPE 2.0 y CRP (viene de Control de Redes de Petri), expuestos en (Buchely & Ruiz C. 2012; Calvo G. & Collazos A. 2015) de la Tabla 5.3.

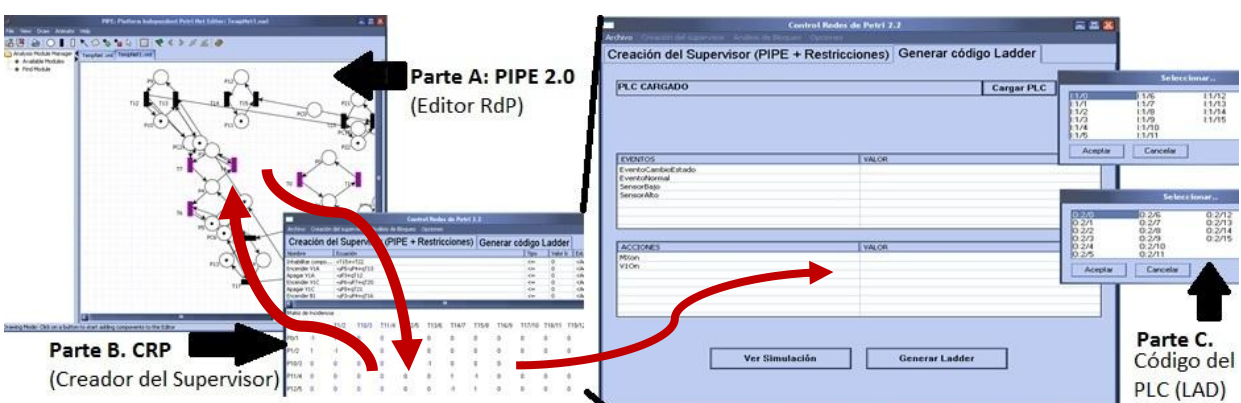


Lugar	Descripción	Trans.	Descripción
P0	BT de entrada de partes	T0	Entrada de materia prima. No se puede evitar recibir materia prima (No controlable)
P1	Máquinas de Mecanizado (MC1 y MC2)	T1	Paso de materia prima del BT de entrada al MC
P2	BT de transporte para Ensambladora	T2	MC's terminan de procesar una base y una tapa y se pasan a una BT. Una vez empieza no es posible detener la MC (No controlable)
P3	Estación de ensamble	T3	Una Base y una Tapa pasan a la estación de ensamble
P4	BT de salida partes ensambladas	T4	Una pieza es ensamblada y pasa a la BT de salida
P5	Ensambladora operando	T5	Ensambladora (EM) pasa a operar
P6	Máquina ensambladora (EM) en stand by	T6	EM termina una pieza y se resetea (stand by)
P7	El compresor está apagado y contiene suficiente aire	T7	La EM se resetea de forma forzosa en cualquier parte del proceso de ensamble
P8	Se colocan etiquetas a la parte ensamblada (Simulado)	T8	El compresor se quedó sin aire y pasa a un estado encendido para recargar. No es posible anticipar este suceso (No controlable)
P9	El etiquetado está inactivo	T9	El compresor se ha recargado o restaurado después de un tiempo estipulado
P10	Es sistema está inactivo	T10	El sistema de etiquetado pasa a estado activo
		T11	El etiquetado pasa a apagado. Una vez activo no es posible detener el etiquetado (No controlable)

**Figura 5.12.** Red de Petri para cada subplanta del caso de estudio.

A continuación se resumen los procedimientos que se realizan de acuerdo a lo expuesto en (Buchely & Ruiz C. 2012), para desarrollar y aplicar un supervisor de la UPH como parte inicial del código en el PLC:

1. Primero, el modelo RdP de la subplanta obtenido se ingresa al aplicativo PIPE, que se usa para el análisis y simulación de RdP. Luego de obtener el disparo aleatorio de las transiciones en PIPE, se establece el supervisor con CRP. Se pueden indicar los diferentes bloqueos parciales de la red. Un fragmento del panel frontal del aplicativo PIPE se aprecia en la Figura 5.13 (ver Figura 5.13, parte A).
2. Luego del modelado del RdP del sistema a controlar, se realiza el diseño de un supervisor. Aquí se verifican las propiedades del sistema supervisado mediante la herramienta CRP, tal como se evidencia en la Figura 5.13 (ver Figura 5.13, parte B).
3. En esta etapa preliminar, se incluye la generación del código para el controlador en lenguaje SCL, o escalera (Ladder) de acuerdo a IEC 61131-3. Esto se obtiene a partir de los requerimientos de la RdP en PIPE y el supervisor CRP, como se aprecia en la Figura 5.13 (ver Figura 5.13, parte C).



**Figura 5.13.** Pasos para crear un supervisor en PLC.

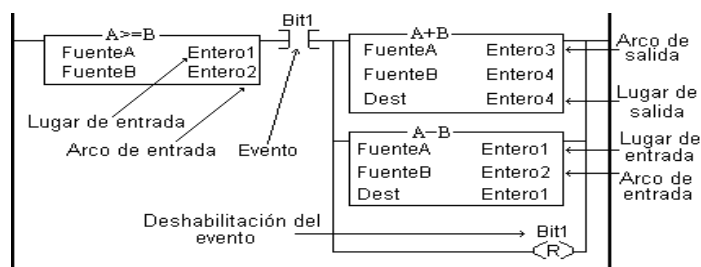
El supervisor que se obtiene con CRP, se integra a PIPE. En el diseño del supervisor, se usa el método de restricciones de tipo lineales vectoriales generales o LGVC expuesta en (Gaviria et al. 2015). Dado el caso de obtener restricciones no admisibles, aquí se recurre a los métodos para obtener restricciones admisibles desde las originales como se expone en (Moody & Antsaklis 2000; Murillo 2008).

Estas herramientas, tanto CRP como PIPE, permiten implementar el desarrollo y el análisis complejo de RdP, en entornos más amigables y confiables. Además, en el diseño de SED, se hace necesario tener en cuenta las diferentes situaciones de bloqueo. Por lo cual la integración de PIPE y CRP lo solventa, puesto que se encargan de evitar que los sifones pierdan sus marcas previniendo el bloqueo.

Para el caso de las restricciones, como se aluden el capítulo 2 (ver sección 2.4.2), estas se definen como un GMEC. Para cada subplanta, los GMEC se pueden

implementar mediante el uso de un monitor, a través del aplicativo CRP. Un monitor es un conjunto de lugares que se conectan a transiciones mediante arcos.

Finalmente, para el desarrollo del supervisor en el PLC, se usa la traducción de la RdP a código Ladder (ver figura 5.14), mediante el método *Token Passing Logic* (Gaviria et al. 2015; Murillo 2008; Cataño B. 2007), implantado en CRP. En (Buchely & Ruiz C. 2012) se hicieron algunas modificaciones a este a los aplicativos, con el propósito de que se hicieran factibles casos prácticos como el del presente objeto de estudio. Sin embargo, estas líneas de código se deben transcribir, puesto que son especializadas para otra familia de PLC, diferente a la seleccionada en este trabajo.



**Figura 5.14.** Traducción en Ladder de una RdP.

En las siguientes secciones se traducen los códigos hacia la herramienta del autómata implementado (Siemens S7® 300). No obstante, por su dilatación no se incluye todo el programa para el control de la UPH. La extensión de esta parte del código y los complementos adicionales de todo el programa del PLC, se ven en las siguientes secciones y en los **Anexos B y C** del presente documento.

### 5.3. Desarrollo del Código para el Controlador y el SCADA

Una de las primeras empresas líderes en la industria que permite la creación de sistemas automatizados, con diferentes herramientas de hardware y software, es Siemens®. En el caso del hardware, los PLC de esta compañía alemana se pueden clasificar de manera general, según su número de entradas y salidas (I/O), capacidad de memoria, velocidad de procesamiento, entre otras consideraciones. Se consiguen enlistar diferentes modelos de estos PLC, de acuerdo a su categoría (o gama), así:

- **Gama Baja:** menos de 256 I/O. Ejemplo S7 200 (descontinuado) o S7 1200.
- **Gama Media:** entre 256 y 1024 I/O. Ejemplo S7 300 o S7 1500.
- **Gama Alta:** más de 1024 I/O. Ejemplo S7 400.

En cuanto al software, los PLC serie S7 XXX se crearon originalmente para que se programaran de acuerdo a la norma IEC 61131 (por ejemplo, con el software

Simatic Step 7). No obstante, la empresa Siemens® se amplió con una herramienta de programación que se denomina Simatic iMap, con el que se implementa Profinet CBA (del inglés *Component Based Automation*), el cual se basa en los principios de la IEC 61499. Por consiguiente, es posible que se puedan utilizar PLC S7 para diseñar sistemas distribuidos, basados en los estándares IEC 61131 e IEC 611499 (mediante Profinet CBA).

Aunque con Profinet CBA no se logran implementar todas las características de IEC 61499, se mantiene la filosofía básica de comunicación y percepción de los dispositivos individuales como FB, que se hacen útiles para la comunicación e interacción de Holones (ver sección 2.7.2). También permite exportar en formato XML (ver sección 2.7.4), con la posibilidad de representar datos en un formato independiente de la plataforma y del fabricante (concepto de portabilidad).

Se debe tener en cuenta, que de acuerdo a las consideraciones de Siemens®, Profinet CBA no se pensó para la mayoría de PLC S7. Profinet CBA se desarrolló para la familia de la gama media y alta, específicamente S7 300 y S7 400. Por lo tanto, para el desarrollo de este proyecto se seleccionó un PLC Siemens® S7 300. Las características del PLC implementado cuenta con las siguientes especificaciones técnicas:

- CPU de referencia 6ES7315-2FH13-0-0AB0<sup>18</sup> con versión de firmware V.2.6. y memoria de trabajo de 256kb. Tiene comunicación Profinet IO-Controller y cuenta con una interfaz Profinet (1 puerto). Está habilitada para Profinet CBA y Profinet CBA-Proxy. Cuenta con protocolos de transporte TCP/IP y conexión MPI/DP combinada (MPI o maestro DP o esclavo DP). Se puede configurar en varias filas de hasta 32 módulos I/O. Proporciona un sistema de módulos I/O compactos para montaje en riel tipo DIN o panel. Se puede programar con el software de programación Simatic Step 7, en todas sus versiones.

En la siguiente figura se da muestra de la apariencia del PLC implementado en el presente proyecto (ver Figura 5.15).



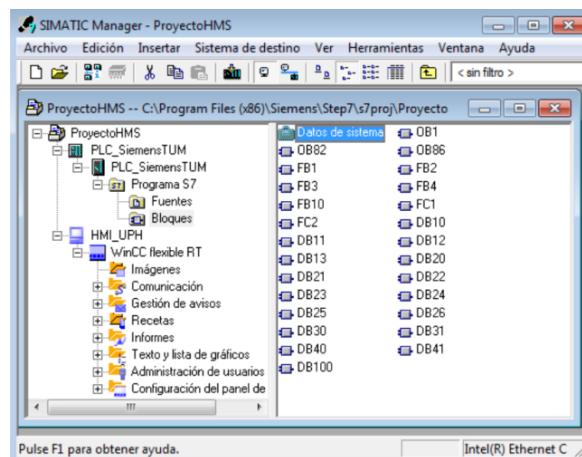
**Figura 5.15.** Apariencia física de un PLC Siemens de la familia S7 300.

<sup>18</sup> Catálogo de productos Siemens 2016. Ver web oficial de la información técnica del producto en: [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/149/36305149/att\\_1849/v1/s7300\\_cpu\\_31xc\\_and\\_cpu\\_31x\\_manual\\_es-ES\\_es-ES.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/149/36305149/att_1849/v1/s7300_cpu_31xc_and_cpu_31x_manual_es-ES_es-ES.pdf)

### 5.3.1. Programación Aplicando el Estándar IEC 61131

El primer paso se da a partir de una creación física del sistema de control, que consiste en crear una estación individual (configurar el PLC) y su red de comunicación. Primero, la estación debe ser compilada a partir de los módulos requeridos para los I/O (sensores y actuadores de la planta). Segundo, se revisa la correctamente interconexión de estas entradas que se simulan en el driver expuesto de la Figura 5.5 (ver sección 5.2).

Si es necesario, se puede incluir los otros dispositivos durante la creación de la red de comunicación, tales como otros PLC o la interfaz HMI. Luego, se sigue la configuración del proyecto de software, en particular con la herramienta de programación Simatic Step 7. La Figura 5.16 da muestra del proyecto que se realizó con el aplicativo de Siemens®, que tiene como propósito principal la programación de controladores de gama media y alta, de acuerdo al estándar IEC 61131-3.



**Figura 5.16.** Aplicativo Simatic Step 7 en la vista de árbol.

De manera general, se puede llevar a cabo un sistema distribuido, al crear un proyecto de software mediante las siguientes etapas generales basado en (Bezák 2012), así:

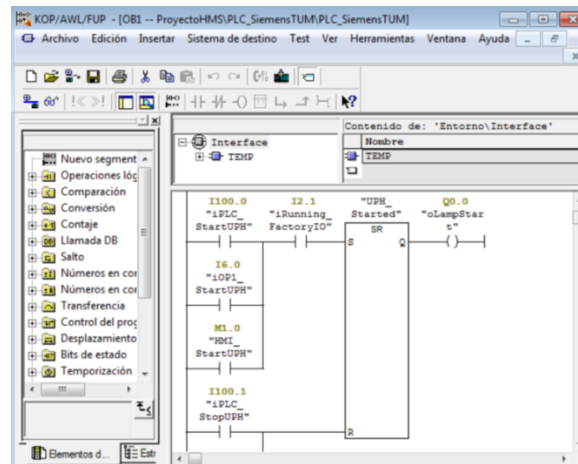
- Insertar todas las estaciones (PLC) en la herramienta de programación.
- Configurar el hardware de todas las estaciones y todos sus módulos (I/O).
- Configurar la red con todas las estaciones (se debe incluir Profinet CBA).
- Crear los bloques del programa de control (OB, FB, DB, FC, etc.).
- Generar el código correspondiente en cada bloque del programa.
- Revisar todos los eventos que pueden ocurrir de manera independiente.
- Realizar la creación del propio sistema de control de manera integrada.

Dentro del desarrollo de estas etapas, se incluye la realización parcial del código para el PLC, que se genera desde aplicativo PIPE. Este proviene a su vez de



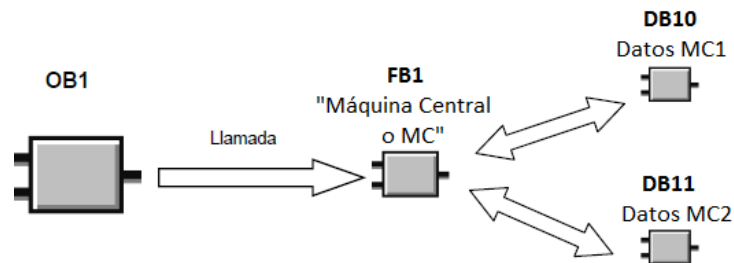
los diferentes modelos con Rdp, dados en el anterior aparte (ver sección 5.4). Los lenguajes que se usan en esta parte del código del programa, son en su mayoría KOP o Ladder o LAD) y FUP (Diagrama de Bloques de Función o FBD). KOP y FUB son provenientes de la tercera parte del estándar IEC 61131, en la versión europea EN 61131<sup>19</sup>.

La estructura de control que se sigue en el programa, tiene en cuenta la creación de funciones básicas (es decir que se pueden replicar), mediante programación basada en Bloques de Función (FB) y Bloque de Datos (DB). Esto permite que se haga fácilmente reconfigurable y reusable, cada uno de las líneas control (en los FB), de las diferentes partes que son semejantes (repetidas) de la planta prototipo. En la Figura 5.17, se muestra una parte del código (en Ladder y en Diagramas de Bloque de Función), dentro del bloque principal del programa, denominado OB1 (ver Figura 5.17).



**Figura 5.17.** Código en Ladder y Diagrama de Bloques de Función en OB1.

La programación que se realiza en un FB no se aplica si este FB no se llama por el bloque principal denominado OB1. Así, cada vez que se llama un FB se puede utilizar un DB distinto, obteniendo de esta forma la información de diferentes estaciones de trabajo (máquinas o dispositivos), como se muestra en la Figura 5.18.



**Figura 5.18.** Programación reusable basada en FB y DB.

<sup>19</sup>La norma europea EN 61131 se basa en la norma internacional IEC 61131, salvo algunas definiciones de términos y siglas.

De forma resumida en esta parte del programa del PLC, se tienen los siguientes bloques principales dentro del aplicativo Simatic Step 7:

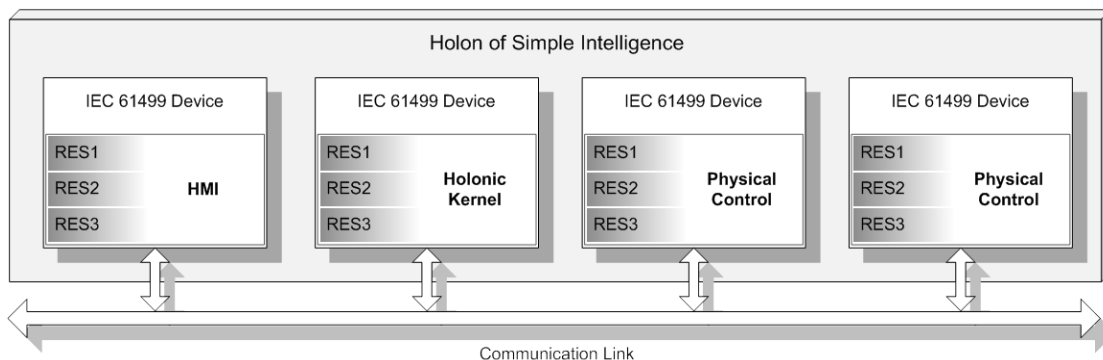
- Un bloque de ejecución del programa principal (OB1), en el que se incluye el llamado de todos los FB y sus correspondientes DB.
- Un FB para el código de las Máquinas Centrales (FB1).
- Un FB para el código de las Bandas Transportadoras (FB2).
- Un FB para el código de las Ensambladoras (FB3).
- Un FB para el código de los Switch (FB4).
- Un FB para el código del Coordinador de la UPH (FB10).
- Un DB por cada Máquina Central de la planta (DB10, DB11, DB12 y DB13)
- Un DB por cada Banda Transportadora de la planta (DB20, DB21, DB22, DB23, DB24, DB25 y DB26).
- Un DB por cada Ensambladora de la planta (DB30, DB31).
- Un DB por cada Switch de la planta (DB40, DB41).
- Un DB para los datos del Coordinador de la UPH (DB100).
- Un FC para los procesos de acuerdo en los diferentes holones del sistema.

La extensión de esta parte del código en Simatic Step 7 (de acuerdo al estándar IEC 61131), se muestra en el **Anexo B**.

### 5.3.2. Programación Aplicando el Estándar IEC 61499

En esta sección, se propone una solución que represente los modelos holónicos presentados previamente, utilizando los conceptos de aplicación y subaplicación definidos en IEC 61499. Esta forma abstracta de representación se aplica en los dispositivos y recursos que forman el sistema de control con IEC 61131.

En este trabajo se considera que un holón de inteligencia simple se puede modelar (dependiendo de la situación), por uno o más dispositivos con IEC 61499. Tal como se ostenta en (Vlad et al. 2010) y se ilustra en la Figura 5.19.



**Figura 5.19.** Holón inteligente simple mediante IEC 61499 (Vlad et al. 2010).

Como se menciona en el inicio del presente capítulo, se hace uso de la programación basada en el estándar IEC 61499 mediante Profinet CBA de Siemens®. En primera instancia, se debe entender que Profinet es un estándar abierto para la automatización basado en *Industrial Ethernet*. Mientras que con Profinet CBA, sólo se describen las tecnologías para la implementación de sistemas distribuidos y modulares con base en componentes predefinidos.

El objetivo de Profinet como el de Profinet CBA, se pone en práctica sobre las soluciones de gestión distribuida, mediante el uso de la comunicación unificada en la red Ethernet y las redes industriales (usando los estándares abiertos). Para el caso de los sistemas de control distribuido y de acuerdo con la norma IEC 61499-1 (arquitectura del estándar), se tiene una estructura jerárquica y no se basan en componentes (Bezák 2012). Similar a IEC 61499, en Profinet CBA los términos básicos que se presentan son: "Sistema", "Dispositivo", "Recursos", "Aplicación" y el "Bloque de Función o FB", tal como se expuso en la sección 2.7.4.

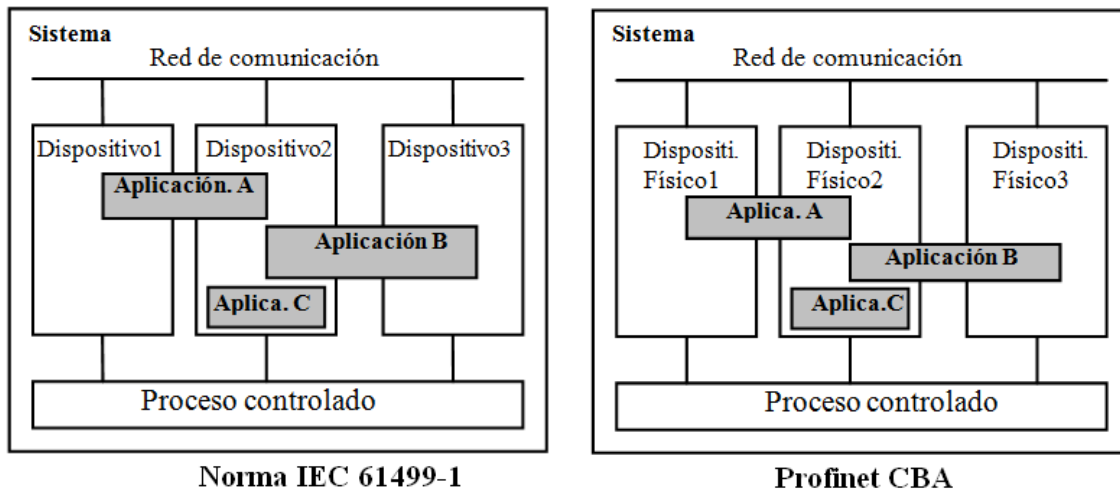
La especificación de Profinet CBA se encuentra en línea con los modelos de la *Arquitectura* de la norma, descritos en IEC 61449-1 y como se expone en (Pigan & Metter 2015). Los términos de esta primera parte de la norma, se pueden relacionar a continuación (ver Tabla 5.4):

IEC 61499-1	Profinet CBA
Sistema	Sistema
Dispositivo	Dispositivo físico
Recurso	Dispositivo lógico
Bloque de Función	Objeto de automatización / Función
Aplicación	Aplicación
Conexión	Interconexión

**Tabla 5.4.** Términos de IEC 61499-1 y Profinet CBA.

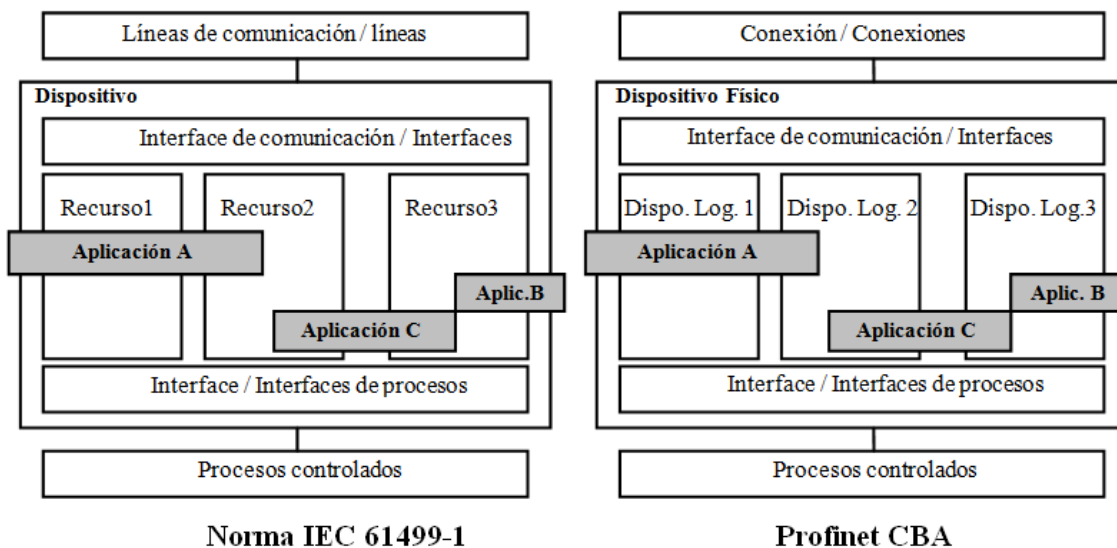
Los modelos que se han distinguidos de la norma original para el desarrollo de la presente tesis, se exponen en la sección 2.7.4, y se pueden asimilar con Profinet CBA de la siguiente manera (Bezák 2012; Pigan & Metter 2015):

**Modelos de Sistema:** a este modelo en IEC 61499 se le considera el nivel superior en la jerarquía de la arquitectura. Profinet CBA se asemeja porque se compone de dispositivos físicos que están interconectados a través de la red de comunicación. Los procesos se controlan por varias aplicaciones, que se encuentran en un solo dispositivo (Aplicación C), o se dividen entre varios dispositivos (Aplicación A y B), tal como se realiza la comparación en la siguiente figura (ver Figura 5.20).



**Figura 5.20.** Modelo del Sistema IEC 61499 y Profinet CBA (Pigan & Metter 2015)

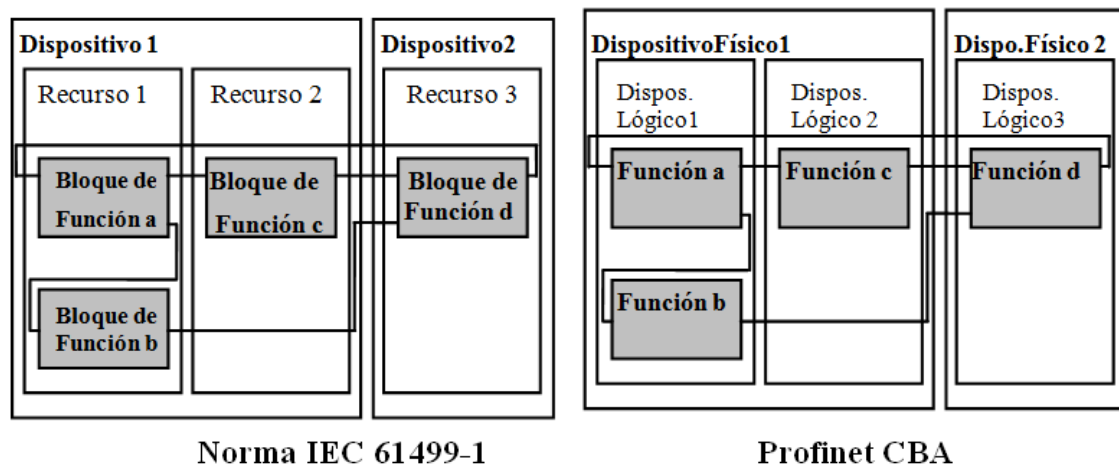
**Modelo de Dispositivo:** en IEC 61499-1 y Profinet CBA se expresa como un término general para varios tipos de dispositivos, empezando con el PLC, las computadoras personales, hasta los robustos dispositivos programados (ej. CNC), o dispositivos de bus de campo inteligentes con firmware específico. Todos ellos se presentan con una interfaz de proceso y una de comunicación. Los dispositivos consisten en recursos individuales o múltiples, como se contrasta en la siguiente figura (ver Figura 5.21):



**Figura 5.21.** Modelo dispositivo IEC 61449 y Profinet CBA (Pigan & Metter 2015).

**Modelo de Recurso:** al igual que IEC 61499-1, en Profinet CBA se llevan a cabo aplicaciones locales, también conocidas como Bloques de Función (FB). Junto con los Bloques de Datos (DB), se representa la reusabilidad de software necesario para el

funcionamiento del equipo. Este software incluye firmware, así como el programa de control, que se puede programar libremente. Los FB son compatibles con otros FB a través de la conexión de intercambio de datos. Los interlocutores de la comunicación pueden estar en el mismo dispositivo, o se encuentran en otros dispositivos en la red de comunicación, como lo demuestra la siguiente figura (ver Figura 5.22).



**Figura 5.22.** Modelo de recurso IEC 61499 y Profinet CBA (Pigan & Metter 2015).

En resumen, conforme a IEC 61499-1, en Profinet CBA los FB son los elementos básicos de la arquitectura. Estos se componen de interfaces para la recepción y transmisión de datos, así como datos internos y algoritmos ejecutables que se hacen invisibles desde el exterior. Las funciones tecnológicas de Profinet CBA., también se basan en la aplicación orientada de bloques de función de Servicio de interfaz (SIFB), descritos en la norma IEC 61499-1 (ver sección 2.7.3).

Los FB tienen una estructura fija, o también se pueden programar libremente. Como resultado estos dispositivos se pueden crear: i) Funciones fijas (por ejemplo, dispositivos de buses de campo, variadores de velocidad, sensores), o ii) Funciones programables y funciones grabables (por ejemplo, PLC, una computadora personal).

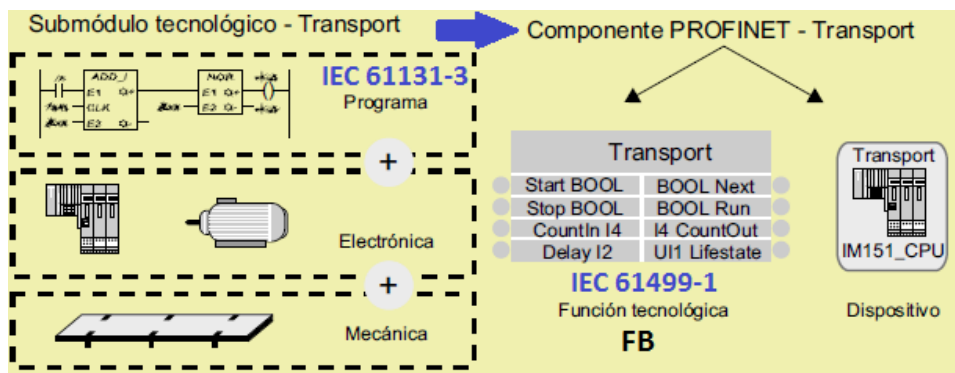
Para obtener un proyecto que cumpla con estas características acorde a IEC 61499, se pueden seguir los siguientes pasos, basado en (Bezák 2012):

- Haber desarrollado el código en IEC 61131 de los FB con sus DB (Step 7).
- Establecer la estación en la herramienta de programación (Ej. Simatic Imap).
- Configurar el hardware de todas las estaciones y sus módulos.
- Crear los bloques de función de IEC 61499.
- Compilar el programa de control.
- Configurar la interconexión de FB de forma individual.

- Configurar y probar la red de comunicación entre FB.

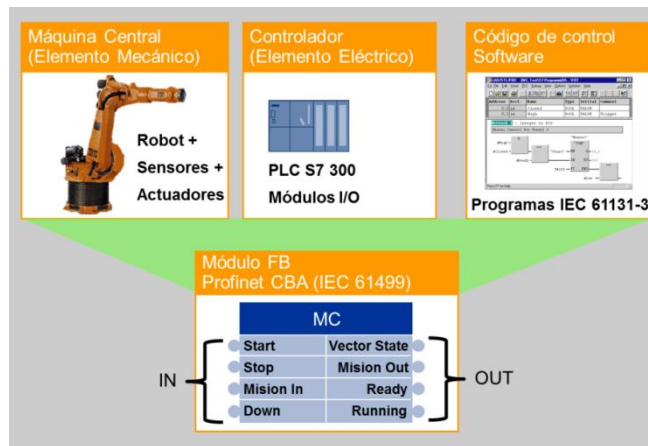
Los primeros pasos al crear el sistema en Simatic Imap (Profinet CBA), se forman a partir del sistema en IEC 61131 (ver sección 5.5.1). El proyecto se continúa desarrollando luego de que se crean algoritmos con FB y se rediseñan utilizando Simatic Imap. Se debe agregar que también se hace necesario la configuración de hardware desde la herramienta de Profinet CBA.

La figura 5.23 muestra un ejemplo de las partes que tiene una aplicación dentro de un FB de Profinet CBA. Un FB se crea mediante código que implementan el estándar IEC 61131 y IEC 61499.



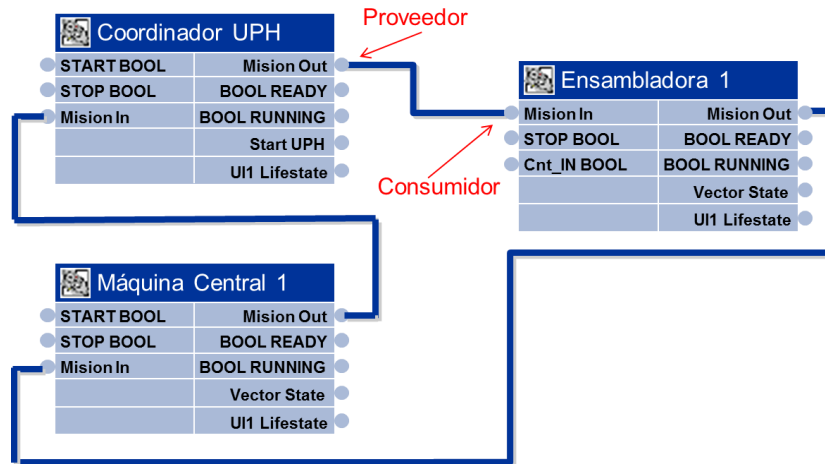
**Figura 5.23.** Ejemplo de un FB con Profinet CBA.

En la conectividad del sistema, a diferencia de la conexión NetPro en Simatic Step 7, Simatic Imap funciona de forma diferente. El primer paso es crear FB de Profinet CBA y DB particulares compartidos. Para algunos componentes, estructurados como holones de la UPH (ejemplo las máquinas centrales de la Figura 5.24), se creó un bloque de función Profinet CBA asociado a un bloque de datos DB compartido.



**Figura 5.24.** FB de la máquina central de acuerdo con Profinet CBA.

Cada FB en Profinet CBA se compone de sus respectivas variables de entradas y variables de salida (BOOL, INT, ARRAY, etc.). Los FB tienen la capacidad de que se conecten en forma de cadena, y se genera una red de FB mediante su intercomunicación (de proveedor a consumidor), tal como se muestra en la Figura 5.25.

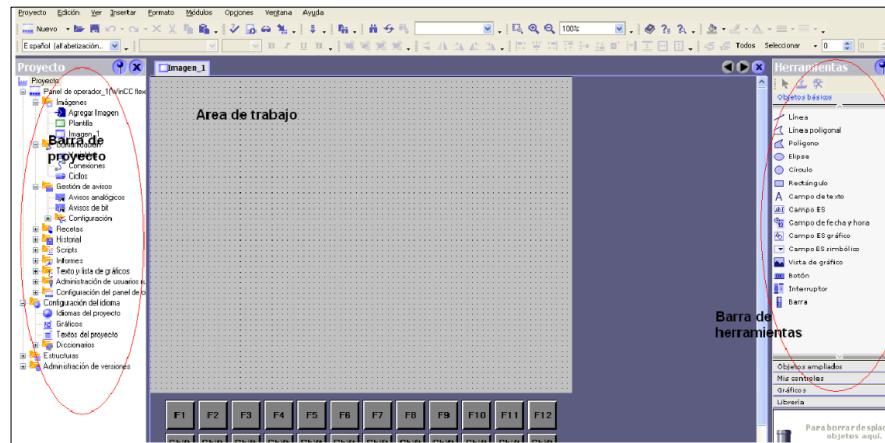


**Figura 5.25.** Intercomunicación de FB en Simatic Imap para una red Profinet CBA.

La extensión de este aparte del código en Simatic Imap (de acuerdo al estándar IEC 61499), se muestra por completo en el **Anexo C**.

### 5.3.3. Creación del SCADA mediante la Interfaz Hombre Máquina

Para el desarrollo de la aplicación SCADA se usa WinCC Flexible 2008 (ver Figura 5.26). Este software también es una utilidad de Siemens®, con el que se programa gran variedad de productos de la misma y de diferentes marcas. Para la Interfaz Hombre - Máquina o HMI se selecciona un pantalla táctil TP de 7 pulgadas (emulada).



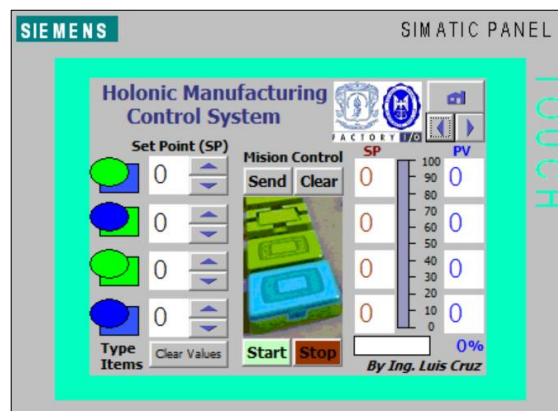
**Figura 5.26.** Ventana principal del editor WinCC flexible 2008.

Un proyecto en una TP o HMI se considera como ventanas (o imágenes) de procesos que se configuran de acuerdo al número de aplicativos que se deseen controlar. Así se tiene acceso al proceso de planta de forma visual y/o alfanumérica.

El SCADA que se implementa en este trabajo se basa en un sencillo software visual aplicado a una pantalla táctil. Se fundamenta en un sistema de supervisión tradicional y holónico (ver sección 2.5.2). Se le denomina comúnmente como *Supervisor* y desde este se cuenta con las siguientes particularidades generales:

- **Personificar el control de la UPH:** el proceso de manufactura se representa en la TP. Por ejemplo, cuando se modifica un estado en el proceso (set point o SP, variable del proceso o PV, estado del recurso, etc.), este se actualiza en la visualización mediante datos numéricos o gráficas.
- **Controlar la UPH:** un operario puede tener acceso de manera remota al modificar datos de una misión (órdenes), mediante la interfaz habilitada para ello. Por ejemplo, el operador puede determinar un valor numérico para la producción de un servicio (parte) o iniciar una máquina central.
- **Generar avisos o alarmas:** es posible que se produzcan estados de proceso críticos como fallas, los cuales se alertan automáticamente mediante un aviso grafico o alfanumérico emitido. Por ejemplo, si se sobrepasa un valor límite especificado o si una misión se encuentra en riesgo.
- **Almacenar información del proceso:** con el HMI se pueden guardar valores de proceso para la documentación o trazabilidad de una orden efectuada. También es posible que se acceda a anteriores datos de producción.
- **Gestionar especificaciones de recursos:** Se tiene algún acceso para modificar valores en los HR o por ejemplo para deshabilitar una subplanta. La TP permite modificar parámetros de máquinas en caso de mantenimiento.

En la Figura 5.27 se ve un pantallazo de la imagen principal del Supervisor, implementado en la TP de Siemens® (ver Figura 5.27). El proyecto del HMI se encuentra embebido con la programación del autómatas, en Step 7 (ver Figura 5.16).



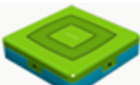



**Figura 5.27.** Imagen principal del HMI para el SCADA de la UPH.



## 5.4. Pruebas y Resultados del Caso de Estudio Implementado

### 5.4.1. Datos Obtenidos en la Emulación del Proceso

Una vez que se realizaron los pasos previos y se ajustaron los aplicativos de software al caso de estudio descrito, se genera en una de las subplantas la creación de una orden de producción individual por cada parte. De allí se obtuvo que en la Unidad de Producción Holónica desarrollada, se puedan producir los diferentes tipos de servicios en tiempos diferentes, tal como se enlista la información en la Tabla 5.5 (datos en segundos).

Ítem	Apariencia	Descripción	Tiempo de la Tapa			Tiempo de la Base			Tiempo de Ensamble	Tiempo de la Pieza
			Mecanizado	Trasporte	Tiempo Muerto	Mecanizado	Trasporte	Tiempo Muerto		
S1		Tapa verde – base azul	38	12	2	35	17	0	5	57
S2		Tapa azul – base verde	38	20	0	35	15	8	5	63
S3		Tapa verde – base verde	38	12	38	35	15	38	5	93
S4		Tapa azul – base azul	38	20	33	35	17	39	5	96
Tiempos Promedio			38	16	18	35	16	21	5	77

**Tabla 5.5.** Datos en segundos de las partes producidas por una UPH.

La programación producida que se obtiene en la UPH y que se expone en la Tabla 5.5, cuenta con la siguiente información relevante, para aclarar los tiempos de producción:

- **Tiempo de la Base o Tiempo de la tapa:** es el tiempo que se toma una base o una tapa en fabricarse y luego trasportarse hasta la estación de ensamble. Se determina por la ecuación 5.1, así (ver ecuación 5.1):

$$T_{base} \text{ ó } T_{tapa} (s) = T_{mecanizado} + T_{trasporte} + T_{muerto} \quad (5.1)$$

- **Tiempo de Mecanizado:** es el tiempo que se toma la fabricación de una base o tapa en la máquina central o MC. Este tiempo incluye el ingreso y egreso del

material en la MC a través del robot articulado y las bandas transportadoras que lo conforman.

- **Tiempo de Transporte:** hace referencia al tiempo que toma una parte (base o tapa) en llegar desde la salida de la MC hasta la ensambladora EM. Los recorridos son diferentes para cada parte e incluye el tiempo de proceso de selección a través del switch (seleccionador).
- **Tiempo Muerto:** es el tiempo que se considera de espera antes de ensamblar una pieza. Se obtiene de la siguiente ecuación 5.2 (ver ecuación 5.2):

$$T_{muerto} (s) = T_{total\ de\ la\ pieza} - (T_{mecanizado} + T_{transporte} + T_{ensamble}) \quad (5.2)$$

- **Tiempo de Ensamble:** es el tiempo que se toma la estación de ensamble EM para armar una pieza, luego de que llega una base y una tapa. Incluye el enganche de la base y la tapa, el agarre del brazo, etiquetado (simulado) y los movimientos del brazo.
- **Tiempo Total de la Pieza:** es el tiempo total que gasta una pieza desde la entrada de materia prima a las MC hasta su final, a la salida de EM. Se calcula mediante la ecuación 5.3, así (ver ecuación 5.3):

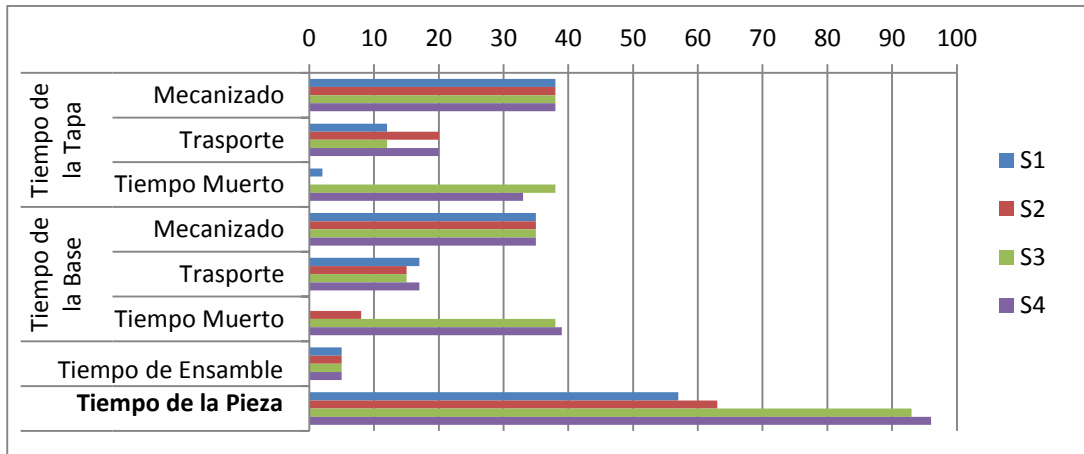
$$T_{total\ de\ la\ pieza} (s) = T_{mecanizado} + T_{transporte} + T_{muerto} + T_{ensamble} \quad (5.3)$$

Una vez se ejecuta una orden de producción, esta se completa por los diferentes holones de al UPH. El sistema se actualiza en el “Estado actual de la misión”, que se puede chequear en la HMI. Cualquier detalle que se realice en la ejecución de los trabajos programados en de la UPH, se evidencia en los vectores de estado de cada HR. De acuerdo a los resultados dados por una de las partes de la UPH, se puede resaltar las siguientes consideraciones, que se replican para ambas subplantas:

- El tiempo de mecanizado de una tapa siempre es de 38 segundos. La fabricación de la pieza en la MC es de 6 segundos y su transporte interno de 32 segundos.
- El tiempo de mecanizado de una base siempre es de 35 segundos. La fabricación de la pieza en la MC es de 6 segundos y su transporte interno es de 32 segundos.
- El tiempo de ensamblado siempre se mantiene constante y es de 5 segundos.
- La pieza que menos dura es S1 (Tapa verde – base azul) con 32 segundos. La pieza que más dura es S4 (Tapa azul – base azul) con 96 segundos.
- Las piezas que tardan menos en producirse son las ensambladas con diferentes colores (S1 y S2). Se debe a que poseen los tiempos muertos más cortos, gracias a que se emplean simultáneamente dos MC para construirlas.
- Las piezas que más tardan en producirse son las del mismo color (S3 y S4). Se debe a que sólo se emplea una MC por (base y tapa)

- El tiempo muerto máximo se obtuvo al fabricar la base azul de S4, con 39 segundos. Esto se presenta debido a que solo opera una MC para fabricarla y el recorrido por las BT es el más largo (respecto a los demás servicios que se producen).

Mediante la gráfica de la Figura 5.28, se aprecia visualmente las diferencias en los tiempos (en segundos) enlistados de la Tabla 5.5 (ver Figura 5.28).



**Figura 5.28.** Diagrama de tiempos de las partes producidas en una subplanta.

Un acontecimiento que se considera importante en la planta es cuando la UPH automáticamente detecta una falla o de manera manual se procede. En una perturbación, la HMI se encarga de mostrar el estado actual de la misión y cualquier otro comentario en relación a la falla en un recurso. Internamente se hace la reasignación de acuerdos gracias al Coordinador de la UPH.

Al final, es posible que se desaparezcan las misiones que se comprometan en una de las UPH que falle y se puedan otorgar a la otra. Los estados que se tienen de cada UPH, tanto de recursos como de misiones se actualizan y se evidencian en el SCADA implementado.

## 5.5. Validación de las Características Holónicas del Sistema

Los códigos desarrollados tanto en el autómatas como en el HMI, son los que permiten que se obtenga un control inteligente sobre el HMS. Estos aplicativos integran principalmente propiedades de autonomía, flexibilidad, cooperación proactividad y reactividad a las UPH. A continuación, se compendia la validación de estas propiedades que se extienden en el marco teórico (ver secciones 2.4.3 y 2.7.4), evidenciadas en el caso de estudio:

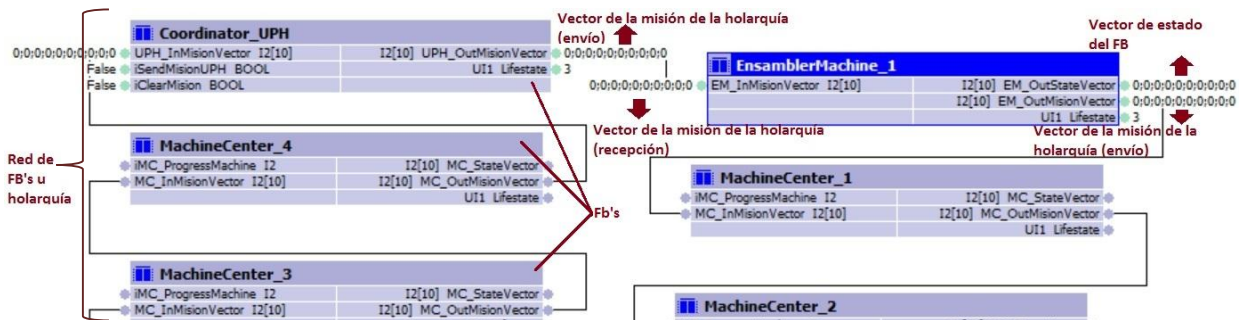
### 5.5.1. Autonomía

La *Autonomía* del HMS se refleja mediante el comportamiento distribuido del sistema. Esto es, la capacidad que se tiene en un FB diseñado con el estándar IEC 61499-1 (mediante Profinet CBA), para que se auto controle de manera independiente a los otros FB. Un FB se considera un holón, y este no depende de ningún otro holón para hacer su propia tarea o cumplir su misión.

En cualquiera de los códigos de los FB realizados para la operación de las Máquinas Centrales, las Bandas Transportadoras y los Ensambladores (de FB1 a FB10), se eligen estrategias de su conducta para la correspondiente red de FB's a las que pertenecen. En cualquier FB creado para las UPH internamente se interactúa de manera independiente mediante señales de entrada y salida (sensores y actuadores), antes de actualizar su estado al Coordinador de la UPH.

Por ejemplo, en el caso del FB1 –para el control de la Máquina Central MC1, MC2, MC3 o MC4– este cuenta con 6 señales de entrada y 7 de salida (ver Tabla 5.2). La información de los sensores y actuadores correspondientes a cada Máquina, se procesa y se almacena en su respectivo Bloque de Datos (entre DB10 y DB13). Mediante este FB se lleva a cabo el proceso de mecanizado de piezas, de forma libre a cualquier otra tarea dentro de la UPH. De esta forma su estructura de control se hace independiente a cualquier otro FB, pero se conserva su autonomía en relación al cumplimiento de la misión de la red de FB's (holarquía). Esto se cumple con el resto de FB's de las UPH's.

Cada FB pertenece a una red de FB's, dirigida por el Coordinador de la UPH, que se encarga de establecer la comunicación a todos los FB's a través del envío de misión de la holarquía. La misión está dada por un vector de números enteros que se comparte entre los diferentes FB's de la red. Esto se puede observar en la imagen de la simulación online parcial del aplicativo Simatic Imap (ver Figura 5.29).



**Figura 5.29.** Red de FB's de la UPH en Simatic Imap.

Cada subplanta dentro de la UP se ocupa de sus propias decisiones (autonomía), en relación al desempeño de su propia misión. No obstante, se obliga a cada UPH, a dar aviso a la holarquía de su estado respecto al cumplimiento de

determinada meta. El informe se refiere a si la misión no se puede cumplir debido a una falla o a errores en su dinámica. Esto implica que el sistema HMS es autónomo, pero con límites.

### 5.5.2. Flexibilidad

Se obtiene desde el punto de vista de la implementación del control distribuido y la reconfigurabilidad. La implementación de La IEC 61499-1 facilita la creación del Coordinador de la UPH de forma embebida. En este componente se estableció un tipo de administrador, el cual permite que se procesen cambios mediante la configuración automática de toda la UPH. Este administrador, además, genera los eventos necesarios para la nueva configuración en las determinadas misiones.

Lo que se asigna dentro de las misiones por los holones HM (trabajos en cualquiera de las máquinas MC, EM o BT) se llevan a cabo dentro del tiempo de ejecución, pero de manera que se puede cambiar la ruta de fabricación si se hace necesario (por ejemplo, frente a una falla). Mediante la implementación del modelo de la supervisión del proceso (ver sección 4.2.1), se crea una mejora considerable en la flexibilidad. En el diagrama de secuencias de la Figura 5.30, se muestra como en el HMS se logra gestionar de manera eficaz el enrutamiento flexible (ver Figura 5.30).

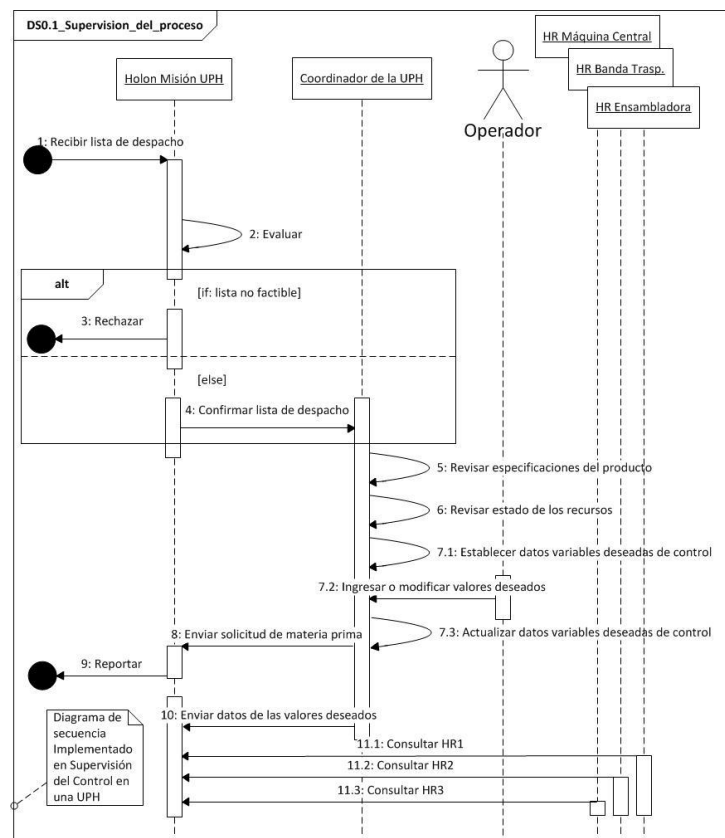


Figura 5.30. Enrutamiento distribuido mediante la supervisión del proceso.

### 5.5.3. Cooperación

Se considera como una consecuencia lógica de la reactividad gracias a que dada una perturbación en una de las subplantas que afecte a largo plazo el logro de la misión (u la orden lanzada), la otra coopera con sus respectivos HR. Así, los elementos que poseen sus mismas competencias, cooperan entre sí para no fallar a toda la UPH. La cooperación entre holones se realiza mediante la comunicación del sistema distribuido con Profinet CBA. Cuando no se tiene una cooperación exitosa, esto se informa al Coordinador UPH de manera que este tome decisiones de reconfiguración.

Un mecanismo que se considera importante para la colaboración es el modelo de asignación de acuerdos desarrollado (ver sección 4.2.2), el cual se encarga de permitir la asignación de las diferentes operaciones con los recursos y su seguimiento. Como se aprecia en el modelo basado en HCNC (ver Figura 5.31), se concibe de forma dinámica y totalmente distribuida, puesto que se utiliza información global asíncrona.

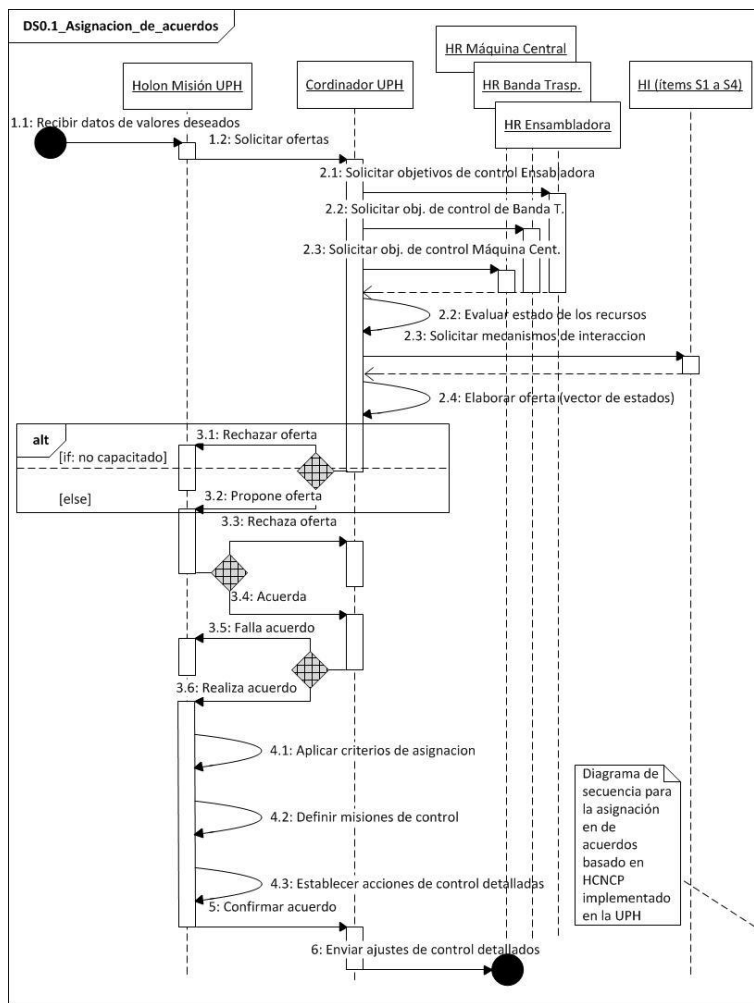


Figura 5.31. Procedimiento de asignación de operaciones a los recursos.

Cada holón recurso dentro de la UPH, se encarga de participar en el proceso en relación a su capacidad. El proceso se inicia en el holón misión de la holarquía, con el fin de que se logre un (otro holón misión) acuerdo con la correspondiente UPH. Cada su planta a su vez asigna, un HR para que se realice cada operación. Para que esto se cumpla, se deben cumplir condiciones como no tener un previo acuerdo en ejecución y estar en la capacidad de cumplimiento del HR.

Se hace posible que los diferentes HM, dentro del HM de la holarquía, se puedan ejecutar en cualquiera de las subplantas. Esto se puede dar en diferentes tiempos de procesamiento, pero se elige una de ellas en relación al criterio establecido del autor, de gastar el menos tiempo posible. Una vez se selecciona la UPH con sus recursos correspondiente, el holón misión indica los recursos necesarios (HI) y se envía al holón recurso. En HR se almacena el tiempo de comienzo y final de la tarea.

#### **5.5.4. Pro actividad**

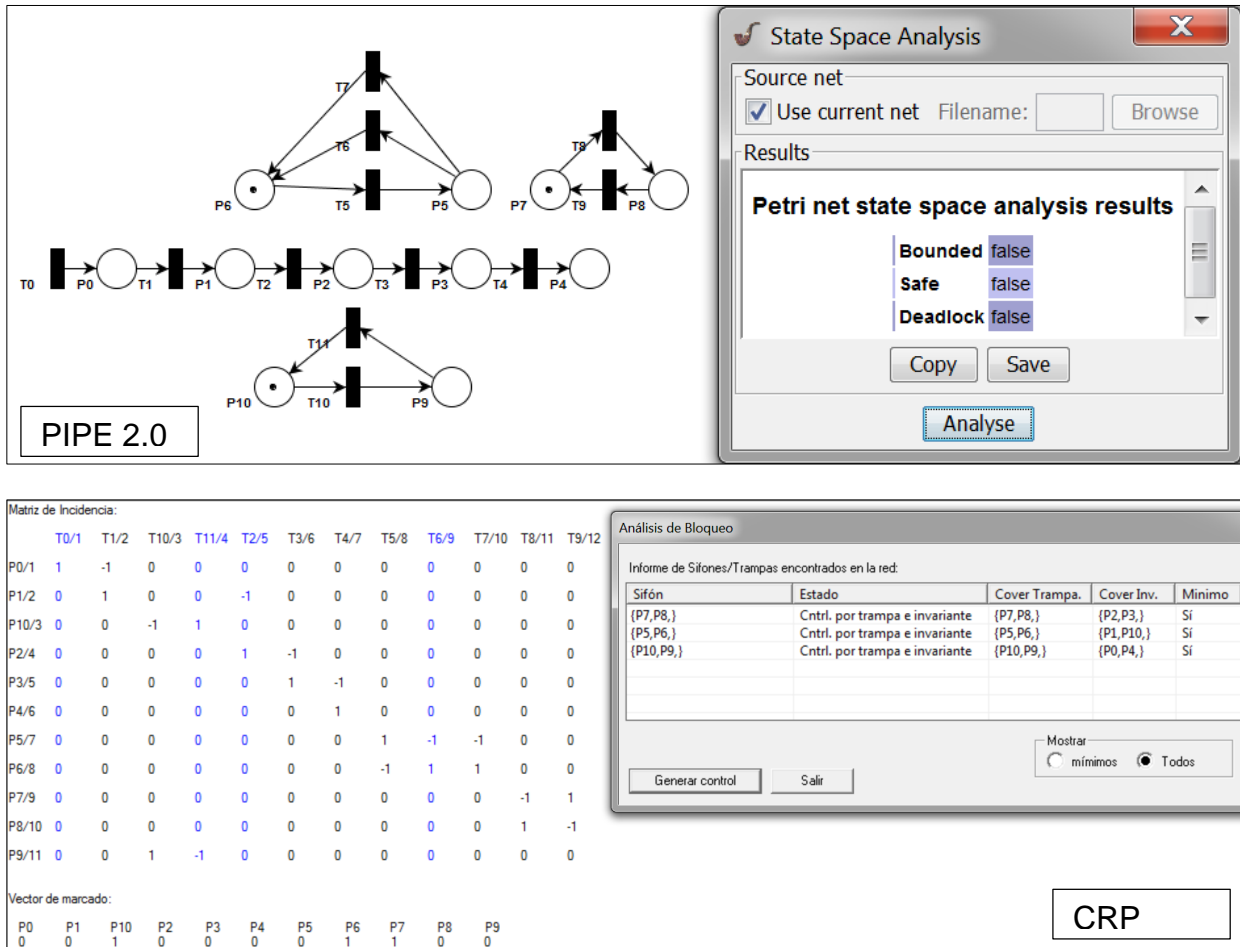
No se logra identificar una forma específica o clara en que se interprete esta propiedad plenamente. Con las aplicaciones existentes de la UPH, no se logra representar una analogía en que el sistema se anticipe ante futuras perturbaciones e incumplimientos. No obstante, se aporta la generación de un mensaje de probable incumplimiento en el HMI, dada la capacidad del sistema por debajo del 100%. Este no influye en que algún holón se anticipe a la situación que afectaría la misión o para evitar que ello ocurra.

#### **5.5.5. Reactividad**

En los diferentes FB de cada aplicación de Profinet CBA del sistema (por ejemplo, en una MC), se emite una salida (reacción) después de un estímulo en su entrada. La reacción se da en la red de bloques dentro de un intervalo de tiempo, con correspondencia explícita entre los eventos de entrada y de salida.

El sistema se hace reactivo, además, por la presencia del supervisor creado a partir de la teoría de SED y el control supervisorio, el cual se considera reactivo por naturaleza. El supervisor busca mantener la trayectoria deseada del sistema, a partir de eventos controlables. Se realizaron disparos aleatorios de las transiciones de la RdP de la UPH modelada (ver sección 5.2.3), mediante PIPE.

Con el análisis de RdP que se arroja por aplicativo se obtiene que en el sistema no se presenta bloqueo, como se evidencia en la Figura 5.32 (parte superior). A diferencia de PIPE, el aplicativo CRP puede establecer los sifones de la RdP, e indica si estos están controlados o no, sea por *invariante de lugar* o por *trampa*, lo que permite que se determine que sifón o sifones se deben controlar. Con CRP se encontraron 3 sifones *controlables por trampa e invariantes* (ver Figura 5.32, parte inferior).



**Figura 5.32.** Análisis de la RdP de la UPH con PIPE y CRP.

De acuerdo del modelado de cada subplanta, para el diseño del supervisor, las restricciones (condiciones) que se establecieron fueron (ver sección 5.2.3):

1. C0:  $\mu_1 \leq 1$ .
2. C1:  $\mu_2 \leq 3$ .
3. C2:  $\mu_3 \leq 1$ .
4. C3:  $-\mu_3 + q_5 + q_{10} \leq 0$  y  $v_5 - v_{11} \leq 0$ .
5. C4:  $-\mu_8 + q_7 \leq 0$  y  $-\mu_7 + q_5 \leq 0$ .
6. C5:  $v_{10} - v_4 \leq 1$  y  $2v_4 - v_6 - v_{11} \leq 0$ .

Mediante la Figura 5.33 se indica la matriz de incidencia (ver Figura 5.33, lado izquierdo) y el vector de marcado (ver Figura 5.33, lado inferior) y la de la RdP (ver Figura 5.33, lado derecho), que se calcularon mediante el aplicativo CRP. Se garantizó que la RdP de la UPH no entre en bloqueo, aunque se obtuvo una RdP menos eficiente y permisiva.



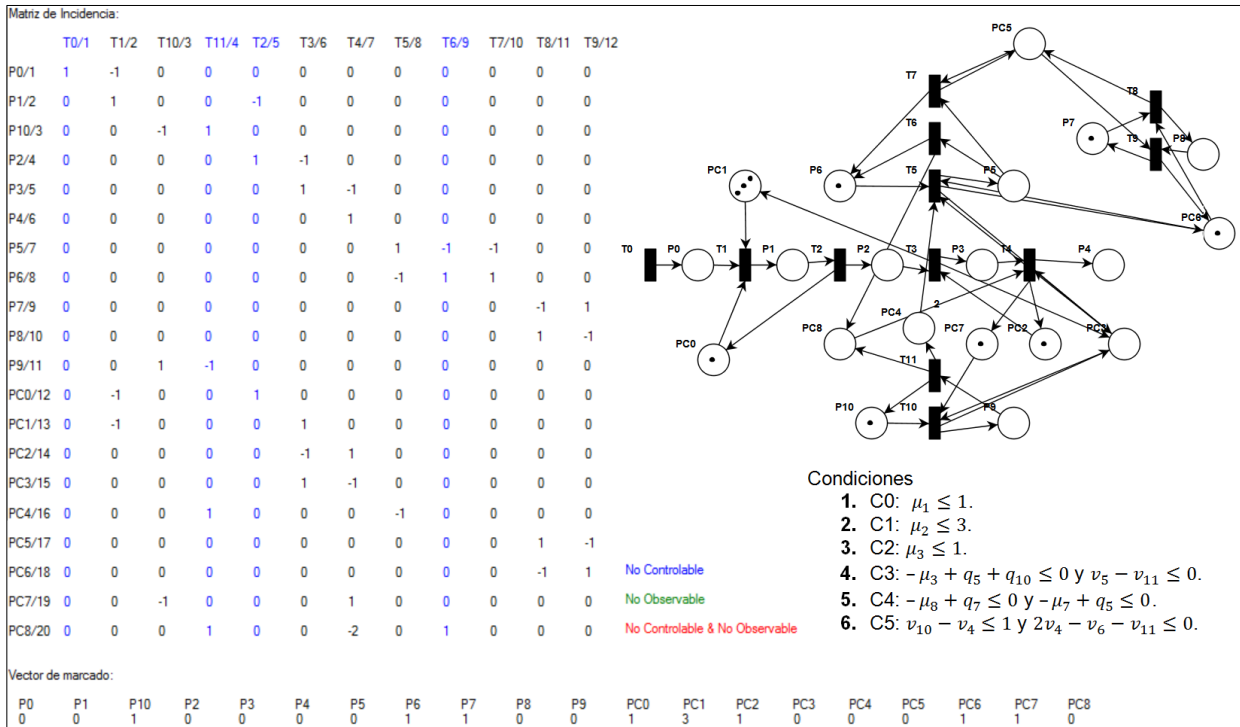


Figura 5.33. Cálculo del supervisor obtenido por CRP para la UPH.

Finalmente, CRP cuenta con una opción para la “Prueba eventos aleatorios”. Mediante esta se genera un número determinado de eventos aleatorios para identificar qué restricciones son violadas. Así se puede validar y además hacer una comparación del sistema antes y después de la implementación del supervisor. Para ello, primero se obtienen los eventos sin implementar las restricciones, es decir, sin que se generen sus respectivos lugares de control. Esto es con el objeto de que se indiquen los casos en donde se incumplen éstas, como se muestra en la Figura 5.34.

Simulación de eventos Aleatorios

10 Generar Eventos

Infracciones	P0	P1	P...	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	T0	T1	T...	T...	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Ninguna	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ninguna	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Ninguna	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
C3b,	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
C3b,	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
C3b,	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	2	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
Ninguna	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	2	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
Ninguna	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	2	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1
Ninguna	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	2	1	1	1	0	0	1	0	0	2	1	1
C5a,	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	2	1	2	1	0	0	0	1	0	0	2	1

Salir

Figura 5.34. Infracción de las condiciones C3 y C5 de la RdP modelo.

La Figura 5.34 expone solo 10 disparos para reducir el espacio de los resultados (sin el supervisor de la RdP). En la Figura 5.34 se resalta con color azul los casos aleatorios donde se incumplen las condiciones C3  $v_5 - v_{11} \leq 0$  y C5  $v_{10} - v_4 \leq 1$ . Para la primera restricción se tiene una suma de las marcas de los lugares superiores a 0, y para la segunda superiores a 1. Esto se debe a que en estas condiciones aún no se les ha generado su respectivo lugar de control.

La Figura 5.35 muestra 200 eventos aleatorios que se calculan para verificar el cumplimiento de las restricciones en la RdP con el supervisor. Aunque en el esquema se alcancen a ver todos los estados, se puede notar que el marcado RdP no infringe en ningún caso las restricciones determinadas. Finalmente, el código se generó con CRP en *Ladder* para ser programado en el autómata de la planta.

Infracciones	P0	P1	P...	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	PC0	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	T0	T1	T10	T...	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	
Ninguna	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	3	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Ninguna	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	3	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Ninguna	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	3	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Ninguna	2	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	3	1	0	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
Ninguna	3	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	3	1	0	0	0	1	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	
Ninguna	3	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	3	1	0	0	1	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	
Ninguna	2	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	1	0	0	1	0	1	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	
Ninguna	3	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	1	0	0	1	0	1	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	
Ninguna	3	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	1	0	0	0	1	1	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	
Ninguna	3	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	1	0	0	1	0	1	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	
Ninguna	3	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	2	1	0	0	1	0	1	0	4	1	0	0	1	0	0	0	0	0	3	2	
Ninguna	2	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	4	2	0	0	1	0	0	0	0	0	3	2	
Ninguna	2	0	1	2	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	4	2	0	0	2	0	0	0	0	0	3	2	
Ninguna	1	1	1	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	4	3	0	0	2	0	0	0	0	0	3	2	
Ninguna	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	4	3	0	0	2	1	0	0	0	0	3	2	
Ninguna	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	4	3	0	0	2	1	0	0	0	0	3	3	
Ninguna	1	0	1	2	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	4	3	0	0	3	1	0	0	0	0	3	3	
Ninguna	0	1	1	2	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	4	4	0	0	3	1	0	0	0	0	3	3	
Ninguna	0	1	1	2	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	4	4	0	0	3	1	0	0	0	0	4	3	
Ninguna	0	1	0	2	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	4	4	1	0	3	1	0	0	0	0	4	3	
Ninguna	0	0	0	3	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	4	4	1	0	4	1	0	0	0	0	4	3	
Ninguna	0	0	1	3	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	4	4	1	1	4	1	0	0	0	4	3	
Ninguna	1	0	1	3	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	5	4	1	1	4	1	0	0	0	0	4	3	
Ninguna	1	0	1	3	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	5	4	1	1	4	1	0	0	0	0	4	4	
Ninguna	1	0	1	3	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	5	4	1	1	4	1	0	0	0	0	5	4	
Ninguna	2	0	1	3	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	6	4	1	1	4	1	0	0	0	0	5	4		
Ninguna	2	0	1	3	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	6	4	1	1	4	1	0	0	0	0	5	5		
Ninguna	3	0	1	3	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	7	4	1	1	4	1	0	0	0	0	5	5	
Ninguna	3	0	1	3	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	7	4	1	1	4	1	0	1	0	5	5	
Ninguna	3	0	1	3	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	2	7	4	1	1	4	1	0	1	1	0	5	5	
Ninguna	3	0	1	3	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	2	7	4	1	1	4	1	0	1	1	0	6	5	
Ninguna	3	0	1	3	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	7	4	1	1	4	1	1	1	1	1	0	6	5
Ninguna	3	0	1	2	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	7	4	1	1	4	2	1	1	1	1	0	6	5
Ninguna	4	0	1	2	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	8	4	1	1	4	2	1	1	1	1	0	6	5
Ninguna	4	0	1	2	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	8	4	1	1	4	2	1	1	1	1	0	6	6
Ninguna	3	1	1	2	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	8	5	1	1	4	2	1	1	1	1	0	6	6
Ninguna	3	1	1	2	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	8	5	1	1	4	2	1	1	1	1	0	7	6
Ninguna	3	1	0	2	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	8	5	2	1	4	2	1	1	1	1	0	7	6
Ninguna	3	1	0	2	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	8	5	2	1	4	2	1	1	1	1	0	7	7

Figura 5.35. Validación del supervisor SED para la UPH.

### 5.5.6. Otras Propiedades

La arquitectura que se valida, que se distribuye según los HR de las dos subplantas (UPH 1 y UPH2) y las aplicaciones tecnológicas implementadas sobre todo el HMS

(hardware y software), contribuyeron para que se obtuvieran adicionalmente las siguientes características:

**Reconfigurabilidad:** en el HMS se pueden agregar nuevas máquinas para la extensión de la planta y para que se aumente el nivel de productividad (inclusive en tiempo de ejecución). Lo anterior se debe a la réplica (reusabilidad) de los FB desarrollados y su fácil configuración sobre la red de FB's. El sistema cuenta con la capacidad para actualizar de forma automática las implicaciones de los nuevos elementos agregados a la red.

**Robustez del sistema:** la falla que se presente en un recurso o HR, no implicará el incumplimiento o la falla general del sistema. Solo se tendrá corte o parada en aquellos procedimientos en los que interviene el HR o esa orden. La falla general del sistema se presenta cuando no existe disponibilidad de recurso alguno, para la ejecución de la misión en la holarquía dada por la red de FB's.

**Velocidad de respuesta:** ante perturbaciones de las subplantas o de alguna máquina en estas, el HMS puede sustituir las misiones de manera casi que inmediata (en milisegundos) hacia otra UPH (por sus características semejantes). Esta es una ventaja que se aprovecha en tiempo de ejecución y gracias a la capacidad de enrutamiento flexible mediante la red de FB's.

**Adaptabilidad y portabilidad de los aplicativos:** gracias a que existe una correspondencia entre la arquitectura holónica de referencia y la estructura de la programación mediante la aplicación de estándares, se facilita la evolución del software y su reusabilidad. Esto indica que, si a futuro se hace necesario, se pueden introducir más tipos de misiones (servicios), o máquinas de nuevas características. Gracias al formato XML de los FB, solo se hace necesario programar dichos holones de manera que se interconecten con los existentes. En la nueva adaptación se debe tener en cuenta a la secuencia de control y al protocolo de comunicación establecido.

En síntesis, sobre el presente sistema de manufactura holónico se ha permitido realizar la validación de un modelo de control inteligente, debido a su capacidad de autonomía, flexibilidad, cooperación y reactividad, tal como se evidencia en el contenido del presente capítulo. La UPH permite validar además otras características, por ejemplo, la agilidad e independencia que se tiene en el sistema ante la existencia de perturbaciones (robustez). En efecto, se tiene un comportamiento autónomo en el HMS, pero supervisado por un Coordinador de UPH y un operador externo mediante un SCADA. Ambos son parte del sistema para configurar el programa de producción, dado el caso de una misión u orden comprometida.

## Capítulo 6

# Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo Futuro

A continuación, se establece algunas conclusiones generales, recomendaciones y el trabajo que se puede seguir a futuro, teniendo como base de los resultados dados en el presente trabajo.

### 6.1. Conclusiones y Recomendaciones Generales

- En los sistemas de producción, específicamente de tipo industrial se debe garantizar flexibilidad y agilidad en sus procesos. Lo anterior debe evitarse sin la reducción de actividades programadas. Esto se puede lograr a partir de una adecuada administración de tareas del sistema, que pueden ser ejecutadas de acuerdo a un ente Coordinador. Este agente inteligente se puede definir a partir de una arquitectura de tipo holónica basado en Unidades de Producción (UP), como una de las mejores posibilidades. Con ello se obtienen atributos como cooperación y autonomía en el proceso que otorgan, entre otras características, un sistema distribuido (con independencia limitada), orientado al cumplimiento de metas globales.
- Cuando se desarrollan modelos estructurales y dinámicos de una arquitectura de control, se deben tener en cuenta los requisitos necesarios para que se obtengan resultados en condiciones no ideales. Para ello, el apropiado uso de herramientas existentes como UML, IDEF0 y las Redes de Petri, proporcionan el análisis y la base teórica pertinente ante las diferentes situaciones. Por ejemplo, la interacción del sistema ante elementos externos y su comportamiento ante fallas, facilita la identificación de fortalezas y debilidades del proceso, e influye en los cambios de su dinámica. Estas modificaciones se hacen menos extremas al sistema en la medida que se generen códigos y aplicativos de software embebido e inteligente, por ejemplo, de tipo Supervisor.
- En una arquitectura concebida desde el paradigma holónico, se hace necesario tener en cuenta las características de los tipos de holones que se trabajan en la arquitectura deseada. Por ejemplo, en la arquitectura UP (base de este trabajo), un holón HR se encarga de controlar procesos de cada dispositivo o máquina en el sistema. Además, en la implementación de autómatas programables tipo PLC para el control automatizado de la planta, se deben establecer las dinámicas discretas de estos holones y su código respectivo. En el caso de un Supervisor generado a partir de una Red de Petri, este se encargará desde el

PLC, de monitorear la planta y brindar las opciones de alejar los estados no deseados.

- El estándar basado en Bloque de Función de IEC 61499, que se completó en su segunda edición, es un modelo industrialmente útil. Esta hace posible la especificación para el uso de FB's, en dispositivos de sistemas distribuidos y embebidos. Ya existen proveedores de herramientas de software y plataformas de ejecución en real time que consideraron seriamente este mercado recientemente. Por tal motivo los desarrolladores de sistemas automatizados y usuarios finales, deben empezar una participación más masiva en la formación y el estudio de las ventajas y factibilidad de adopción de IEC 61499, en las nuevas tecnologías.
- El sistema holónico desarrollado cumplió con los mínimos requerimientos otorgado por este tipo de estrategias de control, como lo son la autonomía, flexibilidad, cooperación y reactividad. No obstante, el sistema no cumple con el del atributo de pro actividad, porque no existen eventos no controlables y de probable incumplimiento que se puedan predecir y manejar. Se considera que no se encontraron elementos suficientes a los que se accedieran para detectar esta característica en un proceso representado en una UPH. Algunos trabajos citados, evidencian que la proactividad tiene un alto nivel de complejidad y requiere de estudios más extensos, los cuales quedaron fuera del alcance de este trabajo. Esto sería una recomendación oportuna para un trabajo futuro.
- La plataforma tecnológica de comunicación que se implementó, tanto en el autómeta como en la planta de fabricación 3D simulada, garantizaron que todos los recursos trabajarán sobre una red industrial típica, basada en Ethernet (Profinet y Profinet CBA). Igualmente, esta se recomienda como la adecuada para otras implementaciones, puesto que se evidenció que facilita la agregación de atributos holónicos sobre un sistema de producción, con infraestructura tecnológica reciente. Los modelos y algoritmos que se desarrollaron en el prototipo de caso de estudio tuvieron como base otros trabajos de tesis previas. De la misma manera para una eventual mejora en la implementación de la misma arquitectura, estos se pueden adaptar/mejorar a nuevos sistemas. Esto se hace factible gracias a los resultados y la validación de la arquitectura.
- Como se evidenció en el estado del arte del presente trabajo, la tendencia de del control de sistemas desde el paradigma holónico (incluidos otros Sistemas Inteligentes de Manufactura), tienen una fuerte tendencia a cumplir con los requerimientos adoptados por la propuesta Alemana Industria 4.0. Esto refleja el aumento y la extensión de enfoques HMS con otras arquitecturas complementarias (ejemplo SMA), en correspondencia con CPS (base de I4.0).
- Las etapas que se desarrollaron en la metodología que se implantó en esta tesis, permitió determinar la estrategia de control del sistema de manufactura desde el punto de vista holístico. Gracias a que los objetivos se siguieron desde el menor al de mayor relevancia, de manera "eulerizada". En primera instancia

se diseñó la arquitectura basada en la Unidad de Producción Holónica; luego, se caracterizó el proceso, desde su comportamiento estructural y su dinámica basada en Sistemas a Eventos Discretos, aplicando Redes de Petri y las teorías de Control Supervisorio. Al final se implementaron los códigos generados en un PLC de gama media, mediante el estándar IEC 61131-3 e IEC 61499-1 y la aplicación de un SCADA en HMI. El cumplimiento de esas fases de diseño de software y el uso del aplicativo Factory IO® con el PLC S7-300, brindó la posibilidad de emular el sistema holónico supervisado. La integración de estos componentes (software y hardware), hacen un excelente acercamiento a la implementación de un proceso industrial real.

## 6.2. Trabajo Futuro

- Dado que los *Agentes* que se desarrollan dentro de la arquitectura heterárquica, predominan en gran parte de los trabajos académicos de sistemas automatizados, se pueden considerar las ventajas de estos frente a próximos desarrollos con arquitecturas holónicas. Aunque sus diferencias y similitudes difieren entre reconocidos autores, se pueden concebir la unión de estos dos paradigmas en miras de integrarse en los dispositivos de control embebido. Por ejemplo códigos y lenguajes basados en ambas arquitecturas como SARL<sup>20</sup>, facilitarían el concepto de inteligencia en software de manera holística, o bajo nuevos paradigmas como los CPS. También se haría necesario implementar diferentes protocolos de comunicación como los trabajos en torno al estándar unificado OPC UA, que puede suministrar la integración de diferentes holones o (o agentes). Los principales proveedores de este ámbito están adoptando el uso de redes industrializadas basadas en *Industrial Ethernet* y OPC UA.
- Futuras estructuras de control propuestas, se deben desarrollar sobre plataformas tecnológicas existentes, no solo del ámbito académico sino comercial. En el caso de software de autómatas, se debe considerar la aplicación de la norma IEC 61499, sin dejar de lado la ya posicionada IEC 61131-3. Un ejemplo que se demostró aquí, fue el uso del PLC S7-300 de Siemens® y su aplicativos de programación típicos en la industria. No obstante, nuevas actualizaciones de la misma empresa como el aplicativo TIA Portal, implican la implementación de nuevas herramientas de programación y de comunicación en controladores de esta familia. En efecto, un futuro trabajo con esta empresa líder en el mundo, se puede hacer bajo herramientas de opciones avanzadas como el *Open Development Kit (ODK)*, que permite programación en C++. Esto aportaría al soporte para el desarrollo de sistemas de control distribuido inteligente, aumentando la acogida de recientes y próximas especificaciones técnicas de las normas (no solo en el ámbito académico como se denota en la mayoría de trabajos, sino también en el área industrial).

---

<sup>20</sup> SARL es un lenguaje de programación de sistemas holónicos basados en agentes. Ver página web oficial en: <http://www.sarl.io>

## Referencias Bibliográficas

- Aguilar, J. et al., 2013. *Sistemas MultiAgentes y sus Aplicaciones en Automatización Industrial* Segunda Ed. M. C. Jose Aguilar, Addison Ríos, Francisco Hidrobo, ed., Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela: Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela. Available at: <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/ilich/articulos/portada-2012.pdf>.
- Antsaklis, P.J., 1994. Defining intelligent control: Report of the task force on intelligent control. *IEEE Control Systems Magazine*, 14(3), pp.4-5-66.
- Araújo, J.A. et al., 2015. Programación y Control de Sistemas de Fabricación Flexibles: un Enfoque Holónico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial {RIAI}*, 12(1), pp.58–68. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791214000831>.
- Araújo A., J.A., Benito M., J.J. & del Olmo M., R., 2002. Sistemas de Fabricación Holónicos. In *II Conferencia de Ingeniería de Organización Vigo*. Vigo, pp. 117–724.
- Arboleda C., A.S., 2011. *Transformación automática de requisitos representados en esquemas preconceptuales a modelos de interacción de sistemas holónicos*. Tesis de Maestría en Ingeniería de Sistemas, Facultad de Minas Escuela de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Asare, P. et al., 2012. Cyber Physical Systems. *CPS Workshop*. Available at: <http://cyberphysicalsystems.org/> [Accessed June 12, 2016].
- Barbosa, J., 2015. *Self-organized and evolvable holonic architecture for manufacturing control*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis. Available at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01137643v2>.
- Barrera, M., 2006. Holística. *Colombia*. Editado por Fundación Sypal y Ediciones Quirón.
- Bauernhansl, T., ten Hompel, M. & Vogel-Heuser, B., 2014. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik Anwendung Technologien Migration* First. T. Bauernhansl, M. ten Hompel, & B. Vogel-Heuser, eds., Wiesbaden: Springer-Verlag. Available at: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz405477910cov.htmhttp://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04682-8>.
- Bezák, T., 2012. *Usage of IEC 61131 and IEC 61499 Standards for Creating Distributed Control Systems* First. P. Husár, Peter, A. Janota, & A. Gese, eds., Ilmenau: Ilmenau Technical University / University Library.
- Bongaerts, L., 1998. *Integration of scheduling and control in holonic manufacturing systems*,
- Borangiu, T. et al., 2015. Switching mode control strategy in manufacturing execution systems. *International Journal of Production Research*, 53(7), pp.1950–1963. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2014.935825>.
- Borangiu, T., Thomas, A. & Trentesaux, D., 2016. *Service orientation in holonic and multi-agent manufacturing control* T. Borangiu et al., eds., Switzerland: Springer.
- Botti N., V.J. & Giret B., A., 2003. Aplicaciones Industriales de los Sistemas Multiagente. , p.59.
- Brückner, S. et al., 1998. Designing agents for manufacturing control. In *Proceedings of the 2nd AI & Manufacturing Research Planning Workshop*. pp. 40–46.

- Van Brussel, H. et al., 1998. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computers in Industry*, 37(3), pp.255–274.
- Buchely, C.D. & Ruiz C., F., 2012. *Herramienta Basada En Redes De Petri Para Diseño De Supervisores De Sistemas De Eventos Discretos*. Tesis de Pregrado, Universidad Del Cauca, Facultad De Ingeniería Electrónica Y Telecomunicaciones, Departamento De Electrónica, Instrumentación Y Control, Popayán.
- Burbano, D.A. & López, J.D., 2015. *Definición de un método para la programación de la producción desde el paradigma de los sistemas holónicos de manufactura*. Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.
- Calvo G., J. & Collazos A., M.E., 2015. *Aplicación basada en redes de petri para la programación automática de PLCs en procesos batch*. Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.
- Camacho, G. & Patiño, Á., 2013. Aplicación de los estándares ISA S88 e IEC-61499 en procesos de manufactura discreta. In G. Camacho & A. Patiño, eds. *IV Congreso de automatización Automatiza 2013*. Bogotá, Colombia: International Society of Automation ISA Colombia, pp. 1–15.
- Čapkovič, F. & Čapkovič, P., 2001. Intelligent Control Synthesis of Manufacturing Systems\*. In L. Monostori, J. Váncza, & M. Ali, eds. *Engineering of Intelligent Systems: 14th International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, IEA/AIE 2001 Budapest, Hungary, June 4–7, 2001 Proceedings*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 767–776. Available at: [http://link.springer.com/10.1007/3-540-45517-5\\_84](http://link.springer.com/10.1007/3-540-45517-5_84).
- Cassandras, C.G. & Lafortune, S., 2009. *Introduction to discrete event systems*, Springer Science & Business Media.
- Catalán C., C., 2016. *Modelos y plataforma IEC 61499 adaptados al control distribuido de máquinas herramienta en sistemas de fabricación ágil*. Univerisidad de Zaragoza. Available at: <https://zaguan.unizar.es/record/47408/files/TESIS-2016-016.pdf>.
- Cataño B., M.E., 2007. *Diseño de Código PLC para Control Supervisorio Local Bajo un Enfoque Holárquico*. Tesis de Pregrado en Ingeniería Electrica, Facultad de Minas Escuela de Ingenieria Electrica y Mecanica, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Available at: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1904/>.
- Chacón, E., 2002. A way to implement supervisors for holonic production units. *15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain*, pp.1–7.
- Chacón, E. et al., 2008. The Holonic Production Unit: an Approach for an Architecture of Embedded Production Process. In J. Aramburo & A. R. Trevino, eds. *Advances in Robotics, Automation and Control*. Rijeka, Croatia: InTech, pp. 301–315. Available at: [http://www.intechopen.com/books/advances\\_in\\_robotics\\_automation\\_and\\_control/the\\_holonic\\_production\\_unit](http://www.intechopen.com/books/advances_in_robotics_automation_and_control/the_holonic_production_unit).
- Chacón, E., Besembel, I. & Hennet, J.C., 2004. Coordination and optimization in oil and gas production complexes. *Computers in Industry*, 53(1), pp.17–37. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361503001490>.
- Chacón, E., Carrasco, E. & Cardillo, J., 2012. Programación en línea de procesos de producción continua mediante supervisores. In International Society of Automation ISA Colombia, ed. *III (Tercera) Jornada de automatización de la industria petrolera JAIP*. Bogotá, Colombia: International Society of Automation ISA Colombia, pp. 278–286.



- Chacón, E. & Indriago, M., 2010. Implementación de Supervisores en una Arquitectura de Referencia Basadas en Sistemas de Manufactura Holónicos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 7(3), pp.72–82. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1697791210700443>.
- Chacón R., E.A. et al., 2009. Aplicación del Estándar ISA88 en el Modelado del Proceso de Producción de Azúcar en un Central Azucarero. *Seventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, 2, pp.1–10.
- Chacón R., E.A. & Rojas A., O.A., 2006. Principios de una metodología para integración empresarial bajo un enfoque holónico. In *Memorias del XII Latin ....* Available at: <http://www.unicauca.edu.co/ai/publicaciones/PMIEH.pdf>.
- Checa R., D.A., 2014. *Formalización de un modelo de referencia para Integración empresarial desde el enfoque de los Sistemas Holónicos de Manufactura*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca.
- Chokshi, N. & McFarlane, D., 2010. *A Distributed Coordination Approach to Reconfigurable Process Control* illustrate. Springer, ed., London, England: Springer.
- Christensen, J.H., 2005. Holobloc, Inc. Available at: <http://www.holobloc.com> [Accessed September 5, 2016].
- Christensen, J.H., 1994. Holonic manufacturing systems: initial architecture and standards directions. *Proc 1st Euro Wkshp on Holonic Manufacturing Systems*. Available at: <http://www.citeulike.org/group/854/article/1378921>.
- Christo, C. & Cardeira, C., 2007. Trends in Intelligent Manufacturing Systems. In *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on*. pp. 3209–3214.
- Colombo, A.W., Schoop, R. & Neubert, R., 2006. An agent-based intelligent control platform for industrial holonic manufacturing systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(1), pp.322–337.
- Covanich, W. & McFarlane, D., 2011. Comparing the control structures of ISA S88- and holonic component-based architecture. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 41(1), pp.4–13.
- Cruz S., L.A. & Rojas A., O.A., 2013. Comparación de enfoques de sistemas de control tradicionales y el paradigma de los Sistemas Holónicos de Manufactura. In IEEE, ed. *II International Congress of Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA), CIIMA 2013*. Bogotá: IEEE, pp. 211–218.
- Cruz S., L.A. & Rojas A., O.A., 2014. The future of industrial automation and IEC 614993 standard. In IEEE, ed. *2014 III International Congress of Engineering Mechatronics and Automation (CIIMA)*. Cartagena de Indias: IEEE, pp. 1–5. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6983434>.
- Deen, S. M., 2003. *Agent-Based Manufacturing Advances in the Holonic Approach* First. S. M. Deen, ed., Berlin Heidelberg New York: Springer. Available at: <http://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-662-05624-0>.
- Devia M., J.J., 2004. *Automatización integrada de procesos de producción continua bajo arquitectura holarquica*. Tesis de Maestría en Automatización e Instrumentación, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Mérida Venezuela.
- Doran, J.L., 1999. *Las matemáticas en la vida cotidiana* 3th ed. P. Educación, ed., Pearson Educación. Available at: <https://books.google.de/books?id=VV7uAAAACAAJ>.

- Dumitrache, I. & Caramihai, S., 2010. Intelligent Manufacturing: a New Paradigm. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(22), pp.1–7. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015309009>.
- Durán F., C.R., 2005. *Control Distribuido Auto organizado para un Sistema Flexible de Manufactura*. Tesis de pregrado de Ingeniero Civil en Informática, Universidad del Bío-Bío, Departamento de Sistemas de Información.
- Ellis, R.C., Li, X. & Riggs, J.B., 1998. Modeling and optimization of a model IV fluidized catalytic cracking unit. *AIChE Journal*, 44(9), pp.2068–2079. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/aic.690440914>.
- EIMaraghy, H. & Monostori, L., 2014. Variety Management in Manufacturing Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges. *Procedia CIRP*, 17, pp.9–13. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114003497>.
- Formella, A., 2006. Concurrencia y Distribución. Available at: <http://formella.webs.uvigo.es/doc/cd01/condis.html> [Accessed April 15, 2016].
- Frayret, J.-M., D'Amours, S. & Montreuil, B., 2004. Coordination and control in distributed and agent-based manufacturing systems. *Production Planning & Control*, 15(1), pp.42–54. Available at: [http://search.proquest.com/docview/200261345?accountid=10297%5Cnhttp://sfx.cranfield.ac.uk/cranfield?url\\_ver=Z39.88-2004&rft\\_val\\_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:journal&genre=article&sid=ProQ:ProQ:abiglobal&atile=Coordination+and+control+in+distributed+and+agent](http://search.proquest.com/docview/200261345?accountid=10297%5Cnhttp://sfx.cranfield.ac.uk/cranfield?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:journal&genre=article&sid=ProQ:ProQ:abiglobal&atile=Coordination+and+control+in+distributed+and+agent).
- Galán, R. et al., 2000. Control Inteligente. *Inteligencia Artificial*, 4(10), pp.43–48.
- Gamboa Q., F. et al., 2016. A Petri net-based methodology to increase flexibility in service-oriented holonic manufacturing systems. *Computers in Industry*, 76, pp.53–68. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361515300439>.
- Gaviria, C.A., Buchely, C. & Ruiz, F., 2015. Aplicación para control supervisor con redes de Petri y traducción automática a código Ladder para el software RSLogix500TM. *REVISTA UIS INGENIERÍAS*, 14(2), p.9. Available at: <http://dx.doi.org/10.18273/revuin.v14n2-2015005>.
- Giret B., A.S., 2005. *ANEMONA: Una Metodología Multi Agente para Sistemas Holónicos de Fabricación*. Tesis de Doctorado, Departamento de Sistemas Informáticos y Computación, Universitat Politècnica de València.
- Gobierno Alemán, F.M. for E.A. and E., 2015. Plattform Industrie 4.0. Available at: <http://www.plattform-i40.de/> [Accessed August 23, 2016].
- Gruver, W.A. et al., 2003. Holonic Manufacturing Systems: Phase II. In V. Mařík, D. McFarlane, & P. Valckenaers, eds. *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing: First International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems, HoloMAS 2003, Prague, Czech Republic, September 1-3, 2003. Proceedings*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–14. Available at: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-45185-3\\_1](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-45185-3_1).
- Gutierrez P., D.G., 2015. CodeCompiling. Available at: <http://www.codecompiling.net> [Accessed November 22, 2015].
- Hatvany, J., 1985. Intelligence and cooperation in heterarchic manufacturing systems. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2(2), pp.101–104. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0736584585900651>.

- Hehenberger, P. et al., 2016. Design, modelling, simulation and integration of cyber physical systems: Methods and applications. *Computers in Industry*, p. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361516300902>.
- Holvoet, T., Weyns, D. & Valckenaers, P., 2009. Patterns of delegate MAS. In *SASO 2009 - 3rd IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*. pp. 1–9.
- Höpf, M., 1994. Holonic Manufacturing Systems (HMS) The Basic Concept and a Report of IMS Test Case 5. In I. Press, ed. *Advances in Design and Manufacturing 5*. Amsterdam: IOS Press, Amsterdasm, pp. 84–93. Available at: <http://publica.fraunhofer.de/documents/PX-17425.html>.
- Hossain, M.S. & Muhammad, G., 2016. Cloud-assisted Industrial Internet of Things (IIoT) – Enabled framework for health monitoring. *Computer Networks*, 101, pp.192–202. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128616300019>.
- Huang, Z. et al., 2004. Modeling discrete event systems with faults using a rules-based modeling formalism. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 9(3), pp.233–254.
- Hurtado, J., 2010. *El proyecto de investigación comprensión holística de la metodología y la investigación*, Caracas: Ediciones Quirón-Sypal.
- Hurtado, J., 2012. *Metodología de la investigación guía para la comprensión Holística para la ciencia*, Caracas: Ediciones Quirón-Sypal.
- IAS, T.U.M., 2014. Institute of Automation and Information Systems. Available at: <http://i40d.ais.mw.tum.de/> [Accessed August 20, 2016].
- IBM, 2014. Designing and modeling. Available at: [http://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SS6RBX\\_11.4.3/com.ibm.sa.bpr.doc/topics/t\\_ovwmdlidef0.html](http://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SS6RBX_11.4.3/com.ibm.sa.bpr.doc/topics/t_ovwmdlidef0.html) [Accessed September 15, 2016].
- IEC, I.E.C., 2012. International Standards and Conformity Assessment for all electrical, electronic and related technologies. Available at: <http://www.iec.ch> [Accessed April 22, 2016].
- Indriago, C. et al., 2016. H2CM: A holonic architecture for flexible hybrid control systems. *Computers in Industry*, 77, pp.15–28. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361515300695>.
- ISA-95, 2013. Leading website for ISA-95 standard. Available at: <https://isa-95.com> [Accessed August 25, 2016].
- ISA Committe SP88, 2010. *ISA-88.01-2010: Batch control part 1: Models and terminology*,
- Jimenez, J.-F. et al., 2016. Pollux: a dynamic hybrid control architecture for flexible job shop systems. *International Journal of Production Research*, pp.1–19. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2016.1218087>.
- Johansson, B., Williams, E.J. & Alenljung, T., 2004. Using autonomous modular material handling equipment for manufacturing flexibility. In *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004*. pp. 1115–1121.
- KBSI, K.B.S., 2014. Integrated DEFinition Methods (IDEF). Available at: [http://www.idef.com/idefo-function\\_modeling\\_method/](http://www.idef.com/idefo-function_modeling_method/) [Accessed September 15, 2016].
- Koestler, A., 1989. *The Ghost in the Machine*, London: Arkama Books.

- Langer, G. et al., 2000. Research contributions to the modelling and design of intelligent manufacturing systems. In *Proceedings of the second international workshop on intelligent manufacturing systems*.
- Lee, J., Bagheri, B. & Jin, C., 2016. Introduction to cyber manufacturing. *Manufacturing Letters*, 8, pp.11–15. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213846316300049>.
- Leitão, P., 2004. *ADACOR: An Agile and Adaptive Holonic Architecture for Manufacturing Control*, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Porto. Tesis de doctorado en Electrotecnia e Ingeniería de la Computación. Portugal.
- Leitão, P., Colombo, A.W. & Karnouskos, S., 2016. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges. *Computers in Industry*, 81, pp.11–25. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361515300348>.
- Leitão, P. & Restivo, F., 2006. ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. *Computers in Industry*, 57(2), pp.121–130. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361505001077>.
- Lin, C. & Lin, Y., 2004. Design of intelligent manufacturing systems by using UML and petri net. In *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2004*. pp. 501–506. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1297490>.
- Lin, K. et al., 2016. Human localization based on inertial sensors and fingerprints in the Industrial Internet of Things. *Computer Networks*, 101, pp.113–126. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128615004193>.
- Liu, Q., Liu, D. & Huang, D., 2008. Methods to Support Holon Aggregation in Holonic Manufacturing System. In *Proceedings of the 2008 International Symposium On Computational Intelligence and Design, Vol 2*. p. IEEE Computat Intelligence Soc; Univ Bristol; Zhej.
- Luleå Tekniska Universitet, 2012. IEC 61499 The New Standard in Automation. Available at: <http://www.iec61499.de/> [Accessed July 22, 2016].
- Mařík, V. et al., 2015. *Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems: 7th International Conference, HoloMAS 2015 Valencia, Spain, September 2-3, 2015 Proceedings*, Springer.
- Marik, V., McFarlane, D. & Valckenaers, P., 2003. Holonic and multi-agent systems for manufacturing. In *First International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*. Springer.
- McFarlane, D.C. & Bussmann, S., 2003. Holonic Manufacturing Control: Rationales, Developments and Open Issues. In *Agent-Based Manufacturing*. Springer, pp. 303–326.
- Mönch, L. & Stehli, M., 2006. ManufAg: a multi-agent-system framework for production control of complex manufacturing systems. *Information Systems and e-Business Management*, 4(2), pp.159–185. Available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s10257-005-0030-5>.
- Monostori, L. et al., 2016. Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(2), pp.621–641. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850616301974>.
- Moody, J.O. & Antsaklis, P.J., 2000. Petri net supervisors for DES with uncontrollable and unobservable transitions. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(3), pp.462–476.

- Mourtzis, D. et al., 2016. A Cloud-based Approach for Maintenance of Machine Tools and Equipment Based on Shop-floor Monitoring. *Procedia CIRP*, 41, pp.655–660. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115011488>.
- Müller, J.P., Wooldridge, M.J. & Jennings, N., 1998. *Intelligent Agents III. Agent Theories, Architectures, and Languages: ECAI'96 Workshop (ATAL), Budapest, Hungary, August 12-13, 1996, Proceedings*, Springer Science & Business Media.
- Muñoz, D.M. et al., 2014. Identification of stochastic timed discrete event systems with st-IPN. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
- Muñoz A., D.M., 2015. *Identificación y Diagnóstico de Fallos en Sistemas de Eventos Discretos*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática - Departament d'Enginyeria de Sistemes i Automàtica. Available at: <http://hdl.handle.net/10251/53915>.
- Murata, T., 1989. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), pp.541–580.
- Murillo, L., 2008. Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables. *Tecnología en Marcha*, 21(4), pp.102–125. Available at: [http://www.tecdigital.itcr.ac.cr/servicios/ojs/index.php/tec\\_marcha/article/view/231](http://www.tecdigital.itcr.ac.cr/servicios/ojs/index.php/tec_marcha/article/view/231).
- Novas, J.M. et al., 2013. A Collaborative Framework between a Scheduling System and a Holonic Manufacturing Execution System. In T. Borangiu, A. Thomas, & D. Trentesaux, eds. *Service Orientation in Holonic and Multi Agent Manufacturing and Robotics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 3–17. Available at: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-35852-4\\_1](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-35852-4_1).
- Palacio B., J.E., 2013. *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-Sede Manizales. Available at: <http://www.bdigital.unal.edu.co/10585/>.
- Pigan, R. & Metter, M., 2015. *Automating with PROFINET: Industrial Communication Based on Industrial Ethernet*, Wiley.
- Presley, A., 1997. *A representation method to support enterprise engineering*. Citeseer. Available at: [http://scholar.google.be/scholar?start=860&q=\(%22business+process+model%22\)+and+\(%22quality%22\)+and+\(%22literature+review%22\)+&hl=nl&as\\_sdt=0,5#5](http://scholar.google.be/scholar?start=860&q=(%22business+process+model%22)+and+(%22quality%22)+and+(%22literature+review%22)+&hl=nl&as_sdt=0,5#5).
- Quintero H., F.L., 2009. *Un Modelo de control inteligente para sistemas de manufactura basado en los paradigmas Holónico y Multi-Agente*. Tesis de Maestría en Ingeniería de Sistemas, Facultad de Minas Escuela de Sistemas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Available at: <http://www.bdigital.unal.edu.co/1904/>.
- Raileanu, S. et al., 2012. A JADE Environment for Product Driven Automation of Holonic Manufacturing. In T. Borangiu, A. Thomas, & D. Trentesaux, eds. *Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing Control*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 265–277. Available at: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27449-7\\_20](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27449-7_20).
- Ramadge, P.J.G. & Wonham, W.M., 1989. The control of discrete event systems. *Proceedings of the IEEE*, 77(1), pp.81–98.
- Rojas A., O.A., 2010. Principios de un Modelo Dinámico para Integración de Empresas de Manufactura. , p.27.

- Roulet-Dubonnet, O. & Ystgaard, P., 2011. An application of the holonic manufacturing system to a flexible assembly cell. In V. Malvrik, P. Vrba, & P. Leitão, eds. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 29–38. Available at: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-23181-0\\_3](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-23181-0_3).
- Rüßmann, M. et al., 2015. Industry 4.0. The Future of Productivity and Growth in Manufacturing. *Boston Consulting*, (April), pp.1–5. Available at: <https://www.bcgperspectives.com/>.
- Salazar V., R.D., 2009. *Modelo De Holones Recurso En Sistemas Holónicos De Manufactura*. Tesis de Maestría en Automatización Industrial, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales.
- Saumeth C., K.J. et al., 2015. Sistema Ciber-Físico de una CNC para la producción de circuitos impresos. In F. E. EIA, ed. *IV Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica y Automatización - CIIMA 2015*. Medellín: Fondo Editorial EIA, pp. 154–155. Available at: <http://repository.eia.edu.co/revistas/index.php/mem/article/view/826/744>.
- Shen, W. & Norrie, D.H., 1999. Agent-based systems for intelligent manufacturing: A state-of-the-art survey. *Knowledge and Information Systems*, 1(2), pp.129–156.
- Sikora, R. & Shaw, M.J., 1997. Coordination mechanisms for multi-agent manufacturing systems: applications to integrated manufacturing scheduling. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 44(2), pp.175–187.
- Simon, H.A., 1996. *The Sciences of the Artificial (Google eBook)* 3rd ed. The MIT Press & C. Massachusetts, eds., London, England: The MIT press. Available at: <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=k5Sr0nFw7psC&pgis=1>.
- Spöcker, G. et al., 2014. Towards a Cax-Framework for Adaptive Programming Using Generic Process Blocks for Manufacturing. In B. Denkena, ed. *New Production Technologies in Aerospace Industry: Proceedings of the 4th Machining Innovations Conference, Hannover, September 2013*. Cham: Springer International Publishing, pp. 153–162. Available at: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-01964-2\\_21](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-01964-2_21).
- Takenaka, T. et al., 2016. Enhancing products and services using smart appliance networks. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(1), pp.397–400. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850616300622>.
- Tapoglou, N. et al., 2015. Cloud-based platform for optimal machining parameter selection based on function blocks and real-time monitoring. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(4), p.40909.
- Terkaj, W., Tolio, T. & Urgo, M., 2015. A virtual factory approach for in situ simulation to support production and maintenance planning. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 64(1), pp.451–454. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.121>.
- Tharumarajah, A., Wells, A. & Nemes, L., 1996. Comparison of the bionic, fractal and holonic manufacturing system concepts. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 9(3), pp.217–226. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/095119296131670>.
- Tiwari, M.K. & Mondal, S., 2002. Application of an autonomous agent network to support the architecture of a holonic manufacturing system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20(12), pp.931–942.
- Torrealba, J.L. & Hernández A., A., 2007. Matriz de medición de desempeño para la función

- de producción. *Scientia Et Technica*, 1(1), pp.363–368.
- University of Hannover, 2000. Holonic Manufacturing Systems Project. Available at: <http://hms.ifw.uni-hannover.de/>.
- Valckenaers, P. et al., 1994. Results of the holonic control system benchmark at KU Leuven. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology*. pp. 128–133. Available at: [http://ieeexplore.ieee.org.lcproxy.shu.ac.uk/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=389083](http://ieeexplore.ieee.org.lcproxy.shu.ac.uk/xpls/abs_all.jsp?arnumber=389083).
- Vernadat, F., 1993. CIMOSA: Enterprise Modelling and Enterprise Integration Using a Process-based Approach. In *Proceedings of the JSPE/IFIP TC5/WG5.3 Workshop on the Design of Information Infrastructure Systems for Manufacturing*. DIISM '93. Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands: North-Holland Publishing Co., pp. 65–84. Available at: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=647134.716795>.
- Vlad, V. et al., 2010. Modeling Holonic Control Systems with IEC 61499 Subapplications and Applications. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 51(2), pp.119–127. Available at: <http://www.eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/9133>.
- Vogel-Heuser, B. et al., 2013. Evaluation of a UML-Based Versus an IEC 61131-3-Based Software Engineering Approach for Teaching PLC Programming. *IEEE Transactions on Education*, 56(3), pp.329–335.
- Vogel-Heuser, B., Bayrak, G. & Frank, U., 2012. *Forschungsfragen in "Produktionsautomatisierung der Zukunft"*, Acatech-Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Acatech, Dt. Akad. der Technikwiss.
- Vogel-Heuser, B. & Hess, D., 2016. Guest Editorial Industry 4.0-Prerequisites and Visions. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(2), pp.411–413.
- Vrba, P. et al., 2011. Rockwell automation's holonic and multiagent control systems compendium. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 41(1), pp.14–30.
- Vyatkin, V., 2014. *IEC 61499 Function Blocks for Embedded and Distributed Control Systems* Third Edit. V. Vyatkin, ed., International Society of Automation.
- Wagner, T., 2003. An Agent-Oriented Approach to Industrial Automation Systems. *Agent Technologies Infrastructures Tools and Applications for E-Services*, 2592, pp.314–328.
- Wang, L., Törngren, M. & Onori, M., 2015. Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, Part 2, pp.517–527. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612515000400>.
- Weiss, G., 2000. *A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence* Ilustrada. MIT press, ed., London, England: MIT press. Available at: <http://books.google.com/books?id=JYcznFCN3xcC&pgis=1>.
- Wooldridge, M. & Jennings, N.R., 1995. Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(2), p.115. Available at: [http://www.journals.cambridge.org/abstract\\_S0269888900008122](http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0269888900008122).
- Wyns, J., 1999. *Reference Architecture For Holonic Manufacturing Systems - the key to support to evolution and reconfiguration*. PhD thesis, Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven.
- Yi-Liang Chen & Feng Lin, 2000. Modeling of discrete event systems using finite state machines with parameters. In *Proceedings of the 2000. IEEE International Conference on*

- Control Applications. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37162)*. IEEE, pp. 941–946. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=897591>.
- Yoong, L.H. et al., 2015. *Model-Driven Design Using IEC 61499 -A Synchronous Approach for Embedded and Automation Systems* L. H. Yoong et al., eds., Heidelberg New York Dordrecht London: Springer. Available at: <http://www.springer.com/us/book/9783319105208#aboutBook>.
- Zapata, C.M. et al., 2014. Transformación de requisitos representados en esquemas preconceptuales a modelos de interacción de sistemas holónicos. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 22(2), pp.233–242. Available at: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-33052014000200009&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052014000200009&nrm=iso).
- Zapata, G., Cardillo, J. & Chacón, E., 2011. Aportes Metodologicos para el Diseño ee Sistemas de Supervisión de Procesos Continuos. *Información tecnológica*, Vol. 22 (3, pp.97–114. Available at: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642011000300012&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642011000300012&nrm=iso).
- Zapata M., G., 2011. *Propuesta Para la Planificación , Programación , Supervisión y Control de la Producción en Procesos Continuos Desde la Teoría del Control Supervisorio y el Enfoque Holónico*. PhD thesis, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes.
- Zapata M., G., Chacón R., E. & Flórez C., H., 2012. Programación de PLC's mediante componentes inteligentes distribuidos, para apoyar el cambio de paradigma en el diseño de estructuras de automatización. In International Society of Automation ISA Colombia, ed. *III (Tercera) Jornada de automatización de la industria petrolera JAIP*. Bogotá, Colombia: International Society of Automation ISA Colombia, pp. 479–490.
- Zhang, D. et al., 2016. Industrial technologies and applications for the Internet of Things. *Computer Networks*, 101, pp.1–4. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S138912861630041X>.
- Zoitl, A. & Lewis, R., 2014. *Modelling Control Systems Using IEC 61499* 2nd Editio. 2001 IET, ed., London, United Kingdom: Institution of Engineering and Technology. Available at: <https://books.google.de/books?id=m3LaTv7VefwC>.
- Zoitl, A. & Strasser, T., 2016. *Distributed Control Applications: Guidelines, Design Patterns, and Application Examples with the IEC 61499* A. Zoitl & T. Strasser, eds., London, New York: CRC Press. Available at: <https://books.google.de/books?id=vTo0CwAAQBAJ>.