

PROPUESTA PARA LA PLANIFICACIÓN,
PROGRAMACIÓN, SUPERVISIÓN Y CONTROL DE
LA PRODUCCIÓN EN PROCESOS CONTINUOS
DESDE LA TEORÍA DEL CONTROL
SUPERVISORIO Y EL ENFOQUE HOLÓNICO

GERMÁN ZAPATA MADRIGAL

TESIS DOCTORAL
PRESENTADA A LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
PARA OPTAR AL TÍTULO
DE DOCTOR EN CIENCIAS APLICADAS

DIRECTOR: DR. EDGAR ALFONSO CHACÓN RAMÍREZ

DICIEMBRE DE 2011



ACTA DE EXAMEN DE TESIS DOCTORAL

I. CONSTITUCIÓN DEL JURADO

En Mérida siendo las 10:00 a.m. del día 02 de Diciembre de 2011.

Se constituyó el Jurado para el Examen de Tesis Doctoral del Candidato/a:

GERMÁN DARIO ZAPATA MADRIGAL

Cumpliendo con los requerimientos exigidos en el Artículo 6 del Reglamento del Doctorado en Ciencias Aplicadas, el jurado quedó conformado de la siguiente manera:

Presidente:

Dr. Addison Ríos Bolívar

Evaluador de la Universidad de Los Andes:

Dr. Iñaki Aguirre

Evaluador de otra Institución

Dr. William Colmenares (Universidad Simón Bolívar)

Miembro invitado:

Miembro invitado:

Tutor:

Dr. Edgar Chacón Ramírez



II. EXAMEN DE TESIS DOCTORAL. MSc. Germán Darío Zapata Madrigal.
CI.N° E-70322905

**“UNA PROPUESTA PARA EL CONTROL DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
CONTINUA DESDE LA TEORÍA DE CONTROL SUPERVISORIO DE SISTEMAS
DE EVENTOS DISCRETOS”**

Calificación (Menciones posibles: Aprobado, Aprobado con correcciones formales,
Improbado con derecho a un nuevo examen, Improbado sin derecho a un nuevo examen)

APROBADO

Observaciones:

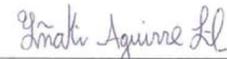
**En el trabajo, hay importantes aportes en el campo industrial y académico, para
desarrollar aplicaciones para planificación y supervisión de procesos basadas en
holones.**

Una excelente defensa a partir de un dominio apropiado del tema.

En Mérida, a las 10:00 am del día 02 de Diciembre de 2011.

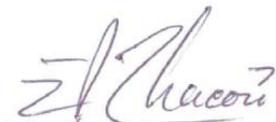
El Jurado:


Dr. Addison Ríos Bolívar
Presidente
Universidad de Los Andes


Dr. Inaki Aguirre
Jurado Interno
Universidad de Los Andes


Dr. William Colmenares
Jurado Externo
(Universidad de Simón Bolívar)

Tutor


Dr. Edgar Chacón Ramírez
Universidad de Los Andes

Resumen

La consolidación de los paradigmas de la manufactura inteligente y distribuida es evidente. Los resultados que se han obtenido en manufactura discreta, orientados a mejorar la respuesta ante cambios y perturbaciones pueden ser llevados a procesos continuos complejos con altos requerimientos de reconfigurabilidad. Dentro de los distintos enfoques que se han presentado, el holónico es el que mayor evidencia muestra de aplicación industrial. En este trabajo se presenta una propuesta de arquitectura para ejecutar las funciones de producción para este tipo de procesos. La planificación, programación, reprogramación y supervisión de la producción se plantean como problemas de control supervisorio y para su solución se hace uso de formalismos de sistemas de eventos discretos como la teoría de autómatas y las redes de Petri.

La misma base teórica empleada permite encontrar expresiones para la formación de holarquías y las métricas para determinar si un sistema es holónico.

Los conceptos planteados se comprueban en un caso simulado de planificación, programación, reprogramación y supervisión en una central térmica de ciclo combinado.

Abstract

The consolidation of the Intelligent and distributed manufacturing paradigms is evident. The results that have been achieved in discrete manufacture, oriented to improve the changes and disturbances response, can be led to complex continuous process with high requirements of reconfigurability. Inside the different approaches that have been presented, the holonic is the one that shows a higher evidence of industry application. An architecture to execute the functions of production for this kind of process is presented in this work. The planning, scheduling, rescheduling and monitoring of the production arise as supervisory control problems and discrete event systems formalisms such as Petri Nets and Automaton theory are used for it's solution.

The same theoretical base used, allows to find expressions for the holarchy molding and the metrics to determine if a system is holonic.

Expressed concepts are tested in a simulated case of planning, programming, reprogramming and monitoring in a combined cycle power plant.

Agradecimientos

Al Dr. Edgar Chacón Ramírez, quien ha inspirado este trabajo y me ha orientado en su realización. Su apoyo, acompañamiento, dedicación, perseverancia y profesionalismo, son un ejemplo digno a seguir para los que estamos comprometidos con la tarea de formar a los futuros profesionales e investigadores. Es realmente un honor y un privilegio trabajar con usted.

A cada uno de los integrantes del Grupo LOCHA, que tanto me ayudaron a que esta idea fuera posible: Adrian, Evelin, Juliana, Juan Esteban, Jorge, Luz Inés, LuisF y Héctor. Cada uno hizo una contribución muy importante que se refleja en los resultados obtenidos y cuyos aportes los pueden ver plasmados en las páginas de este documento. Mi sentimiento de gratitud con ustedes es infinito.

A los demás integrantes del Grupo T&T, a mis compañeros del Grupo GAUNAL y a mis compañeros de la Escuela de Mecatrónica, por las manifestaciones permanentes de apoyo.

A las directivas de la Escuela de Mecatrónica, del Área curricular DTI y de la Facultad de Minas, por el apoyo que me han brindado y por la paciencia institucional que han tenido mientras adelantaba este programa de formación doctoral.

A la ilustre Universidad de los Andes en Mérida, que me ha acogido como su estudiante.

Y a mi Alma Mater, la Universidad Nacional de Colombia, a la que le debo mi formación y mis logros profesionales y académicos.

Dedicatoria

A mi familia, Juan José y Eliana, a quienes tanto tiempo les quité durante estos seis años. Este trabajo va dedicado a ustedes y es finalmente por ustedes. Mi deseo es que el sacrificio tan grande que hicimos, represente una pequeña contribución a esta área de la ingeniería tan apasionante.

Propuesta Para la Planificación, Programación,
Supervisión y Control de la Producción en Procesos
Continuos Desde la Teoría del Control Supervisorio
y el Enfoque Holónico

Germán Zapata Madrigal

21 de noviembre de 2011

Índice general

Resumen	VII
Abstract	IX
Agradecimientos	XI
1. Antecedentes	15
2. Bases teóricas	39
2.1. Sistemas de producción holónicos	39
2.1.1. Procesos continuos	40
2.1.2. El enfoque holónico	44
2.1.3. La unidad de producción holónica	51
2.2. Redes de Petri y la teoría de control supervisorio	62
2.2.1. Teoría de Lenguajes y Autómatas	66
2.2.2. Teoría de control supervisorio desde los sistemas de eventos discretos	72
2.2.3. Redes de Petri como generadoras de lenguajes	78
3. Planificación y programación de la producción	87
3.1. Planificación de la Producción	93
3.1.1. Negociación de la misión	96
3.1.2. Análisis y selección de las configuraciones	99
3.1.3. Formación de holarquías	121

3.2.	Programación de la Producción	130
3.2.1.	Descripción de la Agenda	135
3.3.	Análisis de los resultados obtenidos	151
4.	Reprogramación de la producción	155
4.1.	Esquema de respuesta a las perturbaciones	160
4.2.	Reprogramación de la producción en las holarquías	163
4.3.	Reprogramación de la Producción en el Nivel de la UPH	168
4.4.	Desempeño en tiempo real	170
5.	Supervisión de sistemas holónicos	175
5.1.	Los sistemas de supervisión convencionales	181
5.1.1.	Definiciones	181
5.1.2.	Funciones de supervisión	184
5.1.3.	Supervisión de la dinámica continua	185
5.2.	La supervisión desde el paradigma holónico	197
5.2.1.	Consideraciones de los atributos holónicos	197
5.2.2.	Otras características clave del paradigma para la supervisión .	200
5.2.3.	Comparación entre la supervisión convencional y la supervisión holónica	202
5.2.4.	Arquitectura de supervisión bajo el enfoque holónico	202
5.2.5.	Supervisión de la dinámica continua del holón básico	219
5.3.	Métricas de los atributos holónicos desde la supervisión	221
5.3.1.	Métricas para la autonomía	223
5.3.2.	Métrica para la cooperación	225
5.3.3.	Métrica para la proactividad	226
5.3.4.	Reactividad	227

6. Caso de estudio	233
6.1. Descripción del proceso. Central térmica de ciclo combinado	234
6.2. Definición de holones	238
6.3. Modelo para <i>planificación, programación y reprogramación de la producción</i>	239
6.4. Supervisión	246
6.4.1. Modelo de la dinámica continua	246
6.4.2. Proyección de la dinámica continua	255
6.4.3. Síntesis del <i>supervisor</i>	258
6.5. Descripción del aplicativo desarrollado para el caso de estudio	263
6.6. Descripción fase experimental, ejemplo <i>reprogramación de la producción</i> y presentación de resultados	271
6.6.1. Asignación de misiones en un período de 24 horas	273
6.6.2. Programación de la producción y formación de holarquías	273
6.6.3. Generación de fallas o degradación de la capacidad de los recursos. Reprogramación de la producción	277
6.6.4. Registro de eventos del experimento 1	281
6.6.5. Reprogramación de la producción	281
6.6.6. Validación de la hipótesis	289

Índice de figuras

2.1. Holarquía. Tomado de [80]	47
2.2. Modelo de la UP. Tomado de [81]	53
2.3. Proceso de negocio de producción continua. Tomado de [82]	54
2.4. Relaciones entre componentes básicos	55
2.5. Estructura control supervisorio	74
3.1. Sistema de control jerárquico	88
3.2. Esquema descentralizado	90
3.3. Estructura del holón	91
3.4. Conexiones entre los holones en una UPH	91
3.5. Modelo UML	92
3.6. Niveles de planificación jerárquica. Tomado de [104]	93
3.7. Diagrama de secuencia <i>ContractNet</i>	97
3.8. P-Graph	100
3.9. Modelo PN del producto	101
3.10. Proceso continuo	101
3.11. Grafo del producto	102
3.12. Dinámica discreta del producto representada mediante PN	102
3.13. Modelo del recurso	103
3.14. Modelo de las conexiones	104
3.15. Recursos conectados en serie	105

3.16. Bifurcación asíncrona	105
3.17. Bifurcación Síncrona	106
3.18. Unión Asíncrona	107
3.19. Unión Asíncrona	107
3.20. Dos holones Recurso conectados	108
3.21. Fusión de lugares. Modelo Modular	109
3.22. Fusión de lugares. Modelo Compuesto	110
3.23. Construcción del modelo global	110
3.24. Composición Recurso - Producto	111
3.25. Planta de producción continua	112
3.26. Grafo del producto para la planta continua	112
3.27. Modelo PN del producto	113
3.28. Modelo Global	114
3.29. Árbol de alcanzabilidad completo	116
3.30. Eventos con etiquetas	116
3.31. Envío de ofertas	118
3.32. Marcaje inicial a partir de la oferta	118
3.33. Holarquías en bifurcación asíncrona	124
3.34. Holarquías en bifurcación síncrona	124
3.35. Holarquías en unión asíncrona	125
3.36. Holarquías en unión síncrona	125
3.37. Árbol de alcanzabilidad según ofertas y estado conexiones	129
3.38. Árbol de alcanzabilidad controlable	131
3.39. Árbol de alcanzabilidad controlable y con capacidades	132
3.40. Árbol de alcanzabilidad de misiones factibles	133
3.41. Capacidad de producción	137
3.42. Agenda de Producción diaria	137

3.43. La <i>agenda de producción</i> como sucesión de intervalos constantes . . .	139
3.44. Negociación y optimización en la descomposición de la <i>agenda</i>	140
3.45. Descomposición de misiones entre holones recurso	141
3.46. Autómata G_{mf}	142
3.47. Retardos asociados a recursos conectados en serie	142
3.48. Árbol de alcanzabilidad con retardos	143
3.49. Secuencia de operaciones. Recursos en serie	143
3.50. Trayectorias y secuencias. Bifurcación asíncrona	144
3.51. Trayectorias y secuencias. Unión asíncrona	144
3.52. Secuencias de operaciones	151
3.53. Misiones para los holones	152
4.1. Esquema de respuesta a las perturbaciones	163
4.2. Holarquía H_1	164
4.3. Modelo PN para la holarquía H_1	165
4.4. Árbol de alcanzabilidad de la holarquía H_1	166
4.5. Árbol de alcanzabilidad para una nueva condición operativa	167
4.6. Modelo PN de la UPH con holarquías	169
4.7. Árbol de alcanzabilidad para modelo UPH con holarquías.	170
5.1. Control Supervisado	183
5.2. SCADA y sistema de supervisión	184
5.3. Planta continua controlada	187
5.4. Proyección de la dinámica continua	188
5.5. Partición del espacio de estados	189
5.6. <i>DPN</i> de un sistema continuo	194
5.7. Acciones de Supervisión	196
5.8. Arquitectura de supervisión	205

5.9. Estado del recurso	208
5.10. Estado de la misión	210
5.11. Generador de eventos de la misión	211
5.12. Secuencia de eventos de la misión	214
5.13. Diagrama de bloques diagnosticador	215
5.14. Modelo PN del estado de falla de una holarquía	218
5.15. Propuesta de <i>supervisión</i> para un holón básico	220
5.16. Esquema de <i>supervisión</i> centralizado	220
5.17. Esquema de <i>supervisión</i> distribuido	221
5.18. Estructura de <i>supervisión</i> para el holón básico	221
5.19. Propagación de eventos	222
5.20. Sistemas supervisados	223
5.21. Evento de probable incumplimiento	227
5.22. Operación degradada	228
6.1. Ciclo de la turbina de gas, tomado de [194]	235
6.2. Ciclo de la turbina de vapor, tomado de [194]	236
6.3. Central de ciclo combinado, tomado de [194]	236
6.4. Central térmica en configuración 4x2	237
6.5. Diagrama de conexiones. Central térmica de ciclo combinado en una configuración de 2×1	238
6.6. Definición de holones y recursos en una central térmica	241
6.7. Representación simplificada de la UPH Central térmica de ciclo com- binado	241
6.8. Modelo del producto.	242
6.9. Posibles holarquías	245
6.10. Diagramas del ciclo Brayton de aire estándar	248
6.11. Modelo IEEE. Sistema de control, tomado de [201].	249

6.12. Propiedades térmicas de la turbina, tomado de [201].	250
6.13. Modelo de la turbina de gas en Simulink.	251
6.14. Comparación de respuestas entre modelo reducido y modelo IEEE . .	252
6.15. Regiones de Operación	257
6.16. Proyección discreta de la dinámica continua	259
6.17. Autómata de la planta	261
6.18. Autómata de la especificación para el arranque.	262
6.19. Autómata del <i>supervisor</i> para el arranque.	262
6.20. Autómata especificación cambio de región de operación	263
6.21. Autómata del <i>supervisor</i> para el cambio de región de operación . . .	263
6.22. Vista principal de TERMOLOCHA	266
6.23. Configuración de estados de los recursos.	266
6.24. Edición de parámetros de un recurso	267
6.25. Pestaña para programación de la producción	268
6.26. Pestaña para la Supervisión	269
6.27. Ventana para fallar recursos.	270
6.28. Ventana para degradar recursos	270
6.29. Ventana para añadir una nueva misión a la central.	271
6.30. Formación de holarquías	275
6.31. Misión UPH	276
6.32. Misión Holones y Holarquías	276
6.33. Misiones Holones y Holarquías (Nueva Agenda)	278
6.34. Misiones Holones y Holarquías (Nueva Agenda II)	280
6.35. Misiones Holones y Holarquías (Nueva Agenda III)	280
6.36. Configuración de la central	282
6.37. Modelo PN de la UPH	283
6.38. Árbol de alcanzabilidad. UPH con holarquías	284

6.39. Modelo PN de la holarquía H2 286

6.40. Árbol de alcanzabilidad de H2 287

6.41. Nuevo árbol de la UPH después de la falla 288

6.42. Nuevo árbol de H2 con capacidades después de la falla 289

6.43. Número de eventos registrados para cada una de las arquitecturas estudiadas 292

Índice de cuadros

2.1. Comparación entre procesos discretos y continuos	42
2.2. Funciones de producción	61
3.1. Estados y eventos del modelo	103
3.2. Estados y eventos de las conexiones	104
3.3. Competencias y capacidades de los Holones	111
3.4. Conexiones entre los recursos	113
3.5. Restricciones en las operaciones de los recursos	113
3.6. Configuraciones posibles de la UPH	117
3.7. Lugares del modelo global	128
3.8. Tiempos para secuenciar operaciones	150
5.1. Comparación entre los enfoques de supervisión	203
5.2. Eventos y estados de la dinámica del recurso	207
5.3. Notación estado de la misión	210
6.1. Eventos y estados de la dinámica del recurso	238
6.2. Definición de holones	240
6.3. Conexiones entre los recursos	243
6.4. Restricciones operacionales	245
6.5. Variables continuas del modelo reducido	253
6.6. Parámetros del proceso para el modelo reducido	254

6.7. Alarmas del modelo reducido	254
6.8. Condiciones de operación degradada, falla e indicadores de desempeño	254
6.9. Regiones de operación del espacio de estados	258
6.10. Hipersuperficies y acciones de control para las Regiones de Operación	260
6.11. Misiones-Periodo de 24 horas	273
6.12. Datos de Ingeniería de los holones	273
6.13. Estado inicial de los recursos	274
6.14. Programación de la producción	275
6.15. Reprogramación de la producción I	277
6.16. Reprogramación de la producción II	279
6.17. Reprogramación de la producción III	281
6.18. Resumen - Experimentos realizados	282
6.19. Reprogramación de la producción - Nueva agenda UPH	290
6.20. Registro de eventos - Autonomía - Métrica 1	291
6.21. Registro de eventos - Autonomía - Métrica 2	296
6.22. Número de eventos no controlables en cada uno de los niveles definidos	296
6.23. Registro de eventos - Cooperación Métrica 1	302
6.24. Registro de eventos - Cooperación - Validación 2	305
6.25. Registro de eventos - Proactividad	308
6.26. Número medio de eventos no controlables en cada uno de los niveles definidos	308
6.27. Registro de Eventos - Reactividad	311
6.28. Número medio de eventos controlables y no controlables en cada uno de los niveles definidos	312

Preliminares

Introducción y objetivos

Las organizaciones sociales y biológicas son complejas. Esta complejidad se estructura a partir de las interacciones entre entidades estables más simples, las cuales gozan de autonomía individual, pero respetan unas reglas generales de comportamiento.

El filósofo Artur Koestler [1] definió este tipo de organizaciones como un todo que está formado por entidades subordinadas y a su vez son una parte de una entidad superior que las contiene y propuso el término *holón* para representar estos organismos que son a su vez una parte y un todo.

Su observación también consideró que las organizaciones *holónicas* tienen unos atributos de agilidad, reconfigurabilidad y robustez que las hacen muy hábiles para adaptarse a cambios en el entorno y fueron precisamente estos conceptos los que después fueron llevados a los sistemas de producción, dando origen a los denominados sistemas de manufactura holónicos.

La incertidumbre de los ambientes de producción, caracterizada por demandas variables de los clientes, variabilidad de los procesos, fallas en máquinas, incumplimiento de proveedores, entre otros, ha creado la necesidad de contar con sistemas de control de

producción que sean adaptables a nuevas condiciones y por eso existe una tendencia marcada hacia sistemas con alto grado de flexibilidad operacional y con la habilidad de transformar su estructura interna y tecnológica cuando se requiera. Antecedentes investigativos que se relacionan en este trabajo, más los aportes que se proponen en el desarrollo de esta investigación, indican que el paradigma holónico ha resultado muy apropiado para cumplir con estos requerimientos. La toma de decisiones descentralizada y las características de agilidad y reconfigurabilidad propia del enfoque así lo establecen.

Esquemas convencionales de control jerárquico presentan dificultades para responder adecuadamente a cambios en el ambiente de producción, debido a que en los niveles superiores de toma de decisiones, la visibilidad de las perturbaciones es menor y está sujeta a retardos; sin embargo, su estructura garantiza que se preserven criterios de operación óptimos de todo el sistema. Un esquema alternativo, denominado heterárquico, distribuye las funciones de control en entidades autónomas en las cuales se pierde de vista el cumplimiento del objetivo global y los criterios de optimización de todo el conjunto, aunque mejora notablemente la respuesta a las perturbaciones debido a que cada entidad tiene la capacidad de tomar rápidamente las decisiones sin consultar con entidades de orden superior.

El enfoque de los sistemas de manufactura holónicos guarda un equilibrio entre distribución del conocimiento y las decisiones y la centralización del control y la optimización, combinando adecuadamente los esquemas de control jerárquico y heterárquico, tomando las ventajas de cada uno de ellos. Los holones que conforman un sistema de manufactura holónico se organizan en jerarquías temporales reconfigurables llamadas *holarquías*, mediante las cuales se provee la flexibilidad y adaptabilidad del esquema heterárquico, reaccionando ágilmente a perturbaciones y preservando la estabilidad

del enfoque jerárquico, con capacidades para garantizar estabilidad, predictibilidad y optimización global. Así, el paradigma holónico puede satisfacer requerimientos de flexibilidad y adaptabilidad mientras conserva la estabilidad del sistema global.

Un sistema holónico tiene como atributos básicos: la autonomía, la proactividad, la cooperación y la reactividad. La autonomía se entiende como la capacidad que tiene el holón de establecer y controlar sus objetivos y de tomar decisiones sin consultar a entidades de orden superior; la cooperación lo habilita para colaborar con otros holones que persiguen objetivos comunes; la proactividad, para anticiparse a situaciones que los pongan en riesgo y la reactividad, para responder a los cambios que los afectan.

Se caracterizan también porque su comportamiento está orientado por objetivos, tienen múltiples, complejos y dinámicos dominios de cooperación [2] y responden rápidamente a situaciones que pongan en riesgo el objetivo y se han definido como “*sistemas formados por entidades autónomas que cooperan de manera proactiva para alcanzar objetivos comunes*” [3].

Además de estos atributos básicos, existen otras características que permiten establecer si un sistema es holónico o no, como: son estructuras autosimilares, en el sentido que una arquitectura de control holónica contiene componentes homogéneos, que permite que holones del mismo tipo tengan interfaces y comportamientos similares. Son flexibles y reconfigurables, dado que consideran mecanismos para cambiar los volúmenes, los flujos de producción, las leyes de control, la infraestructura de producción, según los requerimientos de producción y las perturbaciones. Son tolerantes a fallas, ya que reaccionan y se adaptan dinámicamente a eventos adversos durante la operación. Si un holón detecta fallas en su funcionamiento, tiene el conocimiento y la capacidad de decidir cómo adaptar su estructura para acomodarse a la situación de

falla y tratar de cumplir su misión hasta donde sea posible, sin tener que consultar con niveles superiores. Si él no es capaz de resolver la situación, se activan los dominios de cooperación en los que otros holones colaboran para atenderla.

Las principales motivaciones de los grupos de investigación en el tema, han estado orientadas a llevar los atributos y características holónicas a los sistemas de control de producción, tales como la autonomía, cooperación, proactividad, reactividad, autosimilaridad, entre otros. Estos sistemas agrupan las actividades directamente responsables de manejar la transformación de la orden de producción planeada en un conjunto de productos. Gobiernan el planeamiento detallado de corto plazo, la ejecución y el monitoreo de los procesos de preparación y actividades de asignación de recursos necesarios para controlar el flujo de la orden. Incluye la programación reactiva, el lanzamiento de órdenes, la asignación de recursos a las órdenes, planeamiento en línea, carga de parámetros de proceso, recolección de datos y monitoreo del mismo [4]. Además, deben estar concebidos con unas características de desempeño que garanticen robustez para responder ante perturbaciones del ambiente de producción y que estén a su vez integrados con los procesos de planeamiento de largo y mediano plazo y con todas las áreas funcionales de la empresa.

En un sistema holónico estas funciones se descentralizan y así, cada holón tiene la habilidad para planear, programar, supervisar y controlar sus operaciones y las reprograma de acuerdo con los cambios que se presenten. El resultado es una arquitectura reconfigurable, flexible y distribuida que le permite a los procesos productivos acomodarse dinámicamente a nuevos requerimientos.

El mayor volumen de investigaciones se ha dirigido a aplicar los conceptos holónicos en procesos de manufactura discreta y de ahí ha surgido el término *Sistemas de*

Manufactura Holónicas (HMS). Sin embargo, los conceptos de distribución de la inteligencia, autonomía para responder a perturbaciones, cooperación y proactividad son perfectamente aplicables en algunas industrias de procesos continuos en los que se requiere alto grado de reconfigurabilidad [5]. Pueden mencionarse por ejemplo los sistemas eléctricos, tanto de generación como de transmisión y distribución, incluyendo subestaciones; generación de vapor; plantas de tratamiento de agua; los procesos de transporte de material, como gasoductos, oleoductos y acueductos; operaciones de mezcla de crudo, extracción y refinerías en la industria petrolera; centrales de mezclas en la industria alimenticia; laminado de aluminio en la industria metalmeccánica; producción de papel; industria cementera; industria azucarera; procesos de teñido en continuo.

Este tipo de industrias y en general las de procesos continuos no están exentas de las presiones que se imponen actualmente a los sistemas de producción, así que las exigencias de agilidad, flexibilidad y respuesta rápida ante cambios y perturbaciones irán incrementando la necesidad de contar con plantas altamente reconfigurables. En ese sentido, el paradigma holónico resulta promisorio para dar respuesta a esas necesidades.

En este trabajo se hace referencia al término *Sistemas de Producción Holónicos* (HPS), por ser una expresión más general que abarca los sistemas de manufactura discreta, los procesos continuos y por lotes.

Las características y diferencias entre los procesos continuos y la manufactura discreta introducirán necesariamente cambios y distintos requerimientos para la adopción de arquitecturas de control en procesos continuos, basadas en el paradigma holónico.

El flujo continuo de materia prima y producto terminado, la exigencia que las unidades de proceso permanezcan interconectadas para garantizar flujo continuo, las propiedades que se agregan al producto en las unidades de proceso a medida que el flujo cruza por ellas, la inexistencia de almacenes de producto intermedio o producto terminado en algunos de estos procesos, la forma como se concibe y desagrega una orden de producción; son algunas de las diferencias con los sistemas discretos que necesariamente introducirán diferencias conceptuales en las arquitecturas de control holónicas aplicadas a procesos continuos.

En este sentido se ha presentado la propuesta de la Unidad de Producción Holónica (UPH), en la que desde una visión integrada del proceso productivo, se plantea la concepción de la unidad de producción como un holón, en la que un conjunto de unidades elementales o recursos son organizados y configurados de tal manera que permitan realizar los procesos de transformación en la cadena de valor, con el objetivo de obtener los productos requeridos.

La UPH toma sus propias decisiones respecto al cumplimiento de su objetivo, pero está obligada a informar su estado en el cumplimiento de una meta o si ésta no se puede cumplir debido a una falla o errores en su comportamiento. Cada holón que hace parte de una unidad de producción holónica, puede a su vez ser una unidad de producción con los mismos atributos holónicos y la UPH también puede ser un holón de una unidad de producción mayor, cumpliendo así las características de recursividad y auto similaridad del paradigma.

En las investigaciones que dieron origen al concepto de la UPH y en otros trabajos relacionados con las arquitecturas holónicas, la dinámica del sistema de control de la producción se establece como de sistemas a eventos discretos (DES) y coinciden en

establecer que el comportamiento de un holón está influenciado por la ocurrencia de eventos discretos, lo que exigirá dotar al sistema de mecanismos de control manejados desde DES y responder así por sus atributos de reactividad.

El comportamiento global de la UPH o de un HMS resulta de acoplar la dinámica del sistema de control (supervisor) con las dinámicas del proceso y los recursos. La UPH se enfoca en cumplir una meta de producción y esa conducta puede ser formulada como un problema de control supervisorio, en el que una entidad supervisora restringe las acciones del proceso para que alcance los estados deseados y evite llegar a estados prohibidos.

Adicionalmente, los mecanismos de cooperación y la autonomía pueden ser tratados desde DES. La teoría de control supervisorio puede aportar métricas de la autonomía de un sistema, en el sentido que ésta puede ser expresada como la ampliación del espacio de estados en el que un holón puede tomar decisiones y que un sistema será más autónomo que otro si las intervenciones del supervisor, medidas como la longitud de la traza de eventos controlables entre el supervisor y el proceso, son menores.

Por ser sistemas proactivos, cuyo comportamiento está orientado por objetivos, deben también contar con mecanismos de toma de decisiones, que den respuesta a eventos que ponen en riesgo el cumplimiento de ese objetivo.

Otros trabajos que se referencian en detalle más adelante, no necesariamente orientados al paradigma holónico, han abordado funciones de producción, como la planeación, programación, reprogramación, coordinación, supervisión, desde la teoría de control supervisorio (SCT, por sus siglas en inglés) y las resuelven como problemas de alcanzabilidad de estados discretos.

Se puede mencionar por ejemplo, la evaluación de la factibilidad de una orden de producción según la infraestructura, la capacidad y disponibilidad de los recursos; la secuencia de los recursos requeridos y los tiempos de producción; la ausencia de bloques en los acuerdos de cooperación; la coordinación del uso de los recursos cuando se presentan conflictos; la determinación de una ruta óptima para obtener el producto; la selección de una configuración que de terminaciones satisfactorias del producto y que sea controlable; la evolución del objetivo de producción, del estado del holón y de su misión.

En principio, se plantea como hipótesis:

La teoría de control supervisorio de sistemas de dinámicas a eventos discretos puede hacer aportes en la propuesta de una arquitectura para planear, programar, reprogramar, supervisar y controlar las operaciones de procesos de producción continuos, concebida desde el enfoque de las unidades de producción holónicas.

Las estructuras de control diseñadas a partir de los modelos de sistemas a eventos discretos, de la teoría de control supervisorio y del enfoque holónico, pueden ser reconfiguradas dinámicamente, con lo que se logra robustez y respuesta ágil para el rechazo de las perturbaciones propias de los ambientes de producción.

El objetivo general de este trabajo es:

Proponer una estructura de control, supervisión, planificación y programación de sistemas de producción de procesos continuos basada en la teoría de control supervisorio de sistemas dinámicos a eventos discretos y en el enfoque holónico.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Establecer una base teórica unificada para modelar las dinámicas y comportamientos de un sistema de producción, controlado y supervisado aplicando conceptos de la teoría de control supervisorio y los sistemas de eventos discretos.
- Plantear un modelo distribuido de las funciones de planificación, programación y reprogramación para procesos de producción continuos, concebidos como unidades de producción holónicas.
- Proponer un modelo de supervisión para procesos continuos, basado en los conceptos de la inteligencia distribuida y la teoría de los sistemas holónicos.
- Validar experimentalmente la propuesta.

Estos objetivos tienen por propósito dar respuesta a la hipótesis planteada y en ese sentido se estructura iniciando con la revisión de trabajos previos que abordan los diferentes temas considerados en la propuesta.

En el segundo capítulo se presentan las bases teóricas sobre las cuales se fundamenta el trabajo. Una primera parte sobre los sistemas de producción holónicos y la segunda parte sobre la teoría de control supervisorio y las redes de Petri.

En el capítulo tres se propone la estructura holónica para planificar, programar, reprogramar y supervisar la producción en procesos continuos. Estas funciones se describen detalladamente, como parte de la propuesta holónica, en el mismo capítulo y en los capítulos cuatro y cinco. Finalmente, en el sexto capítulo se ilustra un caso de estudio y se presenta la validación experimental de la propuesta.

Aportes

- Se presenta una propuesta de arquitectura para planificar, programar, reprogramar y supervisar la producción en procesos continuos. La propuesta se basa en la concepción de los sistemas holónicos y hace uso de los atributos y características del paradigma para su aplicación específica en procesos continuos.
- Como base formal de modelamiento, se presenta una propuesta unificada para abordar la planificación, programación, reprogramación y supervisión de la producción en sistemas continuos. Estas funciones de producción se expresan como problemas de control supervisorio, lo que permite aprovechar las ventajas de los formalismos de la teoría de autómatas, las redes de Petri y la teoría de control supervisorio, para encontrar soluciones factibles y alcanzables. Adicionalmente la base teórica propuesta facilita la implementación de los algoritmos presentados con tiempos de respuesta apropiados para su aplicación en tiempo real.
- La base teórica utilizada brinda la posibilidad de plantear expresiones formales para establecer la formación de holarquías, como concepto fundamental del paradigma holónico. Se muestran expresiones algorítmicas que hacen uso del árbol de alcanzabilidad visto como un autómata de estados finitos mediante el cual se realiza un análisis a partir del lenguaje generado para llegar a estados de finalización satisfactoria; se establecen las configuraciones y holarquías que están en capacidad de realizar una misión. La reducción de la complejidad del problema de reconfiguración y reprogramación es evidente con la aplicación del principio holárquico.
- Se hacen aportes en la concepción de la supervisión del proceso desde el paradigma holónico. El concepto se fundamenta en la descentralización de la toma de decisiones, la autonomía, la recursividad y la aplicación de la teoría de con-

trol supervisorio. El esquema de supervisión holónico integra los principios de síntesis de supervisores en el espacio de estados discreto a partir de una imagen de la planta continua con los mecanismos de diagnóstico de fallas, los modelos de las decisiones y el monitoreo del estado del recurso y del avance de la misión que tiene asignada.

- En la arquitectura se incluye un esquema holónico de respuesta a las perturbaciones, basado en técnicas de análisis del árbol de alcanzabilidad y vinculado con la estructura de supervisión. La formación de holarquías y la aplicación de los atributos de autonomía y cooperación son fundamentales en la construcción del esquema. La autonomía brinda conceptos orientadores en el sentido que en cada nivel de decisión se deben atender las perturbaciones, evitando al máximo que se propaguen a los niveles de decisión superiores. Las perturbaciones se deben resolver en el mismo nivel de decisión en el que se generan.
- Una exigencia importante que se impone a los sistemas de control y supervisión dentro de la concepción holónica es que además de que el sistema ofrezca la posibilidad de reconfigurar la infraestructura de producción, también debe brindar la reconfigurabilidad de las estructuras de supervisión. Este trabajo hace contribuciones en ese sentido, planteando esquemas de supervisión que se pueden aplicar para generación y selección dinámica de la ley de supervisión, en respuesta a los cambios en las condiciones operativas del proceso.

Otros resultados

- Se ha desarrollado una aplicación informática para la planificación, programación y reprogramación de la producción en centrales de generación térmica. Los modelos y metodología propuesta permiten configurar el sistema para su aplicación en procesos continuos de características similares. Con los respectivos cambios en los modelos y otras consideraciones específicas se puede aplicar en procesos discretos.
- Se elaboró un motor/ejecutor de redes de Petri, basado en la ecuación de estado, el cual puede ser utilizado en múltiples aplicaciones que tengan como fundamento de modelamiento este formalismo. Sobre la base del motor, se pueden desarrollar editores gráficos, simuladores y analizadores de estas redes.

Publicaciones

- [Artículo 1] Zapata Madrigal G, Chacón Ramírez E, Palacio Betancur JE. Intelligent Production Systems Reconfiguration by Means of Petri Nets and the Supervisory Control Theory. In: Aized T, editor. Advances in Petri Net Theory and Application. www.intechopen.com; 2010.
- [Artículo 2] Zapata G, Cardillo J, Chacón E. Aportes metodológicos para el diseño de sistemas de supervisión de procesos continuos. Información Tecnológica. 2011;22:97 - 114.
- [Artículo 3] Henao LFQ, Zapata Madrigal G, Ovalle D. Asignación de Objetivos de Producción mediante un Protocolo de Negociación Basado en Contratos. Revista Avances en Sistemas e Informática. Diciembre, 2009.
- [Artículo 4] Henao LFQ, Zapata Madrigal G, Ovalle D, Chacón Ramírez E. Comportamiento Autónomo del Holón Recurso Basado en la Agenda de Producción. Revista Avances en Sistemas e Informática. Abril, 2009.

Capítulo 1

Antecedentes

El concepto de Holón propuesto por Koestler en 1968, fue aplicado por Suda en 1989 [6] para los sistemas de manufactura. En su trabajo, Suda plantea una propuesta “*plug and play*” para diseñar y operar sistemas de manufactura que combinan el desempeño global óptimo con la robustez frente a las perturbaciones, dando origen a lo que se ha denominado Sistemas de Manufactura Holónicos (HMS) [6].

Como concepto, HMS representa una metodología, herramientas y normas para el diseño de sistemas de control de manufactura flexibles y reconfigurables. Sin embargo, el enfoque holónico también se aplica en la actualidad a otro tipo de sistemas, como tráfico aéreo, salud, defensa [7], energía, telecomunicaciones, robótica, biología, administración y negocios, logística, entre otros [8]. Según lo expresa Mella en su libro “*The holonic revolution*”, lo que inició Koestler fue una revolución conceptual alrededor de los términos *holón* y *holarquía* [8]. Comparado con otros paradigmas que pretenden dotar a los sistemas de producción de agilidad y flexibilidad, como la manufactura biónica o la fractal, el paradigma holónico es el que mayor nivel de desarrollo teórico ha alcanzado y el que mayor número de evidencias muestra de aplicación industrial [9, 10].

Dentro de las evidencias que se han encontrado de la madurez del paradigma holónico para su adopción en la industria, se pueden mencionar empresas que proveen recursos y consultoría en el tema, tales como Holobloc (<http://www.holobloc.com/>), Holonix (<http://www.holonix.eu/>) y Holon.net (<http://www.holon.net/>). Grandes industrias que hacen parte del consorcio HMS y que promueven investigaciones en el tema, tales como DaimlerChrysler, Black&Decker, GM, Mazda, Fujitsu, Dow, LG, Hitachi, Ford. De este consorcio también hacen parte grandes proveedores de tecnología, como Rockwell Automation, Siemens, Honeywell y Microsoft. En el caso específico de Rockwell, esta empresa ha decidido adaptar los conceptos de la manufactura basada en agentes y holones, como línea de investigación de largo plazo y ha destinado recursos de manera sostenida durante los últimos veinte años [7].

Existen normas y recursos de software, como la norma IEC61499 (*Standard model - function block- for control encapsulation and distribution*) [11] o dispositivos de hardware, como HoloCon (*Holonic controller*) o un controlador lógico programable (PLC) holónico con mecanismos de control multinivel reconfigurables basado en los bloques funcionales IEC61499 [12]. Una aplicación específica de un controlador holónico empotrado, basado en IEC61499 se presenta en [13].

La norma internacional IEC61499 se basa en el paradigma holónico y en los sistemas Multi-Agente (MAS, por sus siglas en inglés) [14] y aparece como el esquema de programación que seguramente sucederá a las actuales formas de programación de controladores lógicos programables (PLC), normalizados en el estándar IEC61131 [7].

El uso de IEC61499 por parte de la comunidad de sistemas holónicos se motiva en que esta norma es apropiada para el control manejado por eventos, los cuales están explícitamente representados en los modelos de los bloques funcionales, permitiendo

el control de sistemas que son concurrentes, asíncronos y distribuidos [15]. La norma provee un modelo semántico formal, para lo cual utiliza formalismos derivados de la teoría de autómatas y redes de Petri, tales como cartas de control de ejecución de eventos (ECC) y redes Condición/Evento [16].

Se referencian también algunos trabajos sobre aplicaciones del paradigma: un sistema holónico de limpieza superficial por impacto, en el que dos robots autónomos cooperan para realizar sus tareas [17]; el proyecto Holomobiles, realizado sobre una línea de ensamblaje en la industria automotriz [18] y un sistema de diagnóstico holónico para una planta de ensamblaje en Australia [19].

En [20] se presenta un sistema holónico de programación de la producción, para un sistema de almacenamiento de datos industrial automatizado y en el proyecto de DaimlerChrysler que se relaciona en [21], se demuestra que la aplicación del enfoque holónico resulta en mejoras significativas en productividad y robustez en la línea de ensamble de motores.

Con respecto a conferencias internacionales y publicaciones recientes, en los últimos eventos HOLOMAS (*4th and 5th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent systems, 2009 - 2011*) se destacan aplicaciones en líneas de pintura, comunicaciones y control de tráfico [22] y en celdas de ensamblaje flexibles [23]. En [15] se relacionan aplicaciones exitosas en dominios comerciales, como tráfico aéreo, salud, protección ambiental, defensa y misiones humanitarias.

Los resultados de veinte años de investigaciones por parte de Rockwell Automation en el tema de holones y agentes en manufactura se presentan en [7], las que incluyen automatización de embarcaciones, fabricación de semiconductores; robots de ensam-

ble, fabricación de acero, sistemas de manejo de materiales, plantas de tratamiento de aguas. La principal característica de estos desarrollos es que presentan una plataforma coherente de metodologías para diseñar sistemas basados en holones y agentes y herramientas que soportan la implementación y validación. Estas metodologías integran las nuevas técnicas con las arquitecturas convencionales para automatización y control representadas fundamentalmente mediante controladores lógicos programables. En la misma publicación se presenta como elemento básico de la arquitectura holónica de Rockwell, denominada *plantilla de agente holónico*, la cual es una clase en el sentido del diseño orientado por objetos, que representa un agente de manufactura dentro de dicha arquitectura y fue implementada en los PLC de la serie ControlLogix.

Se relacionan a continuación las principales arquitecturas holónicas que se han propuesto dentro de los diferentes desarrollos investigativos.

Arquitecturas propuestas

PROSA

La primera arquitectura general de un holón fue propuesta por Christensen [24]. Es también el primer trabajo en el que se menciona que el holón tiene una parte física y una parte de procesamiento. La parte de procesamiento incluye el hardware que ejecuta las operaciones de manufactura y los sistemas de control. La parte de procesamiento contiene el sistema de toma de decisiones y las interfaces con otros holones y con humanos.

Otro trabajo que siempre es referenciado, por ser una propuesta también precursora, es el presentado por Jo Wyns en 1999 [25], denominada PROSA: *Product - Resource - Order - Staff Architecture*. Esta arquitectura brinda las bases para el diseño, de-

fine la terminología, presenta los componentes y sus responsabilidades dentro de la arquitectura y también da ejemplos de implementaciones en casos de prueba. PROSA está compuesto básicamente por tres holones básicos: Producto, Recurso, Orden y un cuarto holón opcional denominado *Staff*. Estos holones son especificados siguiendo conceptos de la programación orientada por objetos, tales como agregación y especialización. Sus responsabilidades cubren los principales aspectos del control de manufactura, planeamiento relacionado con productos y procesos, recursos y tareas de manufactura. Incluye el planeamiento reactivo, el lanzamiento de órdenes, la asignación de recursos a las órdenes, el planeamiento del proceso en línea, la recolección de datos y el monitoreo. El holón *Staff* ayuda a los holones básicos con la visión global del sistema y puede entregar planes óptimos para situaciones especiales de manufactura. Es importante en PROSA la presentación de los conceptos propios de los holones: generalización, especialización, autosimilaridad.

Con respecto a la flexibilidad del sistema de control, mediante la formación de holarquías temporales, PROSA establece que los escenarios mixtos, que combinan jerarquías con heterarquías son más óptimos. Por ejemplo, en caso de recursos cuello de botella es preferible la estructura jerárquica y aplicar control heterárquico a los otros recursos para optimizar costos o darles la habilidad de planear su trabajo. Recientemente, PROSA agrega capacidades de auto organización tomadas de sistemas biológicos y denomina a su arquitectura PROSA + ANTS [26].

Holobloc

En 1994, la empresa minera BHP Billiton y Rockwell Automation [27] realizaron un estudio para verificar la viabilidad y eficiencia de los HMS, a partir de una arquitectura que hacía énfasis en las propiedades de cooperación y autonomía como medio para lograr un sistema flexible y modular. Como resultado de la investigación, se propone

una arquitectura en la que el enfoque del auto diagnóstico es fundamental para el comportamiento autónomo. El diseño de un sistema holónico consta de una colección de holones, cada uno de los cuales está compuesto por una arquitectura estándar que consta de un conjunto de componentes funcionales: procesamiento, negociación, seguimiento, programación, base de datos, configuración, diagnóstico, recuperación. Los criterios importantes encontrados son los atributos claves de cooperación y autonomía.

MetaMorph

Otra propuesta contemporánea es MetaMorph. La característica principal de los sistemas basados en MetaMorph [28] es su forma y estructura dinámica, ya que se adapta a tareas emergentes y ambientes cambiantes. La arquitectura utiliza el concepto de dominio de cooperación de Deen y Fletcher pero lo llaman *cluster virtual dinámico* [2]. A diferencia de PROSA, en MetaMorph los tipos de holones primarios o básicos son: holones producto, holones de modelo de producto y holones recurso. Un holón producto es dual, por una parte consta de un componente físico y por otra, almacena información acerca del estado del proceso de los componentes del producto durante la fabricación. Un holón de modelo de producto almacena información sobre configuración, diseño, plan de proceso, materiales, calidad, ciclo de vida del producto, etc. Los holones recurso son utilizados para representar dispositivos - operaciones de fabricación. La coordinación y la auto-organización se implementan mediante los *clusters virtuales dinámicos*. Utilizando este mecanismo, los holones pueden participar dinámicamente en diferentes *clusters* (holarquías) y cooperar a través de dominios de cooperación. Los holones primarios cumplen la misma función que los holones coordinadores de Deen y Fletcher y se utilizan como administradores de los *clusters* para coordinar la interacción entre holones. El *cluster* existe hasta que la tarea de cooperación haya sido completada.

Holonic Control Device

Brennan y Norrie [29] proponen una arquitectura holónica basada en agentes (*HCD - Holonic Control Device*), usando agentes en la capa deliberativa y bloques funcionales para el control de la parte física. Estos bloques funcionales dieron origen a la norma IEC61499, cuyo propósito es brindar un enfoque general para la configuración dinámica e inteligente en tiempo real de sistemas de control de manufactura distribuidos. La capa deliberativa tiene dos propósitos: funcionalidades específicas del dominio y funcionalidades genéricas, entre las que se encuentran el planeamiento, control de la ejecución, modelos del proceso y módulos de diagnóstico.

INTERRAP

El grupo del Centro Germano de Investigación para la Inteligencia Artificial (DFKI) ha desarrollado una arquitectura basada en agentes para la implementación de los sistemas holónicos [30]. El grupo del DFKI se ha basado completamente en la arquitectura de tres niveles concurrentes INTERRAP de Müller [31]. En ella, la composición y configuración de las estructuras de la holarquía se realiza dentro del nivel de Planificación Cooperativa (CPL) que provee las funcionalidades para la comunicación, negociación y administración de las estructuras holónicas. Define un modelo por capas, manteniendo una estructura jerárquica entre capas y una estructura horizontal cooperativa entre los componentes de la misma capa. Han utilizado esta arquitectura en dominios de aplicación tales como: Supply Webs, HMS, Logística en Empresas Virtuales y Fuentes de Información basadas en Agentes.

En INTERRAP [30], K. Fisher empleó agentes de manufactura para apoyar el control de manufactura holónica. Un conjunto de capas funcionales en los agentes son definidas y conectadas por una comunicación basada en una estructura de control y una cuota jerárquica de comportamiento base. El autor advierte una estructura

empotrada en tipos de agentes iguales como en la estructura general de control. Esto clarifica el concepto de auto similaridad estructural del holón y verifica hasta cierto punto la posible aplicación de una arquitectura holónica genérica en HMS.

Holonic Component Based Architecture (HCBA)

La arquitectura HCBA (*Holonic Component Based Architecture*) [32–34] desarrollada en Cambridge se deriva de los conceptos de CBD (Desarrollo Basado en Componentes) y HMS. Se basa en dos tipos fundamentales de holones: producto y recurso. El sistema de fabricación se construye a partir de estos dos tipos de holones, con lo que se obtienen estructuras anidadas de productos y recursos.

El software del control de HCBA es diferente en estructura si se compara con las arquitecturas convencionales. En este nuevo enfoque se establece una arquitectura que puede formar dinámicamente un controlador de manufactura virtual a través de una red de computadoras según el requisito inmediato. Además, los componentes del sistema pueden ser proporcionados por fuentes diferentes para aplicar el concepto de diseño e integración concurrente y distribuida. La formación del conjunto de componentes de los recursos es llamada integración estática porque no hay interacción entre holones en esta etapa. De ahí, un holón recurso puede ser reemplazado o puede ser agregado fácilmente, sin causar un efecto global en la arquitectura.

ADACOR

La arquitectura ADACOR (*Adaptive Holonic Control Architecture*) [35], presenta el enfoque holónico para introducir adaptación dinámica y agilidad frente a perturbaciones. La arquitectura se basa en un grupo de entidades autónomas, inteligentes y cooperativas para representar los componentes de la fábrica. Agrupa los holones en Holón Operacional (OH), Holón Tarea (TH), Holón Producto (PH) y Holón Super-

visor (SH). El PH contiene todo el conocimiento del producto y es responsable del proceso de planificación. Cada orden de producción se representa por un TH, que es responsable del control y supervisión de la ejecución de la orden. También es responsable del plan de asignación de recursos. Los recursos físicos de producción son representados mediante el OH. Este holón gestiona el comportamiento de los recursos de acuerdo a sus objetivos, restricciones, capacidades y competencias, siempre optimizando su agenda. El supervisor realiza tareas de coordinación y optimización global. ADACOR introduce un control adaptable que equilibra dinámicamente una estructura centralizada y una descentralizada, permitiendo combinar la optimización global de la producción con la reacción ágil ante perturbaciones inesperadas.

Es importante destacar en esta propuesta, el modelado de las dinámicas de los holones mediante redes de Petri.

En términos generales, existe mucha similitud entre los holones descritos por PROSA y los propuestos por ADACOR.

HoMuCS

Una arquitectura que puede ser comparada con PROSA y ADACOR es HoMuCS (*Holonic Multicell Control System*) [36], ya que ésta define los holones básicos en los mismos términos que lo hace PROSA. Presenta una descripción funcional a partir de diagramas del lenguaje de modelado IDEF0 (Integration DEFinition) y define una arquitectura aplicable a pisos de producción (*shop floor control*), a partir de PROSA. En HoMuCS son importantes los aspectos de implementación, como por ejemplo, la definición de objetos, la agregación y la especialización de los holones. Según esta propuesta, un sistema holónico puede existir, cuando por lo menos una instancia de los bloques básicos (holones) existe. Tal sistema, sin embargo, puede contener un

gran número de holones y puede ser controlado heterárquicamente. Una holarquía se obtiene por agregación y especialización de los bloques básicos. El holón *Staff* se introduce cuando se requiere control heterárquico. Esto permite atender varias estructuras jerárquicas.

HOLONIC BASED CONTROL SYSTEM

En Virginia Polytechnic Institute, Babiceanu [37] presenta la arquitectura *HOLONIC BASED CONTROL SYSTEM*, que está enfocada a sistemas automatizados de manejo de materiales y presenta cinco holones, tres de ellos asociados a recursos (máquina, transporte de materiales y equipos), uno asociado a órdenes de producción y otro asociado a funciones de supervisor (*Global Scheduler-GS*). Para conocer el número de tareas, la disponibilidad de recursos en el sistema y para guardar los registros de tareas ya ejecutadas, existe otra entidad que es llamada Sistema de Monitoreo y Base de datos (SMD). Esta entidad no tiene poder de decisión, más bien es un sistema de almacenamiento de datos para las órdenes de trabajo ya terminadas y actúa como un monitor de disponibilidad de los recursos en el sistema. Se comunica con todas las entidades y transmite la disponibilidad de los recursos al Holón Orden y al GS.

ANEMONA

Con respecto a la aplicación de sistemas Multi-Agente (MAS) en los sistemas holónicos, se presenta la propuesta de ANEMONA [38], la cual, más que una arquitectura, es una metodología para el diseño mediante agentes. Presenta el concepto de “*agente abstracto*” como un intento de unificación de los conceptos de agente y holón y de simplificación de las etapas de análisis y diseño. Esta metodología hace uso de las Guías PROSA para definir la arquitectura holónica.

MaSHReC

Una propuesta que incorpora restricciones estrictas de tiempo real se presenta en [39, 40] la cual se ha denominado MaSHReC (*Manufacturing System under Real-Time Constraints*). La propuesta se basa en un sistema reactivo dirigido por eventos, donde el proceso de producción es lanzado por la llegada de órdenes. En este trabajo se adaptan los resultados de las investigaciones en teoría de planificación de tareas en sistemas operativos a la planeación y control de la producción. La producción de partes en MaSHReC puede ser fácilmente interrumpida si otra parte concurrente mucho más crítica llega. Es conveniente en la mayoría de casos describir el modelo fundamental con el formalismo de un sistema de transición. Las máquinas de estados finitos del Lenguaje Unificado de Modelado (UML) son un ejemplo de un sistema de transición que es particularmente adecuado para sistemas sumamente concurrentes de tiempo real.

HOMASCOW

Para resolver las dificultades de los sistemas basados en agentes para atender criterios de optimización global, Adam propone una arquitectura híbrida basada en agentes y holones, la cual denomina HOMASCOW (*Holonetic Multi-Agent systems for Cooperative Work*) [41].

El concepto de Sistemas Holónicos Multi-Agente ofrece un buen compromiso entre la distribución del conocimiento y la centralización del control, y entre respuesta rápida y optimización global.

Holones en producción continua

El mayor volumen de investigaciones y aplicaciones, como se muestra en los trabajos referenciados, se centra en los sistemas de manufactura. Realmente son pocos los trabajos en los que el enfoque holónico se ha aplicado en la industria de procesos continuos.

Sin embargo, estas industrias no se escapan de las exigencias que imponen los mercados de hoy. Las tendencias de personalización de la producción en masa, tiempos rápidos de respuesta, ciclos de vida más cortos de los productos, uso eficiente de los recursos y de la energía, obligan a la industria de procesos a considerar aspectos como flexibilidad, agilidad, reconfigurabilidad, descentralización e integración.

Como referencias de aplicación del enfoque holónico en procesos continuos, pueden mencionarse los trabajos de [5, 27, 42–45], quienes mencionan que los principales trabajos son realizados por grupos orientados a la automatización de industrias químicas, específicamente para planificación y programación de la producción.

Dentro del proyecto IMS (*Intelligent Manufacturing Systems* - www.ims.org), en 1994 el grupo de Duncan McFarlane, en asociación con BHP y Rockwell, proponen un caso de prueba para aplicar el paradigma holónico en el sistema de enfriamiento para la producción de acero [27, 44]. La arquitectura resultante fue simulada para ilustrar los beneficios del enfoque holónico sobre enfoques convencionales.

Se propuso una arquitectura genérica y luego se aplicó a este caso específico de producción continua. Las propiedades de autonomía y cooperación son los ejes centrales y la aplicación específica refleja estos principios subyacentes. En el proyecto también se determinan un conjunto de métricas para evaluar el desempeño del sistema holó-

nico. El proyecto IMS considera incluir los conceptos holónicos tanto en manufactura discreta como en procesos continuos y por lotes [46].

En [43] se establecen las propiedades que debe poseer una arquitectura para el control e integración de procesos continuos en los actuales ambientes competitivos, como son, el manejo de una complejidad estructurada, la auto organización y la distribución de las decisiones. Igualmente el sistema de control debe ser descentralizado, auto adaptivo y dinámicamente integrado.

Un trabajo más reciente de estos autores centrado en sistemas de producción reconfigurables distribuidos, se presenta en [5, 42], en el que se establece que para los procesos continuos también es fundamental contar en la actualidad con la habilidad del proceso de reorganizar su estructura de producción y las leyes de control, para adaptarse a los cambios. El nivel de reconfigurabilidad de los sistemas de control es especialmente exigente en los niveles bajos de la jerarquía, en los que la visibilidad de las perturbaciones es mayor. La propuesta de los autores para un sistema reconfigurable y distribuido se basa en los conceptos de los sistemas holónicos y del manejo de cadenas de suministro. En la arquitectura se distribuyen las funcionalidades de control del proceso en varios elementos reconfigurables, con los cuales se hace una analogía con el concepto de *empresa virtual*, para definir la composición de estos elementos y sus operaciones.

Es importante mencionar también el trabajo de [47], que muestra una aplicación interesante en un sistema de control supervisorio y adquisición de datos (SCADA) de un acueducto, en el que el elemento central es la cooperación entre agentes predictivos, implementados mediante *terminales distribuidas inteligentes*. Muchos de los conceptos aplicados pueden ser planteados desde el enfoque holónico.

El grupo de la Universidad de los Andes de Venezuela ha propuesto el concepto de la Unidad de Producción Holónica - UPH, en la que los principios de los sistemas holónicos son llevados a los procesos continuos. Algunos de los trabajos relacionados se encuentran en [45, 48–54]. En esta propuesta, desde una visión integrada del proceso productivo, se plantea la concepción de la unidad de producción como un holón y las técnicas de representación deben permitir entender las relaciones entre los diferentes componentes y para cada uno de ellos, su representación gráfica, los atributos de capacidad, disponibilidad, confiabilidad, evolución de la dinámica.

La UPH se concibe como la composición de un conjunto de unidades elementales o recursos que son organizados y configurados de tal manera que permitan realizar los procesos de transformación en la cadena de valor, con el objetivo de obtener los productos exigidos. La UPH toma sus propias decisiones respecto al cumplimiento de su objetivo, pero está obligada a informar su estado en el cumplimiento de una meta o si ésta no se puede cumplir debido a una falla o errores en su comportamiento.

Se proponen tres holones: Misión, que describe el objetivo de producción; Recurso, que describe los componentes necesarios para obtener el producto; e Ingeniería, que describe el conocimiento necesario para obtener los productos.

Holones y DES

Las técnicas de DES han sido empleadas en algunos trabajos relacionados con los sistemas holónicos o afines, como los sistemas Multi-Agente o sistemas distribuidos, en algunos casos para modelar las dinámicas, en otros para modelar funciones de control de producción y en otros para probar propiedades de desempeño.

El comportamiento de la UPH se plantea desde la teoría de control supervisorio (SCT) en [54], donde se describe su dinámica como un sistema de eventos discretos (DES). El comportamiento global de la UPH resulta de acoplar el comportamiento del sistema de control (supervisor) y el comportamiento del proceso y los recursos. Cada componente de la UPH es modelado mediante una red de Petri (PN).

De esta manera, el comportamiento de una UPH, enfocado en cumplir una meta de producción, puede ser formulado como un problema de control supervisorio, en el que una entidad (supervisor) restringe el comportamiento del sistema para que alcance unos estados deseados.

En [55] se presenta una base teórica unificada fundamentada en la teoría de DES para modelar interacciones entre agentes, mediante composición de PN, en las cuales se considera el ambiente de los agentes, las metas, descompuestas como tareas, los métodos para ejecutar las tareas y las acciones sobre el ambiente como resultado de las tareas.

El método hace uso de SCT mediante PN, en el sentido que todas las interacciones entre los agentes se obtienen analizando el espacio de estados generado por la ejecución de la PN y mediante la especificación de estados no deseados como bloqueos, un módulo supervisor elimina las interacciones que llevan a esos estados. Se concluye en el trabajo, que las redes temporizadas (*timedPN*) permiten modelar diferentes niveles de complejidad de agentes y sus metas, posibilitan el diseño modular, integran la variable tiempo y permiten la evaluación cualitativa. Adicionalmente, se establece que el estado global del sistema se obtiene mediante la composición de estados discretos de los subsistemas y que la evolución del estado se logra a partir de la ocurrencia de eventos, lo cual concuerda con lo planteado en [45].

En otro trabajo, presentado por Celaya, el desarrollo de bases teóricas para asegurar las propiedades de un sistema Multi-Agente, es crítico. Estos sistemas se pueden considerar como de eventos discretos y utiliza las PN para modelar las interacciones y para garantizar que las propiedades estructurales de estas interacciones se cumplen. Se evitan los bloqueos del sistema Multi-Agente, evaluando las propiedades de no bloqueo y acotamiento [56].

Según Balasubramanian [57], el control en tiempo real de sistemas holónicos requiere propuestas radicalmente diferentes, ya que deben adaptarse automáticamente y reconfigurarse de acuerdo con los siempre cambiantes requerimientos del sistema de producción. Presenta la arquitectura para sistemas dinámicamente reconfigurables, basada en IEC 61499 y en una estructura de niveles de control manejada por eventos. El comportamiento dinámico del sistema puede ser descrito mediante la ocurrencia o no ocurrencia de eventos, lo que le impone a los sistemas de control holónicos, la necesidad de contar con mecanismos de control manejados por eventos discretos.

El modelado de las dinámicas holónicas, como se propone en ADACOR, requiere una herramienta que capture características como concurrencia o paralelismo, recursos compartidos o conflictos, operaciones asíncronas, bloqueos, que son inherentes en los sistemas de manufactura [35, 58]. Además, es crucial que el modelo disponga de la capacidad de validar las características del comportamiento, así como analizar otros aspectos, como detección de bloqueos y análisis del desempeño. Básicamente, estas características son propias de los sistemas de eventos discretos.

Fernando Ramos en [59] define un sistema cooperativo Multi-Agente que integra datos y procedimientos trabajando de una forma cooperativa mediante el intercambio

de información, para alcanzar una meta común. Los sistemas tienen mecanismos de comunicación, interacción, coordinación y cooperación. Para su modelado se reseñan trabajos en lógicas de primer orden, diagramas estado/transición, redes de Petri condición/evento, en las cuales, la representación de las interacciones se torna compleja para sistemas con múltiples interacciones. La herramienta debe considerar: capacidad de manejar múltiples interacciones, base formal, adaptabilidad para diversos dominios de aplicación. El trabajo presenta un modelo de la negociación entre agentes mediante redes de Petri coloreadas (CPN), lo cual permitió modelar fácilmente el estado de las interacciones y su comportamiento, representar fácilmente diferentes mensajes simultáneos y simular las dinámicas de las interacciones.

Con respecto a mecanismos de coordinación entre agentes, [60] presenta mecanismos de coordinación, modelados mediante PN, para sistemas de flujos de trabajo *multi-workflow*. El gran reto de proponer mecanismos de cooperación para controlar una actividad cooperativa, es lograr la flexibilidad demandada por el dinamismo de la interacción entre los partícipes (agentes).

Una extensión incluso de PN con capacidad de modelar los mecanismos de colaboración y coordinación se presenta en [61], en la cual las PN autónomas se aumentan con el denominado “*ContractNet protocol*”, combinando los resultados de las PN temporizadas y las arquitecturas Multi-Agente, creando una herramienta muy poderosa para modelar las dinámicas de los procesos holónicos. Los mecanismos de interacción entre holones también son modelados mediante PN por el grupo PMA de K.U. Leuven [4].

En un trabajo posterior del mismo autor [62], se establece una fusión de las PN con *ContractNet*, dada la dificultad de este protocolo para evitar estados no deseados, como bloqueos en manufactura holónica. Se combinan las capacidades de modelado

y análisis de las redes de Petri con *ContractNet* para distribución de tareas entre holones y se proponen las denominadas Redes de Petri colaborativas. Cuando llega una orden de producción, se construye una PN colaborativa, basada en resultados del proceso de negociación. Una vez finaliza la orden, la PN se destruye.

El procesamiento completo de las órdenes se plantea como un problema de control supervisorio, dado que diferentes órdenes deben competir por recursos limitados y se generan situaciones de conflicto que deben ser resueltas mediante coordinación de las PN. La condición de *vivacidad* (no bloqueo) debe ser garantizada para facilitar la factibilidad de los acuerdos.

Con respecto a la cooperación entre holones, Saint-Voirin [63], menciona que un sistema cooperativo necesita definir objetivos a ser alcanzados por el grupo, asignar tareas y resolver conflictos, desacuerdos y redundancias tanto como sea posible; ejecutar tareas con sincronización y convergencia de las metas a ser alcanzadas. La cooperación, planteada como un problema de sincronización de recursos y metas, puede ser expresada desde SCT.

Las funciones de control de producción en sistemas holónicos también han sido resueltas desde la teoría de control supervisorio o desde técnicas de eventos discretos. Bongaerts [4], presenta un modelo de PN para programación concurrente de la producción y para ejecución de la programación de acuerdo con el concepto de reprogramación periódica basada en eventos. El modelo considera secuencias, paralelismos y temporizaciones de las interacciones y las tareas. Mediante análisis de los aspectos temporales de los modelos en PN, es posible calcular los tiempos de respuesta de cada holón frente a perturbaciones. Los mecanismos de interacción incluyen comunicación, negociación y cooperación.

Según Wyns [25], las investigaciones académicas en control de DES ayudan a generar controladores máximo permisivos, que aseguren la utilización completa de los recursos.

Estos controladores no imponen restricciones innecesarias con respecto a estados prohibidos y la controlabilidad de transiciones de estado.

Posteriormente, Hsieh, [64], propone una arquitectura de dos capas basada en *ContractNet* para planear holones Orden, Producto y Recurso. Para determinar si es factible que el conjunto de holones Producto y Recurso cumplan los requerimientos de la Orden, se propone un modelo en PN de los flujos de trabajo y actividades en estos holones. Los modelos de PN se obtienen a partir de la composición de los modelos de los holones Producto y Recurso.

Sobre programación de la producción en sistemas holónicos, mediante PN también se puede referenciar el trabajo de Ciufudean [65], en el que se presenta una propuesta basada en este formalismo para obtener un programa de producción óptimo en sistemas de manufactura holónica con dinámicas discretas, en el que se maximiza la salida de producto y se minimiza el inventario de trabajo en proceso.

Las características propias de los modelos en PN han llevado a muchos autores a plantear la programación y reprogramación de la producción como problemas de control supervisorio [9, 66–69].

Desde esta teoría, debe encontrarse una combinación factible de los recursos en el tiempo que satisfaga un objetivo. Para ello se sintetiza un supervisor mínimo restrictivo que hace que el sistema sincronice la óptima utilización de recursos por parte de

los productos, garantizando las especificaciones de comportamiento y la alcanzabilidad del objetivo, evitando que el sistema caiga en estados de bloqueo o que llegue a estados prohibidos.

La supervisión del proceso en una arquitectura holónica como ADACOR es llevada a cabo por un Holón Supervisor, cuyo comportamiento es modelado mediante una red de Petri. Este holón es responsable de la formación de grupos (holarquías) y su coordinación. Adicionalmente, introduce optimización global en sistemas distribuidos [35]. De acuerdo con lo planteado, la coordinación entre recursos también puede ser resuelta desde la teoría de control supervisorio.

Fortalezas y debilidades de los desarrollos actuales

Se destacan a continuación fortalezas y debilidades de algunos de los desarrollos que tienen vigencia en la actualidad. Especialmente el caso de PROSA, dado que es la arquitectura más ampliamente utilizada en procesos de manufactura y por que presenta en la actualidad avances importantes en reconfigurabilidad. Igualmente se analizan arquitecturas más recientes como ADACOR y HCBA. Estas tres arquitecturas aplicadas en procesos de manufactura. En aplicaciones en la industria de procesos continuos, se analiza la unidad de producción holónica.

Se resalta de PROSA, el desacople que hace de la estructura del sistema de control y los algoritmos de control. lo que la hace muy apropiada para el diseño de sistemas complejos. Esta característica hace que se reduzca el impacto en la toma de decisiones debido a la separación de conceptos. Por ejemplo, cambios de decisiones en aspectos de asignación de recursos no deben afectar cambios en aspectos logísticos [70].

Para el diseño de sistemas complejos también son de resaltar los aportes mediante las propuestas de agregación, especialización y autosimilaridad. El alto grado de autosimilaridad que presenta PROSA, reduce la complejidad para integrar nuevos componentes al sistema de producción, facilitando ampliamente la reconfigurabilidad [71].

Otra fortaleza de la propuesta es la combinación apropiada que presenta de los enfoques heterárquico y jerárquico. Algoritmos de control heterárquico pueden ser implementado utilizando los holones orden y recurso. Cuando se agrega el holón *Staff* se pueden implementar algoritmos jerárquicos y algoritmos que combinan ambos enfoques, lo cual es una característica inherente del paradigma holónico.

Como desventaja, los algoritmos de asignación de recursos no son abordados directamente en PROSA. Sin embargo trabajos posteriores que se basan en esta arquitectura los abordan entre otros Bongaerts [4].

En prosa se presenta un marco general para el control de procesos de manufactura desde el enfoque holónico, sin embargo no se aportan muchos elementos para su implementación.

Con respecto a ADACOR, se presenta como fortaleza la descripción detallada de las entidades independientes y cooperativas representadas como holones, destacando la habilidad para distribuir competencias y conocimiento del sistema en estas entidades. Caracteriza también de manera muy detallada, el comportamiento dinámico de cada una de estas entidades, representándolo mediante redes de Petri. ADACOR introduce una propuesta de control adaptable que evoluciona en el tiempo para combinar optimización global y respuesta a perturbaciones, siendo el holón supervisor, la au-

toorganización de los holones que se proponen y las capacidades de aprendizaje de estos, los conceptos clave de la propuesta [72].

La combinación entre el enfoque heterárquico y el jerárquico es muy similar a la que presenta PROSA, profundizando en el comportamiento dinámico del holón Supervisor, que de manera similar a lo presentado por el holón *Staff* de PROSA, garantiza optimización global.

Con respecto a debilidades, se presentan limitaciones para la elaboración de modelos de las dinámicas discretas mediante redes de Petri de bajo nivel, cuando aumenta la complejidad del sistema.

La arquitectura HCBA tiene como principal fortaleza que se ha esforzado en habilitar una migración suave entre las arquitecturas normalizadas de hardware disponibles y las necesidades para la implementación del control holónico. Para ello se basa en la tecnología de componentes de software, en bloques funcionales y en la reusabilidad de componentes [73]. Este concepto es utilizado como guía para minimizar el acople entre holones Recurso y de esta forma, una nueva máquina puede ser introducida fácilmente al sistema de producción, como un nuevo componente HCBA. Sin embargo, no presenta una estructura clara para la supervisión de los componentes.

Conclusiones

- El volumen de investigaciones y producción científica que reportan las comunidades académicas e industriales, las aplicaciones que se presentan y la disponibilidad de recursos tecnológicos (PLC, plantillas, normas de programación, arquitecturas), evidencian la consolidación del paradigma holónico y de la in-

teligencia distribuida como nuevas formas de concebir los sistemas de control y automatización de la producción.

- Múltiples arquitecturas se han propuesto, especialmente dirigidas a los sistemas de manufactura discreta, entre las cuales se puede mencionar PROSA, que por su naturaleza genérica sentó las bases para muchas de las arquitecturas holónicas que siguieron. En la actualidad se tienen enfoques hacia arquitecturas emergentes, apoyadas en sistemas reconfigurables, como la arquitectura HCBA (*Holonic Component Based Architecture*).
- En producción continua el volumen de producción científica es mucho menor y se cuenta por ende con pocas propuestas de arquitecturas basadas en el paradigma holónico, lo que brinda grandes posibilidades investigativas dado el potencial que tiene dicho paradigma para su aplicación en procesos con altos requerimientos de reconfigurabilidad.
- Como hecho tecnológico importante para destacar, se encuentra la adopción de la norma IEC61499 para la programación de controladores lógicos, basada en componentes distribuidos y en la cual confluyen los paradigmas de la inteligencia distribuida (holones y agentes), el control manejado por eventos modelado mediante redes de Petri o máquinas de estados finitos; la programación orientada por objetos y la implementación en controladores lógicos programables; con lo que se pretende llevar los conceptos holónicos al piso de planta.
- La comunidad HMS ha visto como apropiadas las estructuras de control manejadas por eventos para la implementación de los conceptos holónicos en controladores y software de control de la producción. Es por esto que la teoría de control supervisorio y las técnicas de DES pueden brindar una base teórica unificada para modelar el comportamiento y las interacciones de entidades

holónicas y aportar criterios de diseño al abordar algunas de las funciones de producción como problemas de control de dinámicas discretas.

- Como lo expresa Brennan [15] en la introducción a la entrega especial de IEEE sobre HMS en enero de 2011, los problemas de investigación centrales en sistemas holónicos aún están vigentes y están orientados fundamentalmente a desarrollos en arquitecturas de control distribuido y sistemas reconfigurables. Adicionalmente, el potencial del enfoque holónico se ha expandido a muchas áreas tecnológicas, distintas al control y la automatización en manufactura.

Capítulo 2

Bases teóricas

2.1. Sistemas de producción holónicos

Introducción

En los esquemas de producción que se utilizan en la actualidad, la noción de manejo de la complejidad y de coordinación de la producción se da bajo un esquema rígido conocido como el enfoque piramidal o jerárquico. En este enfoque el conocimiento y la toma de decisiones son centralizadas, como por ejemplo el conocimiento del modelo de producción que se centraliza hasta su mínimo detalle.

En la propuesta que se presenta, el conocimiento está distribuido en los actores que participan en la ejecución de las tareas, en una arquitectura de autosimilaridad, donde el conocimiento está en cómo hacer un producto o parte del producto en un recurso. Esta tendencia en los sistemas de producción es lo que se ha denominado *inteligencia distribuida*.

La propuesta se enmarca dentro de estas tendencias y está enfocada en la programación, supervisión y control de la producción en procesos continuos, desde el enfoque

holónico y la teoría de control supervisorio, de acuerdo con lo que se planteó en los objetivos y la hipótesis. Para delimitarla, se presentan a continuación los aspectos básicos de los procesos de producción continuos y se identifican las potencialidades de aplicación del paradigma holónico en este tipo de procesos.

Se hace también una breve presentación de los conceptos holónicos que soportan la propuesta, haciendo énfasis en los atributos y características que pueden ayudar a determinar si un sistema de producción es holónico.

Como punto de partida para el desarrollo de la investigación se toma la propuesta de la Unidad de Producción Holónica, que plantea una arquitectura basada en el paradigma y aplicada a los procesos continuos.

2.1.1. Procesos continuos

Se define un Sistema de Producción Continuo (SPC) como aquel que se caracteriza porque la producción sigue un flujo continuo, generalmente con materiales que pueden ser medidos mediante variables físicas como flujo, peso o volumen. El material fluye por diferentes equipos especializados que están conectados mediante diversos tipos de conexiones (tuberías, ductos, cables). Cada equipo opera en región estable del espacio de estados de las variables físicas que rigen su comportamiento y desarrolla una parte del proceso, agregando valor a la materia prima de entrada y cambiando sus propiedades. Una vez que se encuentra operando en estado estable, el proceso no depende del tiempo en el que opera y se ejecuta sin interrupciones en el flujo de producto. Dentro de las operaciones que agregan valor se pueden mencionar las mezclas, las reacciones químicas y las separaciones. Estos procesos también se caracterizan por que son de alta complejidad.

Como industrias típicas que manejan procesos continuos, se tiene la del acero, la petroquímica, agroquímica, las refinerías, vidrio, cemento, pinturas, papel. Sistemas de distribución como oleoductos, gasoductos, acueductos. Los sistemas eléctricos de generación, transmisión y distribución de energía. En la industria alimenticia: la producción de azúcar, industria cervecera, embotelladoras de jugos y gaseosas.

Desde un enfoque de producción, se entiende que estos procesos deben operar con mínima interrupción en el procesamiento actual entre una ejecución de producción o entre ejecuciones de productos similares. Además de diferenciarse de los procesos discretos en el flujo y tipo de productos, se encuentran también diferencias en la disposición física de la planta, los objetivos de producción, las estrategias de control y los grados de libertad para realizarlo.

El cuadro 2.1 muestra una comparación entre estos dos tipos de procesos [43].

Para clasificar los SPC se consideran los volúmenes de producción (altos, bajos) y la variedad de productos (mono producto, multi producto), las rutas que siguen los productos y la variedad de materia prima. Otras clasificaciones involucran la capacidad que tiene el proceso de almacenar o no almacenar producto.

Por ejemplo, la industria cervecera se caracteriza porque combina altos volúmenes de producción con baja variedad de productos y materia prima. Caso contrario de la industria de pinturas, en la que se presentan volúmenes de producción menores con alta variedad de materia prima y gamas muy amplias de productos. En los sistemas de potencia interconectados, se tiene un proceso mono producto con múltiples rutas y sin capacidad de almacenamiento.

Parámetro	Proceso discreto	Proceso continuo
Disposición Física	Líneas de máquinas idénticas o no idénticas en paralelo con capacidades individuales.	Línea en serie de equipos, cada uno con una capacidad de producción definida.
Objetivo	Centrado en partes o trabajos.	Centrado en Productos o recetas.
Acople	Almacenes intermedios, Vehículos autónomos (AGVs).	Estrechamente acoplados con redes de transporte de productos.
	Basada en Tiempo/programación.	Basada en flujo de Producto.
	Formas estables de piezas sean intermedias o terminadas	Puede presentar inestabilidades químicas o físicas.
Variables para control	Fecha de entrega, hora de llegada, tiempo de procesamiento, calidad del producto.	Valores del proceso/set-points, cantidad para una fecha y calidad del producto.
Grados de libertad del control	Asignación de máquina, flexibilidad de ruta, disponibilidad y flexibilidad de máquinas.	Modos operacionales de los equipos y ajustes de controladores, flexibilidad de rutas.
Estrategias de control	Lógica discreta On-Off (utilizando PLC), controladores de control numérico (CNC)	PID/Control multivariable (utilizando DCS/PLC); control predictivo, entre otros.
Ejemplos de industrias típicas	Semiconductores, automotriz, metalmecánica.	Petroquímica, polímeros, generación de energía, alimentos.

Cuadro 2.1: Comparación entre procesos discretos y continuos

Los equipos que intervienen en el proceso se pueden clasificar como de propósito general o especializados y a su vez se pueden clasificar en dedicados o no dedicados. Equipos de propósito general dedicados solo pueden ser usados para producir diferentes productos pero su uso es restringido a una operación específica para uno o un limitado número de productos.

El tipo de equipos y la distribución de planta dictan la flexibilidad inherente en un SPC. Equipos dedicados y especializados brindan algo de flexibilidad; mientras equipos no dedicados de propósito general permiten mayor flexibilidad.

Una planta *multiproducto* [74] está organizada de forma tal que todos los productos usan la misma ruta y usan los mismos equipos con típicamente un producto a la vez. En un diseño más flexible *multipropósito*, cada producto toma una o más rutas diferentes con posiblemente más de un producto producido conjuntamente.

Se pueden encontrar entonces plantas continuas que requieren alto grado de flexibilidad, la cual se necesita si se tienen múltiples rutas, múltiples configuraciones de los equipos, tipo de equipos (dedicados o especializados), múltiples productos y variedad de materia prima. A su vez, el manejo de la flexibilidad se convierte en uno de los mayores retos para los sistemas de control de este tipo de procesos.

Otra exigencia para el sistema de control es que el flujo de producto no se interrumpa, incluso si se presentan fallas en los equipos o en las conexiones. En este caso, la infraestructura de producción, comandada por el sistema de control debe reconfigurarse para adaptarse a la nueva condición operativa.

Además de estas exigencias, cuando se ha definido la ruta para obtener el producto, se tiene también como objetivo identificar los ajustes operativos locales de las unidades de proceso para alcanzar la calidad requerida y la salida del producto final.

Finalmente, también con relación a las exigencias para los sistemas de control, los eventos de arranque, transición por cambio de producto y apagado son eventos importantes que requieren procedimientos específicos para una operación segura.

Los patrones de diseño para sistemas de control en SPC bajo enfoques convencionales se encuentran en la norma NS88 [74, 75], que lleva a los procesos continuos, los conceptos de la norma ISA S88 para procesos por lotes [76].

NS88 usa el poderoso concepto de separación de definición de producto (en recetas) de las capacidades intrínsecas de los equipos. Esto permite hacer cambios en los productos que no requieran cambios en equipos y programas de control. La aplicación de ISA S88 y de NS88 ha significado incrementos importantes en productividad a las industrias que la han implementado [74].

En esta propuesta se presenta un enfoque para el control de producción en SPC desde el paradigma holónico, el cual puede mostrar más ventajas en los procesos en los que se tienen altas exigencias de flexibilidad, tanto en variedad de materia prima, como de productos y rutas.

2.1.2. El enfoque holónico

El enfoque holónico nace del concepto Holón propuesto por Koestler en su trabajo "*The ghost in the machine*" [1]. Se origina a partir de teorías filosóficas sobre la creación y evolución de sistemas adaptativos complejos que establecen que "sistemas complejos surgen si se componen de subsistemas estables, cada uno de ellos capaz de sobrevivir ante perturbaciones, pero además, capaces de cooperar para formar un sistema estable más complejo".

Otros paradigmas han surgido dentro de los denominados Sistemas de manufactura inteligente (IMS), tales como la manufactura biónica, manufactura fractal, sistemas Multi-Agente (MAS), entre otros. Sin embargo, los HMS se han convertido en uno de los conceptos más comunes para el control de plantas distribuidas [77].

Según el Consenso HoloMAS (Holonc Multi-Agent Systems): "IMS es un paradigma sistemático para organizar personas y máquinas en un sistema en red. Dentro de IMS, dos tecnologías han alcanzado a atraer la atención: MAS y HMS. Ambas han mostra-

do resultados promisorios y aparecen como aproximaciones claves de las tecnologías de la comunicación y la información, para cumplir con los requerimientos dinámicos impuestos a los sistemas de manufactura de hoy” [22].

Se entiende por un sistema de producción holónico (HPS) un sistema que está compuesto por unidades individuales y autónomas que cooperan de manera proactiva mediante jerarquías temporales reconfigurables para obtener un objetivo global. Cada unidad individual recibe el nombre de *holón*.

Se toma como definición de partida de un holón, la presentada por el Consorcio HMS [78]: “componente constitutivo, autónomo y cooperativo, de un sistema de manufactura, cuyo fin es transformar, transportar, almacenar y/o validar información u objetos físicos”.

Para que un sistema sea considerado como *holónico*, debe tener como atributos básicos *la autonomía, la cooperación, la proactividad y la reactividad*. El Consorcio HMS define estos atributos así:

- Autonomía: capacidad de una entidad de crear, controlar y supervisar la ejecución de sus propios planes o estrategias de comportamiento.
- Cooperación: conjunto de entidades que desarrollan planes y estrategias mutuamente aceptables y las ejecutan para alcanzar metas y objetivos comunes.
- Proactividad: capacidad de anticiparse a cambios en sus planes y objetivos.
- Reactividad: capacidad de reaccionar a estímulos del entorno.

Además de tener la capacidad de crear, controlar y supervisar sus planes, *la autonomía* del holón se refleja en el esquema de toma de decisiones que le permite al holón ejercer acciones de control sin tener que recurrir a autorizaciones de niveles superiores de decisión cuando detecta que está sometido a una perturbación. De la misma manera, el holón tiene la autonomía para seleccionar el método de producción con base en el conocimiento que tiene de su estado y de sus competencias, optimizando el método de producción para cumplir con el objetivo negociado.

Desde la teoría de control, se entiende la autonomía como la ampliación del espacio de estados en el que el holón puede tomar decisiones. Decisiones que generalmente son tomadas por una entidad supervisora de orden superior, se trasladan al holón, ampliando de esa forma su capacidad de decidir ante diversos eventos. Un holón será más autónomo mientras requiera menos intervenciones de los niveles superiores que lo supervisan o controlan.

En [2] se plantea que la autonomía es la capacidad que tiene el holón de:

- Generar planes apropiados para cumplir con las tareas negociadas.
- Ejecutar los planes mediante el control y monitoreo de su propio estado.
- Tomar acciones apropiadas en condiciones de falla.

Un holón es una entidad que refleja su autonomía en que tiene objetivos, conocimiento y competencias y en que encapsula funciones de control y supervisión que le permiten responder a cambios y perturbaciones [79].

Con respecto a la *cooperación*, este es el atributo que le permite a los holones acordar planes comunes y mutuamente ejecutarlos. También les permite buscar ayuda en caso de que aparezcan situaciones de falla después de iniciar la ejecución del plan común. Las herramientas de las que se dispone para lograr la cooperación, son las coaliciones o *clusters*. En el caso de los sistemas holónicos se dispone de las denominadas *holarquías*.

El Consorcio HMS define una Holarquía como “un sistema de holones que cooperan para alcanzar un objetivo común. La holarquía define las reglas básicas de cooperación de los holones y establece los límites de su autonomía”. La meta global guía el comportamiento de la holarquía y es la que permite establecer los límites de la autonomía. Un holón es autónomo en tanto no afecte los objetivos de la holarquía.

La agregación de holones y holarquías, mediante propiedades de autosimilaridad, permite la construcción de sistemas muy complejos, como se ilustra en la Figura 2.1 [80].

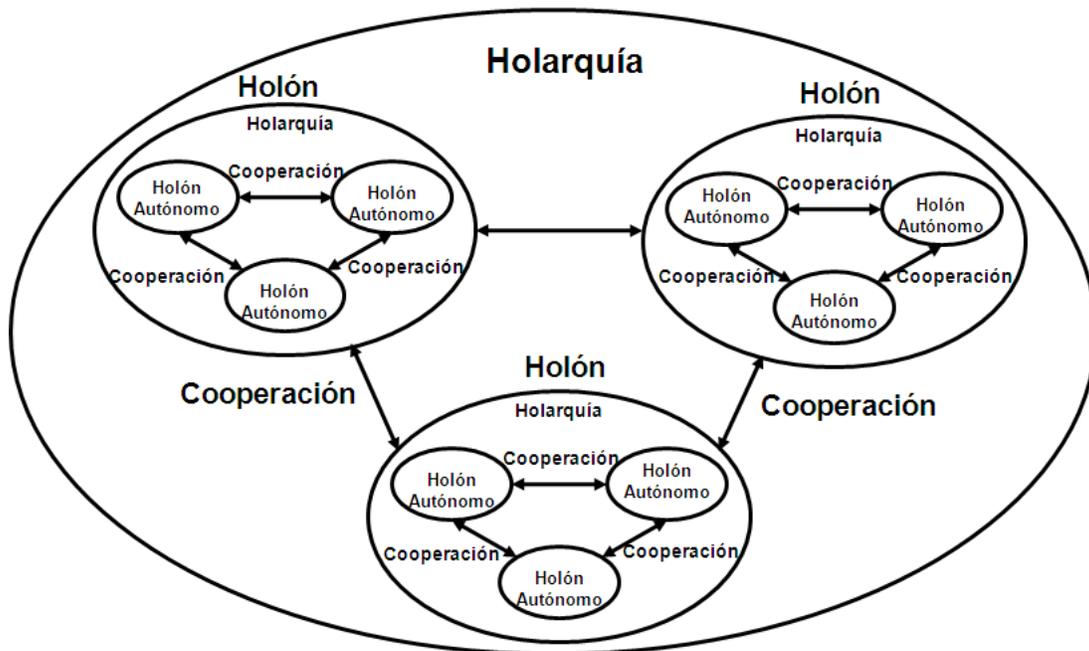


Figura 2.1: Holarquía. Tomado de [80]

Los holones agregados se definen como un conjunto de holones que son agrupados, formando un holón mayor con su propia identidad pero con una estructura “similar” a la de los holones que lo conforman.

Un sistema se considera cooperativo cuando tiene en cuenta todas las situaciones y mecanismos de interacción entre los participantes. Necesita definir objetivos y metas a ser alcanzadas por el grupo, asignar tareas y reducir conflictos, desacuerdos y redundancias tanto como sea posible, y ejecutar las tareas con sincronización y convergencia de las metas a ser alcanzadas.

Para establecer las metas de la holarquía se utilizan mecanismos de negociación, los cuales permiten establecer acuerdos teniendo en cuenta criterios de optimización global y formulando mutuamente soluciones satisfactorias para alcanzar la meta de producción. Una vez se negocian las metas, se organizan las holarquías que las deben ejecutar.

La negociación se define como el proceso de establecer un conjunto de acciones acordadas entre los participantes para mover un sistema desde una situación conflictiva hacia una meta común.

En caso de perturbaciones, los holones y las holarquías se reagrupan, combinando sus capacidades en grupos colaborativos para adaptarse y responder a los eventos que ponen en riesgo la meta común.

Koestler define una holarquía como una jerarquía de holones la cual funciona:

- como un todo autónomo en supra-ordinación a sus partes.

- como partes dependientes subordinadas a controles de niveles mayores.
- en coordinación con su entorno local.

La *proactividad* se ha entendido como el comportamiento orientado por objetivos o metas. Un holón es proactivo cuando puede cambiar dinámicamente su comportamiento para alcanzar sus metas, para mejorar su desempeño o para evitar que el holón llegue a situaciones de daño. La proactividad también se ha entendido como una función anticipativa. Un holón tiene este atributo cuando puede mejorar su conocimiento y sus capacidades para anticiparse a contingencias. El rol de la proactividad es garantizar que la operación normal se respeta e identificar situaciones de riesgo que podrían conducir a romper esa normalidad. Los sistemas que se denominan “inteligentes”, adaptan su funcionalidad a los cambios internos y externos y esto lo logran mediante la proactividad.

Para responder a los estímulos del entorno, el paradigma holónico considera el atributo de la *reactividad*. Este atributo le da al holón la habilidad de reaccionar a estímulos externos e internos mediante la búsqueda de una solución admisible, en un tiempo apropiado, considerando la dinámica de su ambiente y las restricciones y especificaciones impuestas por niveles superiores de decisión. La capacidad de responder a estos estímulos la brindan los sistemas de control y supervisión, los cuales generan unas acciones correctivas cuando se presentan eventos que pueden desviar al holón de sus objetivos. De esta forma, puede afirmarse que por ser reactivos, las acciones de los holones en su entorno son guiadas por los estímulos que éste genera.

Además de estos atributos básicos, el enfoque presenta otras características que contribuyen a considerar un sistema como “holónico”. Entre estas, se pueden mencionar:

- **Recursividad y auto similaridad:** En la concepción que planteó Koestler, un holón es un “todo” que se convierte en “una parte” de una entidad mayor. Este concepto fue precisamente el que dio origen al término “holón”: el todo y las partes. Una holarquía se convierte en un holón de una holarquía mayor, como se aprecia en la Figura 2.1. A su vez, un sistema de producción holónico es un holón de una empresa holónica, en el contexto extendido del concepto. El hecho de tener componentes homogéneos reduce la complejidad, porque simplifica el desarrollo e integración de nuevos holones al sistema. Una arquitectura holónica contiene componentes autosimilares, lo que significa que holones del mismo tipo tienen interfaces y comportamiento similar. Cada holón, sin importar el nivel de agregación, tiene objetivos, conocimiento, competencias y estado. La autosimilaridad permite homogeneidad en la operación interna de la holarquía. Como consecuencia, es más simple reconfigurar el sistema porque un holón se puede integrar a una holarquía sin necesidad de cambiar la funcionalidad del holón ni la funcionalidad de la holarquía [71]. Por la misma autosimilaridad, un holón no necesita ser adaptado a las funcionalidades de una holarquía, lo que le permite ser miembro de varias holarquías a la vez.
- **Escalabilidad:** un sistema holónico se ajusta ante la incorporación de nuevos holones, la eliminación de holones existentes, o la modificación de las capacidades funcionales de los holones existentes. La escalabilidad del paradigma holónico la presenta el concepto “*plug and produce*”. Este concepto guarda una analogía con la expresión “*plug and play*”, según la cual un nuevo componente del sistema de producción puede incorporarse fácilmente al sistema sin requerir configuraciones ni cambios en la estructura de control y puede producir una vez se conecta.
- **Combinan comportamiento jerárquico y heterárquico:** una holarquía maneja un equilibrio entre la autonomía e independencia de una estructura heterárquica

para atender las perturbaciones y la obediencia de una estructura jerárquica para responder por las metas globales, la optimización del sistema y la coordinación y organización central.

- Son sistemas guiados por objetivos: Los atributos holónicos están expresados en términos de los objetivos. La autonomía es la capacidad que tiene el holón de crearlos, controlarlos y monitorearlos. La reactividad es la capacidad que tiene el holón de responder rápidamente ante sus desviaciones. La proactividad permite anticiparse a situaciones que pongan en riesgo su logro y mediante la cooperación, los holones conforman sociedades que contribuyen a alcanzar la meta común. En este sentido, el objetivo se convierte en el principio orientador del comportamiento del holón y por tanto deben considerarse las implicaciones en el modelado de su comportamiento, el monitoreo y las acciones de control generadas para alcanzarlos, es decir, su supervisión.

Los atributos y características del paradigma se han llevado a los procesos continuos mediante la propuesta de la Unidad de Producción Holónica (UPH), que se presenta en la sección 2.1.3.

2.1.3. La unidad de producción holónica

La Unidad de Producción Holónica (UPH) es un modelo de referencia para procesos de producción continuos, que está basada en la agregación de componentes que tienen características holónicas y que realizan las funciones de planificación, programación, supervisión y control de un proceso productivo.

El concepto de UPH se fundamenta en el modelo de Unidad de Producción (UP) presentado en [52,81].

En este modelo, la UP se concibe como un conjunto de unidades elementales o recursos que son organizados y configurados de tal manera que permitan realizar los procesos de transformación en la cadena de valor, con el objetivo de obtener los productos exigidos. De esta forma, un proceso productivo puede ser visto como la agregación de unidades de producción cooperantes.

Los componentes principales de la UP son el *proceso de producción*, el *plan de producción*, los *recursos* y los mecanismos de *control y supervisión*, que controlan y supervisan el Proceso de Producción. El Plan de producción usa un *método de producción* y el Proceso de Producción, el Método de Producción y los Recursos, están relacionados mediante la *configuración* de la unidad de producción. La Figura 2.2 [81] muestra en mayor detalle las entidades que componen la UP y sus relaciones y en la Figura 2.3 se presenta el proceso de negocio de una unidad de producción continua [82].

Si la UP y sus componentes se dotan de las características holónicas, se tiene una Unidad de Producción Holónica (UPH). La UPH toma sus propias decisiones respecto al cumplimiento de su objetivo, pero está obligada a informar su estado en el cumplimiento de una meta o si ésta no se puede cumplir debido a una falla o errores en su comportamiento.

El componente básico de la Unidad de Producción Holónica es el Holón Recurso, el cual es un recurso de producción que tiene los equipos y la lógica de control, que lo habilitan para tomar sus propias decisiones orientadas a entregar productos a partir de materia prima.

Un holón recurso está provisto de un sistema de toma de decisiones que le permiten cooperar con otros y negociar sus metas a partir de su estado, sus competencias, su

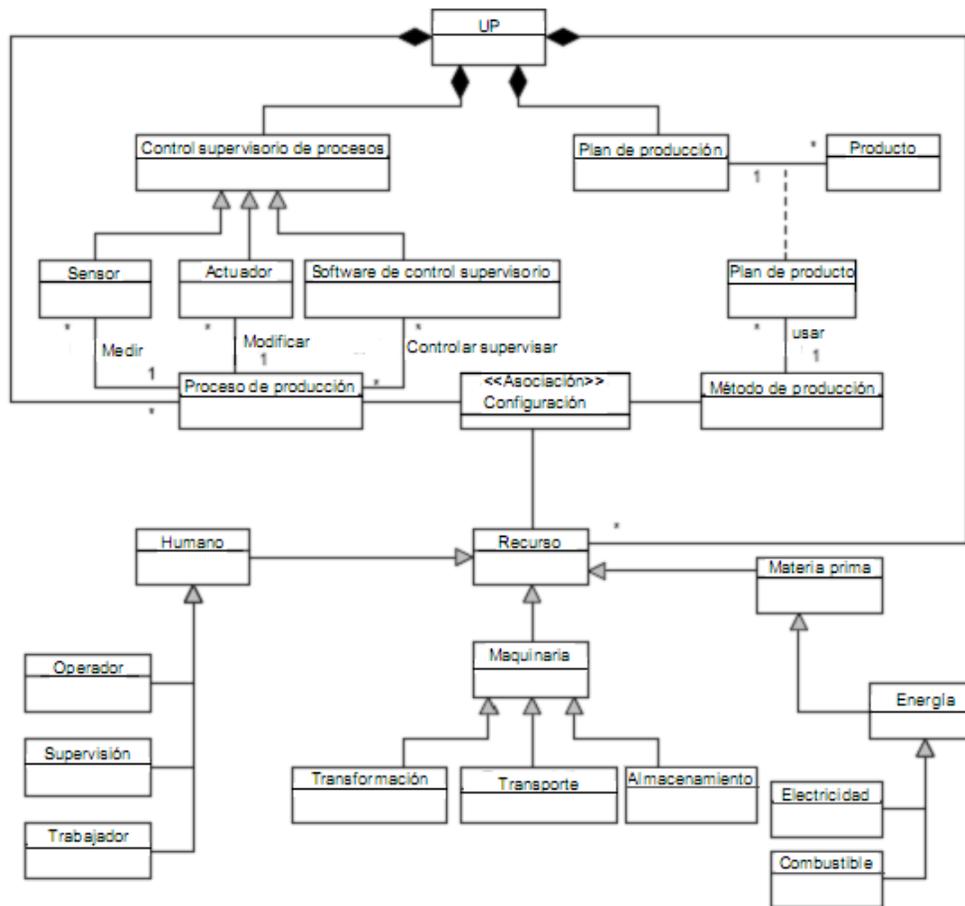


Figura 2.2: Modelo de la UP. Tomado de [81]

capacidad y su disponibilidad. El sistema de toma de decisiones también le permite supervisar su comportamiento y ajustarlo para responder a las perturbaciones.

La agregación de holones Recurso forma la Unidad de Producción, que dentro de la concepción holónica está definida como una holarquía.

La propuesta es consistente con la recursividad del paradigma, ya que la UPH mantiene la estructura del holón, siendo a la vez un holón de una unidad de producción mayor que la contiene y está formada internamente por holones. En ese mismo sentido, un holón es a su vez una UPH.

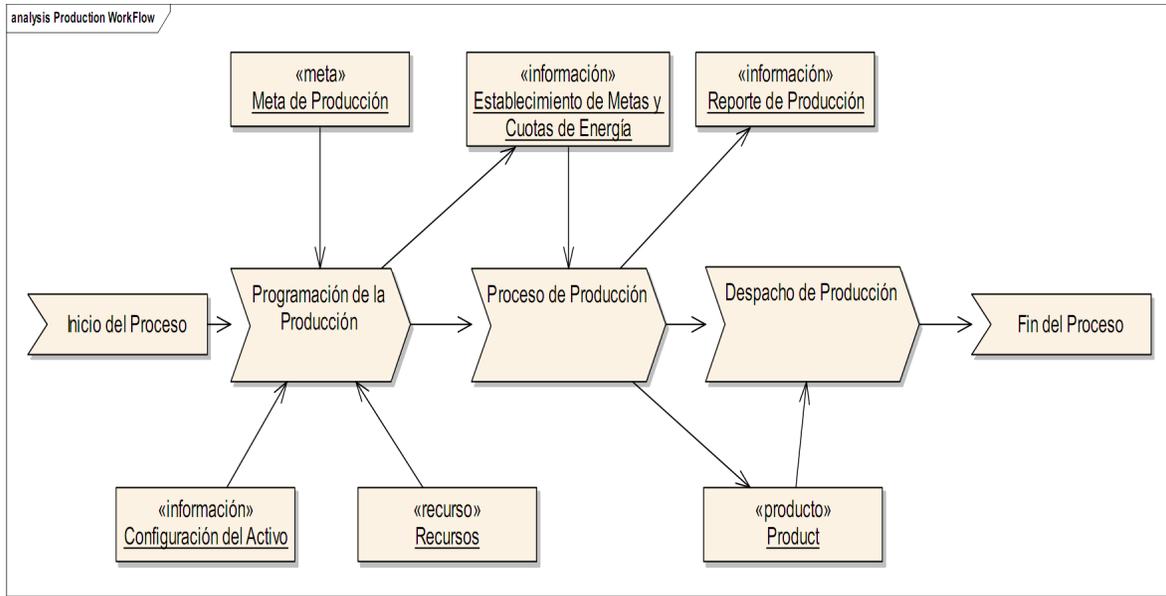


Figura 2.3: Proceso de negocio de producción continua. Tomado de [82]

Teniendo en cuenta los atributos holónicos, que el comportamiento del holón está guiado por sus objetivos y que el holón tiene el conocimiento para tomar sus decisiones, la UPH comprende los siguientes componentes principales:

- Misión: representa el producto a producir en un período de tiempo y que ha sido negociada y aceptada por la unidad. Se encarga de la negociación de metas, su ejecución y su seguimiento.
- Holón Recurso: es un recurso de producción, dotado de un sistema de toma de decisiones, representados como atributos holónicos, que lo habilitan para desarrollar el proceso productivo de manera autónoma.
- Ingeniería: representa el conocimiento del holón para desarrollar los productos. Contiene los métodos de producción que indican cómo se obtiene un producto y los recursos requeridos.

El diagrama de la Figura 2.4 muestra las relaciones entre los componentes básicos de la UPH.

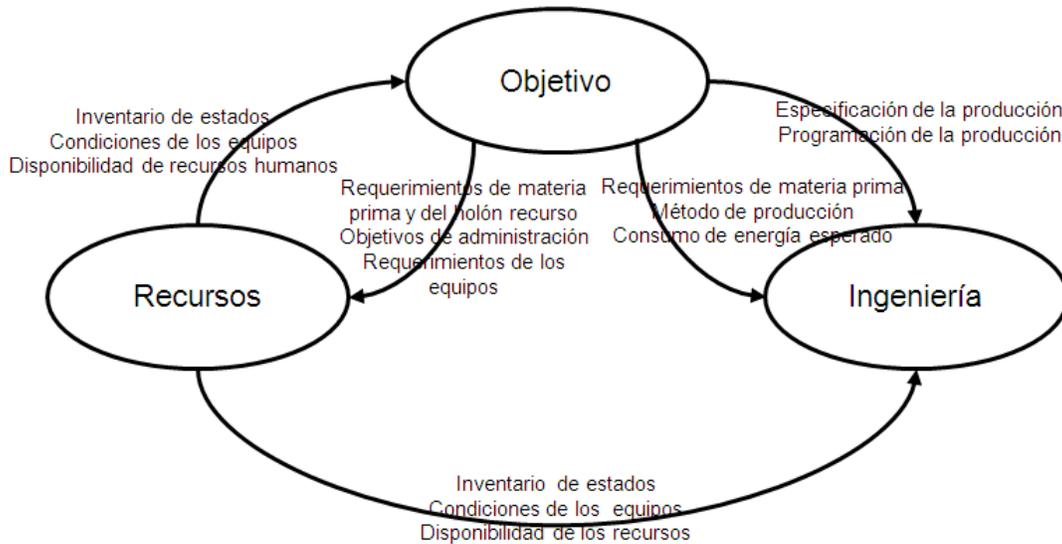


Figura 2.4: Relaciones entre componentes básicos

Las funciones de cada uno de los componentes se detallan a continuación.

Funciones del componente *misión*

- Responsable del producto a producir.
- Se encarga del proceso para llevar a cabo el producto.
- Asigna la capacidad a un recurso con la información que éste le suministra, la que puede ser simultáneamente asignada a varios procesos de producción concurrentes. Este puede ser el caso si la UPH tiene varias misiones.
- Contiene la información acerca de la producción actual del producto. Mide el avance de la misión.

- Maneja el objetivo de producción, el cual puede ser aceptado o rechazado por la UPH, y está relacionada con el producto a producir en una cantidad, calidad y un tiempo debido.
- Toma consignas y decisiones respecto al proceso.
- Verifica disponibilidad de materia prima.
- Reserva los recursos para la ejecución del proceso, con información del holón recurso.
- Especifica las necesidades de la producción.
- Se encarga de la producción que se realizará dentro de un período. Para realizar esa misión, la operación de la UPH se debe dividir en un sistema de tareas que debe ser realizado por la infraestructura técnica.
- Especifica el producto a ser completado, con sus calidades, cantidades y costos asociados al producto.
- Realiza cambios en la configuración. Establece el mecanismo de actuación a nivel de control regulatorio, que permita la ejecución normal de la misión.
- Establece nuevos modos de operación. Cambia la meta a una UPH que tiene una tarea en ejecución.
- Describe la evolución del proceso de producción interno.
- Tiene la capacidad para establecer la comunicación con las otras unidades de la decisión y de información que pertenecen a otras UPH.

Funciones del componente *ingeniería*.

Esta componente contiene el conocimiento del holón para poder adelantar el proceso productivo y para evaluar su desempeño. De manera similar a la propuesta del holón producto de PROSA, la *ingeniería* incluye funcionalidades que son cubiertas por las dependencias responsables del diseño del producto, planificación del proceso y aseguramiento de la calidad. Sin embargo, a diferencia de PROSA en el que el holón producto es estático, en la propuesta de la UPH la Ingeniería tiene atributos dinámicos y participa como componente activo en el proceso de negociación de la misión. El producto se puede hacer de muchas formas, dependiendo de la disponibilidad de insumos y de los holones que participan en la negociación.

- Establece y evalúa diversos métodos de producción.
- Contiene el modelo del producto.
- Contiene la información requerida para producir un producto.
- Determina las capacidades de la UPH.
- Define indicadores de desempeño de la UPH.
- Tiene la información sobre el método de producción asociado a cada tipo del producto. Se desarrolla un producto usando recursos y después de un método de producción específico. Hay un método óptimo para lograr una tarea de la producción que depende de los recursos disponibles (condición de la infraestructura, calidad del material de la producción, etc.), de satisfacer las especificaciones de los productos. Este método puede variar en el tiempo, siempre que ocurran cambios en los materiales de la producción, equipos o en las especificaciones del producto.

- Es el encargado de la configuración de la UPH, una receta que indica cantidades y calidades de materia prima, la configuración y los puntos de consigna de los controladores del proceso. Es un *staff* en el sentido de PROSA.
- Tiene la autonomía para tomar las decisiones de seleccionar el método de producción, con base en el conocimiento que tiene del estado de sus recursos, priorizando y optimizando el método de producción para cumplir con el objetivo de producción.
- Está conformado por las recetas y la forma de establecer el control para cada receta.
- Determina la capacidad de la infraestructura (equipo) y disponibilidad de recursos. La evolución de la infraestructura varía de acuerdo a los cambios que pueden aparecer en la infraestructura (fallas en componentes), cambios en recursos externos (materia prima) o cambios en servicios (energía, disponibilidad del tratamiento inútil, etc.).
- Determina las necesidades de recurso humano para producir el producto.
- Determina la capacidad disponible. El conocimiento de la capacidad disponible permite aumentar la misión de la UP o tomar otras misiones.
- Planifica métodos de control existentes, métodos de control ineficientes, presencia de fallos en la ley y/o métodos de control, cambio o ajuste de ley y/o métodos de control.
- Tiene el conocimiento sobre la mejor forma de cumplir la misión.
- Envía parámetros y modelos al Holón Recurso para que desarrolle las actividades de producción.

- Contiene los modelos de la dinámica del proceso. Técnicas clásicas del control de procesos permiten definir la dinámica del sistema en el caso de sistemas lineales o linealizables; por ejemplo, la dinámica del sistema se puede almacenar mediante un sistema de ecuaciones lineales que lo representan.
- Define de acuerdo a ciertos criterios, cual es la ruta deseable para alcanzar el estado deseado en mínimo tiempo o con el menor costo.
- Establece los atributos de calidad del producto.
- Establece el costo de producción.

Funciones del *holón recurso*

El Holón Recurso tiene la inteligencia para ejecutar la producción y tiene la noción de autonomía y recursividad. A continuación se relacionan sus funciones y características.

- Mantiene en óptimo estado los recursos que conforman el conjunto de instalaciones, equipos, personal especializado, servicios e insumos, necesarios para ejecutar un método de producción.
- Maneja la disponibilidad y confiabilidad de los recursos.
- Contiene la información de la capacidad para producir un producto.
- Representa el equipamiento tecnológico que permite que el proceso se desarrolle. Estos elementos deben ser supervisados para verificar que el proceso se pueda realizar.
- Incluye la representación de los recursos humanos que llevan a cabo el proceso de producción.

- Describe los diferentes estados asociados a un recurso (disponible, en falla, en operación).
- Inicia el proceso.
- Controla el proceso.
- Controla los recursos.
- Programa el mantenimiento.

Proyección de las funciones de producción en la UPH

La arquitectura de la UPH debe dar respuesta a las funciones que se realizan para adelantar el proceso productivo. Teniendo en cuenta las funciones de producción que se plantean en la norma ISA S95 para integración de sistemas [83], y en ISA S88 para el control de procesos *batch* [33] se muestra en el cuadro 2.2 la proyección de estas funciones sobre los componentes de la arquitectura holónica.

La propuesta que se presenta para la Planificación, Programación y Supervisión de la producción en procesos continuos se basa en los trabajos de la Unidad de Producción Holónica, aplicando la teoría de los sistemas de eventos discretos para modelar el comportamiento dinámico y los estados de los componentes de la arquitectura de la UPH: el Holón Recurso, la Misión y la Ingeniería.

La presentación de los conceptos básicos de los sistemas de producción continuos, del paradigma holónico y de la UPH es fundamental para estructurar la propuesta de planificación, programación y supervisión.

FUNCIONES DE PRODUCCIÓN (Según ISA S95)	Propuesta UPH		
	MISIÓN	INGENIERÍA	HOLÓN RECURSO
Definición del(os) producto(s)		Define	
Procesamiento de órdenes	Ejecuta		
Gestión del mantenimiento		Especifica	Ejecuta
Especificación atributos de calidad		Define	Cumple
Definir capacidad disponible (equipos y recursos)		Especifica	Cumple
Aseguramiento de la calidad		Especifica	Asegura
Control de las operaciones			Realiza
Producción del producto de acuerdo al plan y las especificaciones			Realiza
Reportes de producción, del proceso e información del recurso			Cumple
Monitoreo de equipos y del proceso	Sigue		Realiza
Control de producción	Supervisa		Ejecuta
Programación de la producción	Evalúa	Indica	
Determinar el programa de producción	Decide	Consulta	Conoce
Identificar requerimientos de materia prima		Identifica	
Identificación de restricciones de producción		Identifica	
Control de inventarios (materia prima, producto en proceso y producto terminado)	Usa		Conoce
Control de materiales y energía	Usa		Controla, conoce
Costo del producto	Decide	Define	Determina

Cuadro 2.2: Funciones de producción

Conclusiones

- Se plantean en la actualidad grandes retos para los sistemas de control de procesos continuos, orientados fundamentalmente a disponer estructuras flexibles de control y supervisión e infraestructura de producción que se adapte rápidamente a los cambios en el entorno productivo, garantizando la continuidad en el flujo de producto.

- Una característica importante del paradigma holónico para ser llevado a los procesos continuos es precisamente la reconfigurabilidad. El paradigma considera mecanismos para cambiar los volúmenes, los flujos de producción, las leyes de control, la infraestructura de producción, según los requerimientos cambiantes y las nuevas condiciones operativas ocasionadas por la ocurrencia de fallas o perturbaciones. La arquitectura holónica es reconfigurable y no impone una estructura de control fija.
- El enfoque holónico surge inicialmente orientado a los procesos de manufactura discreta. Sin embargo, se han venido consolidando propuestas para llevar la concepción holónica a los procesos continuos con altos requerimientos de reconfigurabilidad, en los que la aplicación puede resultar apropiada. Se destaca dentro de estas propuestas, la de la Unidad de Producción Holónica (UPH) que retoma el concepto de Koestler “del todo y las partes”. La propuesta se basa en los componentes: Misión (objetivo de producción); Holón Recurso (recurso de producción inteligente); Ingeniería (conocimiento del holón y de la UPH). La UPH también es recursiva, en el sentido que ella en sí misma es un holón y a su vez está formada por otros holones o unidades de producción.

2.2. Redes de Petri y la teoría de control supervisorio

Introducción

Los procesos industriales de producción continua se caracterizan porque el comportamiento de las variables que intervienen en el proceso se pueden describir mediante ecuaciones diferenciales y porque tienen un conjunto de valores infinito en el espacio de estados. Este tipo de procesos se denominan *Sistemas Dinámicos de Variable Continua* (CVS).

En el esquema de toma de decisiones, se tiene un primer nivel en el que el control es realizado por dispositivos, también de dinámica continua y en los que el diseño de los algoritmos de control sigue las técnicas del control realimentado o la teoría de control clásica.

El nivel superior de decisión se denomina *supervisión*, el cual es responsable de conducir el proceso por diferentes modos y regiones de operación para que alcance estados de finalización satisfactoria del producto, y para que siga el plan establecido en el siguiente nivel de *programación de la producción*.

Coinciden muchos autores [84–89], en establecer que las dinámicas predominantes en estos niveles superiores se pueden caracterizar como de *Sistemas Dinámicos de Eventos Discretos* (DES), los cuales presentan un espacio de estados finito y numerable y en los que la evolución del estado se determina por la ocurrencia de eventos espontáneos, asíncronos y aleatorios.

Desde los sistemas discretos, en el nivel de supervisión, el proceso o *planta*, se abstrae como un generador de eventos y exhibe un comportamiento *no controlado*. Este comportamiento exige la existencia de una entidad que lo controle y plantea la necesidad de abordar el estudio de los sistemas de eventos discretos desde la teoría de control. El comportamiento simbólico derivado a partir de la generación de eventos, posibilita el uso de la teoría de lenguajes para su estudio.

La teoría de control supervisorio (SCT) propuesta por Ramadge y Wonham [66] constituye el cuerpo teórico más completo para controlar DES. Esto se debe a sus fundamentos matemáticos, basados en lenguajes formales; provee algoritmos exactos para diseño de supervisores de una gran cantidad de problemas de control; captura las

restricciones físicas que un controlador puede satisfacer, asume que solamente un subconjunto de los eventos es controlable; y es suficientemente general para ser aplicada a diferentes modelos [90]. Las propiedades cualitativas de un sistema de eventos discretos, tales como *estabilidad*, *controlabilidad*, *observabilidad*, *factibilidad*, *no bloqueo*, cuyo estudio le da mayor robustez al diseño de los sistemas de control, son definidas desde una perspectiva de propiedades de lenguajes. Igualmente, la teoría de lenguajes provee un formalismo riguroso que ofrece importantes teoremas sobre la existencia de supervisores.

El problema de control de sistemas de eventos discretos también se formaliza desde la teoría de lenguajes, estableciendo el comportamiento deseado o *especificación* como un lenguaje, el cual está contenido dentro del lenguaje que representa todo el comportamiento posible del sistema.

Dos bases formales han sido las más utilizadas para abordar el control de los sistemas de eventos discretos: los *Autómatas de Estados Finitos* (FSA) y las *redes de Petri* (PN). Ambos formalismos tienen en común el hecho de que representan lenguajes mediante el uso de una estructura estado - transición y difieren en la forma de representar la información del estado. Los dos formalismos están provistos de varias operaciones de composición que permiten construir modelos del sistema global a partir de modelos DES de los componentes. También consideran técnicas de análisis y síntesis mediante el uso de propiedades estructurales.

El estudio de los sistemas de eventos discretos desde la teoría de autómatas [84] se apoya en resultados de la teoría de control realimentado, tales como controlabilidad y observabilidad, haciendo una clara distinción entre la planta y el controlador.

Los flujos de información entre planta y controlador están modelados explícitamente. En esta teoría también se hacen aportes sobre la existencia y síntesis de *supervisores no bloqueantes y máximo permisivos*, esto es, se sintetiza un supervisor que permite que ocurran todos los eventos que no violan las *especificaciones* de control dadas. El control de DES desde la Teoría de Control Supervisorio (SCT) se fundamenta en la Teoría de Lenguajes, ya que el comportamiento de la planta en lazo abierto, el supervisor y las especificaciones se expresan en términos de lenguajes. Igual para las expresiones de controlabilidad y observabilidad. La ventaja de usar lenguajes es clara, ya que es posible obtener resultados teóricos que no dependen del modelo particular usado para representar el sistema.

La teoría de autómatas hace una representación completa del estado; el espacio de estados es un conjunto simbólico no estructurado [91], lo que genera un crecimiento exponencial del espacio de estados, que a su vez incrementa la complejidad computacional de los algoritmos de síntesis, especialmente en casos que el sistema controlado es muy grande y constituido por muchos sistemas interactuantes. La complejidad del sistema de control, medida en términos del número de estados, no debe exceder los límites para la implementación práctica.

Las redes de Petri [67,85] han demostrado ser más útiles para el manejo de la complejidad, debido a su poder de representación. Han sido diseñadas específicamente para modelar sistemas con componentes interactuantes y como tal están habilitadas para capturar muchas características de los sistemas manejados por eventos, como concurrencia, sincronización, operaciones asíncronas, bloqueos, conflictos, entre otros. Las PN tienen una mayor complejidad de lenguaje, ya que los lenguajes generados por la red son superconjuntos propios de lenguajes regulares.

El espacio de estados de las redes de Petri pertenece al conjunto de los enteros positivos, ya que éstos son representados mediante el posible marcaje y no mediante la enumeración explícita del estado, lo que permite una descripción más compacta. La estructura de la red se puede mantener pequeña, incluso si el número de marcas crece. Este poder de representación las habilita para enfrentar el problema de la explosión de estados de una manera más apropiada que mediante autómatas finitos. Adicionalmente cuentan con técnicas de análisis basadas en la estructura de la red, más que en su comportamiento, como el análisis basado en la matriz de incidencia, y la síntesis modular.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, en esta propuesta se elaboran los modelos de la UPH para la programación de la producción y la supervisión mediante redes de Petri. Mediante la técnica de análisis basada en el árbol de alcanzabilidad se obtiene un autómata finito que representa el espacio de estados del modelo, a partir del cual se determinan los lenguajes generado y marcado. Aplicando sobre éste autómata la teoría de control supervisorio basada en lenguajes se sintetiza un supervisor máximo permisivo no bloqueante que permite que la Unidad de Producción Holónica llegue a estados finales de finalización satisfactoria del producto, para el caso de la programación de la producción, o a estados finales deseados para el caso de la supervisión.

2.2.1. Teoría de Lenguajes y Autómatas

Lenguaje

Sea $\Sigma = \{\alpha, \beta, \dots\}$, un conjunto finito de diferentes *símbolos* denominado *alfabeto*. Una *cadena* o *palabra* es una secuencia finita de símbolos sobre Σ . Se denota como Σ^+ a todas las cadenas finitas que sean posibles sobre el alfabeto Σ , de la forma $\sigma_1\sigma_2\dots\sigma_k$ donde $k \geq 1$ y $\sigma_i \in \Sigma$ [84].

A la unión de Σ^+ con una cadena vacía $\{\varepsilon\}$ se le denota como Σ^* , donde:

$$\Sigma^* = \Sigma^+ \cup \{\varepsilon\}$$

Por ejemplo si se tiene un alfabeto $\Sigma_1 = \{a, b, e\}$, entonces

$$\Sigma^* = \{\varepsilon, a, b, e, ab, abe, aabe, aaabe, \dots\}.$$

El conjunto de *palabras* formadas a partir de un alfabeto Σ recibe el nombre de *lenguaje*. Por ejemplo, para un alfabeto $\Sigma_1 = \{a, b, e\}$ se puede decir que:

$L_1 = \{\varepsilon, ab, abe, ae\}$ es un lenguaje formado a partir de Σ_1 .

Operaciones con lenguajes

Las operaciones que se definen en la teoría de conjuntos tales como unión, intersección, son aplicables en los lenguajes, debido a que estos son a su vez conjuntos. Pero además de esas operaciones existen otras que no se han definido, estas son la concatenación, el prefijo cerrado y el cerramiento de Kleene [84].

Una operación clave para construir cadenas es la *concatenación*. Esta operación es de la forma $\Sigma^* \times \Sigma^* \rightarrow \Sigma^*$. Por ejemplo, la concatenación entre las palabras s y t es st , y la concatenación entre $\{\varepsilon\}$ y s es s .

Definición 2.1 (Concatenación)

Sean L_a y L_b dos lenguajes tales que $L_a \wedge L_b \in \Sigma^*$

$$L_a L_b := \{s \in \Sigma^* : (s = s_a s_b) \wedge (s_a \in L_a) \wedge (s_b \in L_b)\}$$

En otras palabras, la concatenación entre dos lenguajes es la concatenación entre las palabras de cada uno de los lenguajes.

Definición 2.2 (Cerramiento de prefijos)

Sea L un lenguaje tal que $L \in \Sigma^*$, el prefijo cerrado de L se define como,

$$\bar{L} := \{s \in \Sigma^* : (\exists t \in \Sigma^*)[st \in L]\}$$

En otras palabras, \bar{L} es un lenguaje que se forma con todos los prefijos de las cadenas del lenguaje L . Luego $L \subseteq \bar{L}$. En el caso en que $L = \bar{L}$ se dice que L es prefijo cerrado.

Definición 2.3 (Cerramiento de Kleene)

Sea L un lenguaje tal que $L \in \Sigma^*$, el cerramiento de Kleene de L es tal que,

$$L^* = \{\varepsilon\} \cup L \cup LL \cup LLL \cup \dots$$

Se considera además la siguiente terminología entre las cadenas. Sea la palabra $s = tuv$, tales que $t, u, v \in \Sigma^*$:

- t se denomina prefijo de s .
- u es subcadena de s .
- v es un sufijo de s .

Autómatas

Se define un autómata determinístico como una máquina de estados finitos capaz de representar un *lenguaje* siguiendo reglas que están bien definidas. El autómata de un sistema a eventos discretos se define completamente de la siguiente forma:

$$G = \langle Q, \Sigma, \delta, \Gamma, q_o, Q_m \rangle.$$

Donde,

Q , es el conjunto de estados.

Σ , es un alfabeto y es un conjunto finito formado por los eventos del sistema. Además, el conjunto de eventos puede ser particionado en dos conjuntos.

$\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{nc}$, donde Σ_c es el conjunto de todos los eventos controlables y Σ_{nc} son los eventos no controlables.

$\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$, es la función de transiciones del sistema. Está definida solo para un subconjunto de Σ en cualquier estado $q \in Q$. Por conveniencia $\delta(q, \sigma)!$ expresa que δ está definido para σ desde q .

$\Gamma : X \rightarrow 2^\Sigma$, es la función de eventos activos.

$\Gamma(q)$, es el conjunto de todos los eventos para los cuales $\delta(q, \sigma)$ está definida y se llama conjunto de eventos activos de G en q .

q_o , es el estado inicial.

Q_m , es el subconjunto de Q que denota los estados marcados y representa las tareas completas del sistema.

El autómata se denomina de estados *finitos* si el número de estados es finito. Si la función de transición es única, esto es $\delta(q_a, \sigma) = q_b$, el autómata se denomina *determinístico* [84].

Definición 2.4 (Estados alcanzables y co-alcanzables.)

Un estado q es alcanzable en un autómata si $\exists \sigma \in \Sigma^ : \delta(q_o, \sigma)!$, donde q_o es el estado inicial del autómata.*

Un autómata para el cual todos los estados son alcanzables es llamado alcanzable.

Un estado q es coalcanzable en un autómata si $\exists \sigma \in \Sigma^ : \delta(q, \sigma) \in Q_m$ donde Q_m es el conjunto de estados marcados del autómata.*

Un autómata para el cual todos los estados son co-alcanzables se dice que es coaccesible.

Lenguajes y Autómatas

El vínculo entre lenguajes y autómatas se establece fácilmente mediante la inspección del diagrama de transición de estados del autómata. Las definiciones del *lenguaje generado* y *lenguaje marcado* se desprenden de considerar todas las trayectorias posibles en el diagrama de transición que se pueden seguir desde el estado inicial y dentro de ellas, las que llevan a los estados finales [84].

El *lenguaje generado* por el autómata se denota $L(G)$ y se define como el conjunto de todas las cadenas posibles que se pueden dar en el autómata. El *lenguaje marcado* se denota $L_m(G)$ y consiste en todas las cadenas posibles que terminan en un estado marcado, arrancando desde el estado inicial, luego $L_m(G) \subseteq L(G)$.

Definición 2.5 (Lenguaje Generado y Lenguaje Marcado)

Sea $G = \langle Q, \Sigma, \delta, q, Q_m \rangle$ un autómata. El lenguaje generado por G es:

$$L(G) := \{\sigma \in \Sigma^* \mid \delta(q, \sigma) \neq \emptyset, \text{ para algún } q \in Q\}$$

El lenguaje marcado por G es:

$$L_m(G) := \{\sigma \in \Sigma^* \mid \delta(q, \sigma) \in Q_m, \text{ para algún } q \in Q\}$$

Operaciones con autómatas

Las operaciones básicas se definen con base en los siguientes autómatas:

$$G_1 = \langle Q_1, \Sigma_1, \delta_1, \Gamma_1, q_{01}, Q_{m1} \rangle \text{ y } G_2 = \langle Q_2, \Sigma_2, \delta_2, \Gamma_2, q_{02}, Q_{m2} \rangle$$

Producto

El producto de dos autómatas G_1 y G_2 es el autómata:

$$G_1 \times G_2 = \langle Q_1 \times Q_2, \Sigma_1 \cap \Sigma_2, \delta, \Gamma_{1 \times 2}, (q_{01}, q_{02}), Q_{m1} \times Q_{m2} \rangle$$

$$\text{Donde } \delta((q_1, q_2), \sigma) = \begin{cases} (\delta_1(q_1, \sigma), \delta_2(q_2, \sigma)) & \text{si } \sigma \in \Gamma_1(q_1) \cap \Gamma_2(q_2) \\ \text{indefinido} & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

$$\text{Y así, } \Gamma_{1 \times 2}(q_1, q_2) = \Gamma_1(q_1) \cap \Gamma_2(q_2)$$

En el producto una transición debe estar sincronizada por un evento en común, esto es, un evento en $\Sigma_1 \cap \Sigma_2$. Por esta razón es que se le llama una operación restrictiva.

Además se puede decir que $L(G_1 \times G_2) = L(G_1) \cap L(G_2)$ y $L_m(G_1 \times G_2) = L_m(G_1) \cap L_m(G_2)$.

Composición paralela

A diferencia del producto, la composición paralela no es una operación restrictiva, y es por esto que esta es la mejor forma de modelar una planta completa a partir de sus partes.

$$G_1 \parallel G_2 = \langle Q_1 \times Q_2, \Sigma_1 \cup \Sigma_2, \delta, \Gamma_{1 \parallel 2}, (q_{01}, q_{02}), Q_{m1} \times Q_{m2} \rangle.$$

$$\text{Donde, } \delta((q_1, q_2), \sigma) = \begin{cases} (\delta_1(q_1, \sigma), \delta_2(q_2, \sigma)) & \text{si } \sigma \in \Gamma_1(q_1) \cap \Gamma_2(q_2) \\ (\delta_1(q_1, \sigma), q_2) & \text{si } \sigma \in \Gamma_1(q_1) \setminus \Sigma_2 \\ (q_1, \delta_2(q_2, \sigma)) & \text{si } \sigma \in \Gamma_2(q_2) \setminus \Sigma_1 \\ \text{indefinido} & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

De esta manera $\Gamma_{1||2}(q_1, q_2) = [\Gamma_1(q_1) \cap \Gamma_2(q_2)] \cup [\Gamma_1(q_1) \setminus \Sigma_2 \cup \Gamma_2(q_2) \setminus \Sigma_1]$.

Bloqueo

A partir de las definiciones de G , $L(G)$, $L_m(G)$, se tiene que

$$L_m(G) \subseteq \overline{L_m(G)} \subseteq L(G).$$

Se dice que un autómata es *no bloqueante* si es capaz de alcanzar un estado marcado desde cualquier estado alcanzable.

Definición 2.6 (Bloqueo)

Un autómata G se dice que es bloqueante si:

$$\overline{L_m(G)} \subset L(G).$$

Y es no bloqueante si:

$$\overline{L_m(G)} = L(G).$$

2.2.2. Teoría de control supervisorio desde los sistemas de eventos discretos

El punto de partida de la Teoría de Control Supervisorio (SCT) considera que el sistema, denominado *planta* y modelado como un sistema de eventos discretos, exhibe un comportamiento *no controlado* y que además es un generador de lenguajes sobre un alfabeto de eventos.

Este comportamiento debe ser modificado mediante un sistema de control realimentado para alcanzar un conjunto dado de especificaciones.

Si el sistema es de eventos discretos y está modelado mediante el autómata G , que representa el comportamiento no controlado, la premisa es que este comportamiento no es satisfactorio y debe ser modificado, es decir, se requiere restringir el comportamiento a un subconjunto de $L(G)$. Para alterar el comportamiento de G se introduce un *supervisor*, que se denota S .

El lenguaje $L(G)$ contiene cadenas que no son aceptables porque violan alguna condición de seguridad o de no bloqueo que se le desea imponer al sistema. Podrían entonces algunos estados de G ser no deseables y deberían ser evitados.

Se pueden presentar también algunas cadenas de $L(G)$ que contienen subcadenas que violan algún orden deseado de ciertos eventos o subcadenas que representan una secuencia de eventos que se desea que ocurran. De esta forma se deben considerar sublenguajes de $L(G)$ que representan el comportamiento admisible del sistema controlado. A estos sublenguajes se les denomina *especificaciones*. Un comportamiento controlado que permanece dentro del lenguaje admisible es llamado *seguro*.

Una especificación puede ser *parcial* o *total*. El alfabeto de una especificación parcial es un subconjunto estricto del alfabeto de la planta. Si los alfabetos de la especificación y de la planta son iguales, la especificación es total. La especificación total establece el comportamiento completo deseado y el permitido. La especificación también puede ser *estática* o *dinámica*. Una *especificación estática* puede ser expresada como un conjunto de estados permitidos o prohibidos en el autómata de la planta. Si un estado es prohibido, entonces todas las secuencias de eventos que llevan el sistema

desde el estado inicial hasta un estado prohibido, deben ser prohibidas. Esto implica que estas cadenas no pueden ser expresadas en la especificación estática, exigiendo otro tipo de representación. La *especificación dinámica* expresa las cadenas de eventos permitidas y prohibidas como un autómata.

En esta estructura de control propuesta por Ramadge y Wonham [66], S *observa* algunos o posiblemente todos los eventos que G genera y establece cuales de esos eventos, disponibles en el conjunto de eventos activos de G , se permiten para ser ejecutados.

Más precisamente, S tiene la capacidad de deshabilitar algunos, pero no necesariamente todos, los eventos factibles de G . De este modo, S ejerce una acción de control realimentado sobre G (ver Figura 2.5).

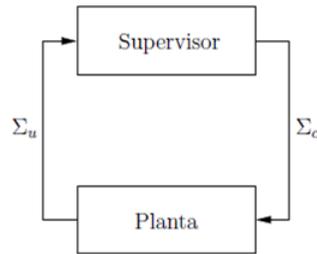


Figura 2.5: Estructura control supervisorio

Dos consideraciones se establecen con respecto al supervisor. S está limitado en términos de los eventos generados por G que puede observar y está limitado a los eventos de G que puede deshabilitar. Se toman en cuenta entonces los eventos *observables* en Σ , aquellos que S puede observar y los eventos *controlables* en Σ , aquellos que S puede deshabilitar.

La función de transición de G puede ser controlada por S en el sentido que los eventos controlables de G pueden ser dinámicamente habilitados o deshabilitados por

S . Formalmente, S es una función desde el lenguaje generado por G hacia el conjunto potencia de Σ , lo cual se expresa como:

$$S : L(G) \rightarrow \{\gamma \in 2^\Sigma : \Sigma_{nc} \subseteq \gamma\}$$

Donde 2^Σ expresa el conjunto de potencia de Σ . El patrón de control de γ es un subconjunto de Σ que contiene todos los eventos no controlables.

Dado un autómata G y un supervisor admisible S , el sistema en lazo cerrado resultante se denota mediante S/G y se lee: “ S controla a G ”. El sistema controlado S/G es un DES y se pueden caracterizar sus lenguajes generado y marcado. Esos dos lenguajes son simplemente los subconjuntos del lenguaje generado $L(G)$ y del lenguaje marcado $L_m(G)$ que contienen cadenas que permanecen factibles en presencia de S . Esto se formaliza de la siguiente manera:

Definición 2.7 (Lenguajes generado y marcado por S/G)

El lenguaje generado por S/G se define recursivamente como:

1. $\{\varepsilon\} \in L(S/G)$.
2. $[(s \in L(S/G)) \wedge (s\sigma \in L(G)) \wedge (\sigma \in S(s))] \Leftrightarrow [s\sigma \in L(S/G)]$.

El lenguaje marcado por S/G se define:

$$L_m(S/G) := L(S/G) \cap L_m(G).$$

Claramente, $L(S/G) \subseteq L(G)$ y es prefijo cerrado por definición. Para $L_m(S/G)$, consiste exactamente en las cadenas marcadas de G que se mantienen bajo el control de S . De todo esto se tiene el siguiente conjunto de inclusiones [66]:

$$\emptyset \subseteq L_m(S/G) \subseteq \overline{L_m(S/G)} \subseteq L(S/G) \subseteq L(G).$$

Eventos observables y no observables

El conjunto de eventos Σ Puede dividirse en los conjuntos separados de eventos observables (Σ_o) y no observables (Σ_{no}), tales que $\Sigma_o \subseteq \Sigma$ y $\Sigma_{no} \subseteq \Sigma$. De esta forma se diferencian los eventos que son reportados a un supervisor particular y los que no son reportados.

En sistemas *parcialmente observables* ($\Sigma_o \neq \Sigma$) los requisitos para la síntesis del supervisor son más complicados. Para reducir la complejidad en la síntesis, esta propuesta sólo cubre la teoría para sistemas *completamente observables* ($\Sigma_o = \Sigma$), dado que el interés fundamental no se centra en la síntesis del supervisor si no en una propuesta de supervisión que incorpore atributos holónicos. Se deja para futuros desarrollos la integración de la síntesis en sistemas parcialmente observables.

Controlabilidad

Sea K un sublenguaje de $L(G)$ que representa la *especificación*, es decir, el conjunto deseado de secuencias del sistema controlado y que satisface $K = L_m(S/G)$. Además, $K \subseteq L_m(G) \wedge K \neq \emptyset$. Entonces, existe un supervisor S tal que $L(S/G) = \overline{K}$ sí y sólo sí:

$$\overline{K}\Sigma_{nc} \cap L(G) \subseteq \overline{K}.$$

Esta condición en K se denomina *condición de controlabilidad* y establece que un lenguaje que haga controlable la ejecución de un evento no controlable, no debe generar una secuencia que no esté en K .

Síntesis del supervisor

El efecto de S sobre G puede ser capturado mediante la composición paralela de autómatas. Esta es la base para la síntesis del supervisor. En la síntesis se construye una

lista fuera de línea de las acciones de control de S , para todos los posibles comportamientos del sistema controlado $L(S/G)$. Esta realización puede ser almacenada y ejecutada en línea, “leyendo” la acción de control deseada, esto es, la acción de control (evento controlado) para la cadena de eventos observada.

Los pasos para realizar la síntesis son los siguientes:

- Se realiza la composición paralela entre la planta y la especificación.
- Se verifica si existen estados prohibidos, de haberlos se suprimen.
- Se verifica la condición de no bloqueo. De haber estados que lleven a bloqueo se suprimen.
- Se verifica la controlabilidad, si existen eventos que lleven a la no controlabilidad, se evitan.
- Se repiten las verificaciones de no bloqueo y controlabilidad hasta obtener el supervisor.

El siguiente algoritmo fue propuesto por [92], donde:

Compare, es una función que realiza la composición paralela entre dos autómatas, en la que se pueden obtener algunos estados que son prohibidos.

Purge, es una función que toma los estados prohibidos y los quita del autómata.

Q_{co} , es el conjunto de estados co-accesibles.

M_G , es el conjunto de estados marcados de G .

X_G , es el conjunto de estados prohibidos de G .

Q_X , es el conjunto de los estados bloqueantes más los estados prohibidos previos.

El algoritmo es el que se muestra en la página siguiente.

2.2.3. Redes de Petri como generadoras de lenguajes

Las PN se relacionan con la teoría de control supervisorio mediante autómatas y lenguajes. Las PN más apropiadas para la generación de lenguajes son las denominadas PN etiquetadas [93]. A partir de la obtención de todo el espacio de estados de la PN etiquetada, denominado árbol o grafo de alcanzabilidad, se obtiene un autómata determinístico y los lenguajes generado y marcado.

Se presenta a continuación la notación de redes de Petri utilizada en este trabajo y las propiedades que debe verificar la PN para ser aplicadas como generadoras de lenguajes y en la síntesis de supervisores. Información adicional se puede encontrar en [67, 85, 90, 93–95].

Redes de Petri ordinarias

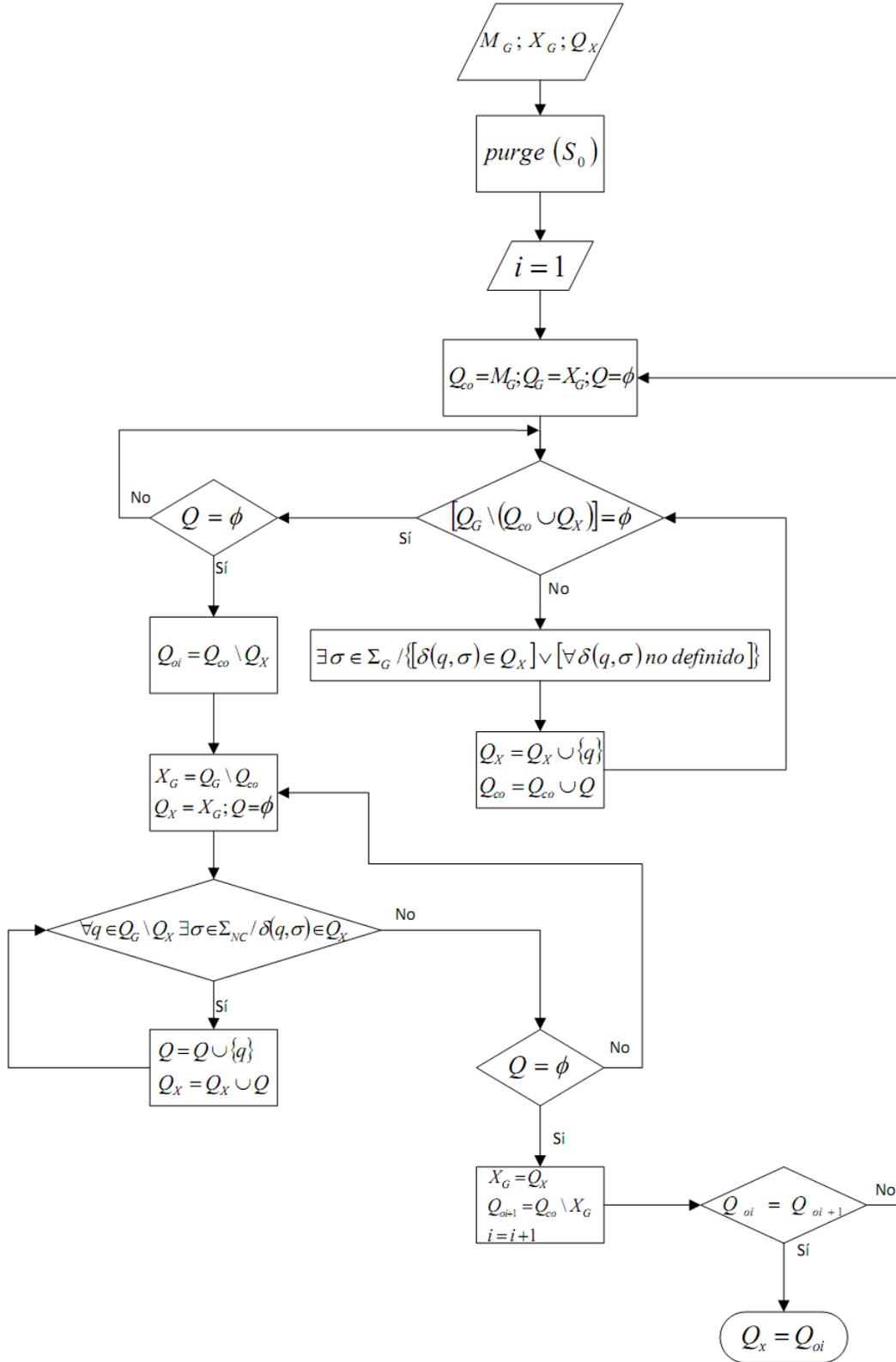
Definición 2.8 (Red de Petri ordinaria [85])

Una red de Petri ordinaria es una estructura $\mathcal{N} = \langle P, T, F \rangle$ donde:

P , es un conjunto finito no vacío de lugares, $|P| = m$.

T , es un conjunto finito no vacío de transiciones, $|T| = n$.

F , es un conjunto de arcos, tales que $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$.



Definición 2.9 (Red de Petri marcada)

Un marcaje M de una estructura \mathcal{N} es una proyección $M : P \rightarrow \mathbb{N} \cup \{0\}$, que asigna a cada lugar un número de marcas \mathbb{N} . Una estructura \mathcal{N} con un marcaje inicial M_0 se denomina una red de Petri marcada y se denota $\langle \mathcal{N}, M_0 \rangle$.

Es útil expresar el marcaje como un vector. Se define el vector de marcaje como $[M(p_1) \ M(p_2) \ \dots \ M(p_m)]^T$, donde p_1, p_2, \dots, p_m son los lugares de la red.

Definición 2.10 (Conjuntos de entrada/salida)

Se definen los siguientes conjuntos:

Lugares de entrada a la transición t :

$$\bullet t = \{p \in P : (p, t) \in F\}.$$

Lugares de salida de la transición t :

$$t \bullet = \{p \in P : (t, p) \in F\}.$$

Definiciones similares aplican para las transiciones de entrada y de salida.

Definición 2.11 (Transición sensibilizada)

Una transición $t \in T$ está sensibilizada en un marcaje M si

$$\forall p \in \bullet t : M(p) \geq 1.$$

Una transición sensibilizada en un marcaje M puede disparar y hace evolucionar el marcaje hacia un marcaje M' siguiendo la siguiente regla [85]:

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) + 1 & \text{si } p \in t \bullet \setminus \bullet t \\ M(p) - 1 & \text{si } p \in \bullet t \setminus t \bullet \\ M(p) & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

El disparo de la transición t que lleva al marcaje M' desde el marcaje M , se puede escribir como:

$$M[t\rangle M'.$$

Una *secuencia de disparo* desde M_0 es una secuencia de transiciones $\sigma = t_1 \dots t_k$, tal que $M_0[t_1\rangle M_1[t_2\rangle \dots [t_k\rangle M_k$. Para expresar que una secuencia de disparo σ lleva a M_k desde M_0 , se escribe:

$$M_0[\sigma\rangle M_k.$$

Un marcaje M es alcanzable en $\langle \mathcal{N}, M_0 \rangle$ si existe una secuencia de disparo σ tal que $M_0[\sigma\rangle M$. El conjunto de todos los marcajes alcanzables se denota $\mathcal{R}(\mathcal{N}, M_0)$.

Propiedades

Definición 2.12 (Red acotada)

Una red de Petri marcada $\langle \mathcal{N}, M_0 \rangle$ es acotada si existe un entero k tal que:

$$\forall M \in \mathcal{R}(\mathcal{N}, M_0), \forall p \in P : M(p) \leq k.$$

Definición 2.13 (Red segura)

Una red de Petri marcada $\langle \mathcal{N}, M_0 \rangle$ es segura si es acotada y $k = 1$, esto es:

$$\forall M \in \mathcal{R}(\mathcal{N}, M_0), \forall p \in P : M(p) \leq 1.$$

Definición 2.14 (Red viva)

En una red de Petri marcada $\langle \mathcal{N}, M_0 \rangle$, se dice que una transición t es viva si

$$\forall M \in \mathcal{R}(\mathcal{N}, M_0) \exists M' \in \mathcal{R}(\mathcal{N}, M).$$

Tal que esa t esté habilitada por M' . Se dice que $\langle \mathcal{N}, M_0 \rangle$ es viva si todas las transiciones son vivas.

Redes de Petri etiquetadas

La extensión de las redes de Petri más apropiadas para ser empleadas como generadoras de lenguajes son las redes de Petri etiquetadas, según las presenta Peterson [93]. En estas redes, a cada transición $t \in T$ se le asigna una etiqueta. Cada etiqueta es un evento que pertenece al conjunto de eventos Σ del sistema, estableciendo así un vínculo directo entre las PN, los sistemas de eventos discretos y la teoría de lenguajes.

Definición 2.15 (PN etiquetada [85])

Una PN etiquetada es una estructura $\langle \mathcal{N}, \ell, M_0 \rangle$, donde:

$\langle \mathcal{N}, M_0 \rangle$, es una red marcada.

$\ell : T \rightarrow \{2^\Sigma \cup \varepsilon\}$, es una etiqueta que asigna a cada transición un evento.

ε , es el evento silencioso

ℓ , puede ser extendida a los cerramientos de Kleene de T , T^* y de Σ , Σ^* .

Cuando cada transición $t \in T$ está etiquetada con un evento simple $\alpha \in \Sigma$ y no hay dos transiciones con la misma etiqueta, se dice que la PN es *free-labeled*.

Árbol de alcanzabilidad de una PN etiquetada

El espacio alcanzable $\mathcal{R}(\mathcal{N}, M_0)$ de una PN $\langle \mathcal{N}, \ell, M_0 \rangle$ puede ser expresado mediante un *árbol o grafo de alcanzabilidad*. El árbol de alcanzabilidad es un grafo dirigido cuyos nodos son los marcajes alcanzables $\mathcal{R}(\mathcal{N}, M_0)$ y los arcos están etiquetados con las etiquetas $\ell(t)$. El grafo dirigido es tal que:

$\forall M, M' \in \mathcal{R}(\mathcal{N}, M_0)$ existe un arco dirigido desde M hasta M' , que está etiquetado por $\ell(t)$ si $M[t]M'$.

Lenguajes Generado y Marcado de una PN

Las redes de Petri pueden ser transformadas a autómatas finitos mediante el árbol de alcanzabilidad.

Si la PN etiquetada es *free-labeled* y es *segura* el árbol de alcanzabilidad de la PN es un autómata de estados finitos determinístico.

Formalmente, el autómata equivalente de una PN se expresa como sigue.

Si $\langle \mathcal{N}, \ell, M_0 \rangle$ es una PN etiquetada, el autómata equivalente es:

$$G = \langle Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m \rangle, \text{ donde:}$$

$Q = \mathcal{R}(\mathcal{N}, M_0)$, es el conjunto de marcajes alcanzables desde M_0 .

$\Sigma = \bigcup_{t \in T} \ell(t) \setminus \{\varepsilon\}$, es el conjunto de eventos formado a partir de las etiquetas $\ell(t)$.

δ , es la función de transición y es tal que: $M' \in \delta(M, \sigma)$ *iff* $M[t]M' \wedge \sigma \in \ell(t)$. En la terminología de las PN, la expresión de la función de transición del autómata $\delta(M, \sigma) = M'$, es equivalente a $M[t]M'$

$q_0 = M_0$, es el estado inicial que se obtiene a partir del marcaje inicial de la red.

Q_m , es el conjunto de marcajes finales.

Teniendo la PN expresada como un autómata, se pueden definir los lenguajes de la misma.

Definición 2.16 (Lenguaje Generado por una PN etiquetada)

El lenguaje generado $L(G)$ por una PN etiquetada (\mathcal{N}, ℓ, M_0) , cuyo árbol de alcanzabilidad es G , está dado por:

$$L(G) = \{\ell(\sigma) \in \Sigma^* \mid \sigma \in T^*, \exists M' \ni M_0[\sigma]M'\}.$$

Definición 2.17 (Lenguaje Marcado de una PN etiquetada)

El lenguaje Marcado $L_m(G)$ de una PN etiquetada (\mathcal{N}, ℓ, M_0) , cuyo árbol de alcanzabilidad es G , está dado por [85, 90]:

$$L_m(G) = \{\ell(\sigma) \in \Sigma^* \mid \sigma \in T^*, M_0[\sigma]M \in Q_m\}.$$

Conclusiones

- El potencial de la teoría de control supervisorio basada en la teoría de lenguajes para resolver el problema de control de sistemas de eventos discretos, se puede combinar con el poder de representación de las redes de Petri.
- El comportamiento del sistema se puede abstraer como una PN y si éste comportamiento es *acotado* y la PN que lo modela es *free-labeled*, se puede obtener un autómata de estados finitos a partir del espacio de estados representado mediante el árbol de alcanzabilidad.
- Teniendo un autómata y los lenguajes generado y marcado, se verifican las propiedades de controlabilidad, no bloqueo, la existencia del supervisor y se realiza la síntesis.
- El asunto clave consiste entonces en expresar adecuadamente la planificación, programación y reprogramación de la producción como problemas de control supervisorio en los que se deben generar controladores máximo permisivos que aseguren la mejor utilización de los recursos y que no impongan restricciones

innecesarias con respecto a estados prohibidos y a la controlabilidad de las transiciones entre estados.

- La supervisión del proceso continuo también se expresa en términos del control supervisorio en el que un supervisor conduce el proceso desde un estado inicial hasta un estado final en un tiempo finito, permitiendo así la aplicación de SCT para la síntesis.

Capítulo 3

Planificación y programación de la producción

Introducción

Los sistemas de producción convencionales establecen una arquitectura jerárquica en la que las funciones de toma de decisiones, también llamadas funciones de coordinación que incluyen en un nivel superior, la planificación de la producción y el manejo de las operaciones. En el nivel inmediatamente inferior comprenden la programación de la producción y la optimización. En el nivel siguiente, en orden descendente, la supervisión del proceso, dentro de la cual se puede considerar la reprogramación de la producción, cuando se presentan perturbaciones. Luego vienen los niveles de ejecución de la producción, en los que se tienen las funciones de control básicas y el proceso.

Las funciones de los tres niveles superiores son centralizadas, mientras que en la actualidad se nota la tendencia a tener controladores descentralizados en el nivel de ejecución. La estructura se muestra en la Figura 3.1 [5].

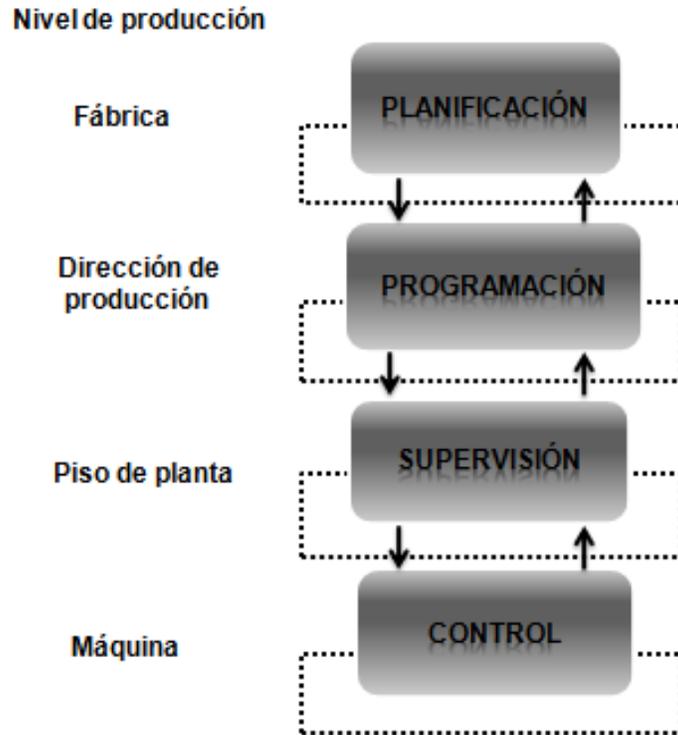


Figura 3.1: Sistema de control jerárquico

El nivel de planificación de la producción es responsable de calcular las cantidades óptimas y de determinar la factibilidad de cumplir una orden de producción, con base en sus capacidades y la disponibilidad de los recursos. Además, define las secuencias de operaciones genéricas o agregadas que se deben seguir para los productos, establece las configuraciones posibles para el cumplimiento de la orden y planifica las necesidades de materia prima y energía. Según la descomposición que hace el planificador de la orden en secuencias de operaciones, se hace la asignación nominal de estas operaciones a tipos de recursos, sin determinar el recurso específico ni los tiempos.

En el caso de los procesos continuos, la programación de la producción asigna los recursos específicos para las operaciones y establece los tiempos de inicio y fin y la duración de las operaciones.

En el nivel de supervisión se hace el seguimiento y control de la orden de producción y de los recursos y se toman las acciones para dar respuesta a las perturbaciones que alteran el programa de producción. Esto incluye la reprogramación de la producción.

Desde la perspectiva del enfoque holónico, el problema de la planificación y la programación de la producción ha sido abordado en profundidad en [4,96–102]. En [103], una meta global se da a un sistema holónico de producción y metas locales se dan a cada holón mediante técnicas distribuidas de negociación y optimización. Una revisión sobre trabajos de planificación distribuida y programación de holones reconfigurables se puede consultar en [5,42,100], donde se propone una arquitectura distribuida basada en el paradigma holónico, para el control reconfigurable de operaciones en procesos continuos. La propuesta distribuye las funcionalidades de planificación, programación, coordinación y control.

La propuesta de la Unidad de Producción Holónica (UPH) establece que cada holón tiene el conocimiento necesario para planificar, programar, supervisar y controlar su producción, lo que lleva a un esquema descentralizado de toma de decisiones como el que se muestra en la Figura 3.2.

La orden de producción, dentro de la propuesta holónica de la UPH, está contenida en la *misión del holón*, y ella a su vez también se planifica, se programa y se ejecuta, lo que incluye mecanismos de supervisión de la ejecución.

La estructura del holón comprende entonces los recursos físicos que realizan los procesos de transformación y el sistema de toma de decisiones (STD) que le dan la inteligencia y la autonomía para ejecutar el proceso productivo.

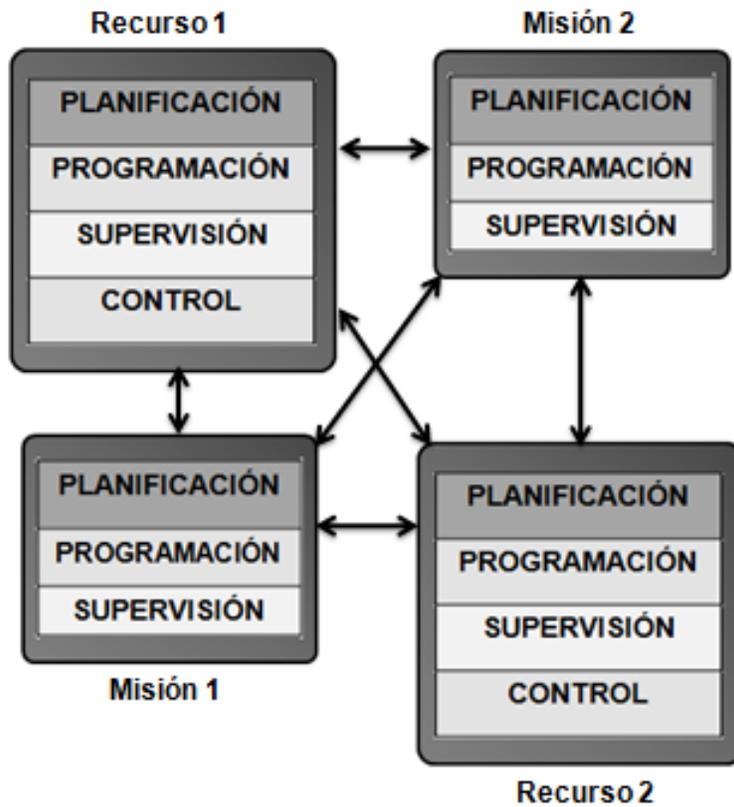


Figura 3.2: Esquema descentralizado

Para comunicarse y conectarse con otras UPH, el holón cuenta con puertos de entrada y salida de producto y puertos de comunicaciones para recibir y enviar mensajes que le habilitan a participar en holarquías, como se ve en la Figura 3.3. La conexión entre recursos dentro de la UPH se muestra en la Figura 3.4.

La interconexión de puertos de entrada y salida de producto determina las posibles configuraciones de la planta y las rutas de producto.

En la Figura 3.5 se presenta el diagrama de clases para la UPH, en el que se ilustran los componentes del sistema de toma de decisiones que se propone y sus relaciones con los demás componentes de la arquitectura holónica. Cada uno de ellos se explica en detalle en las secciones siguientes y en el capítulo 5.

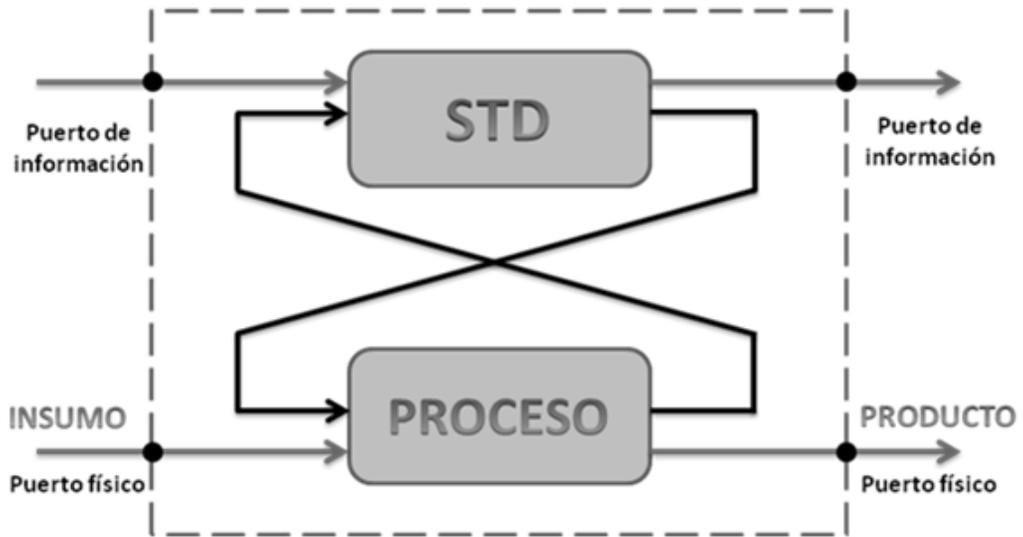


Figura 3.3: Estructura del holón

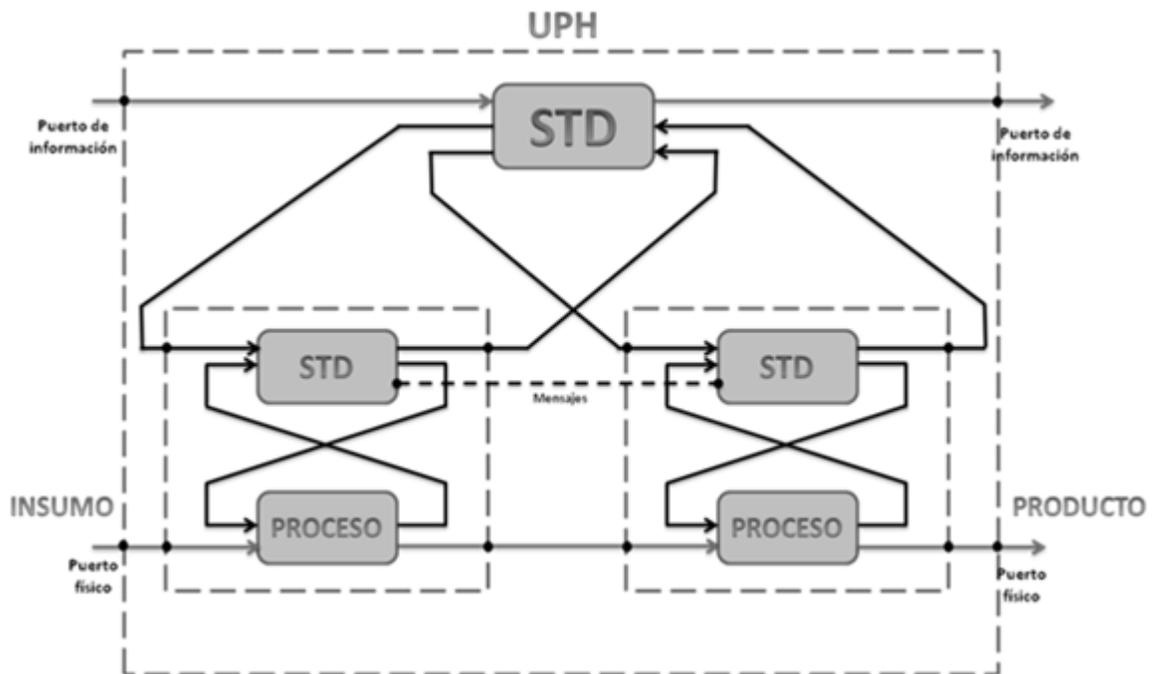


Figura 3.4: Conexiones entre los holones en una UPH

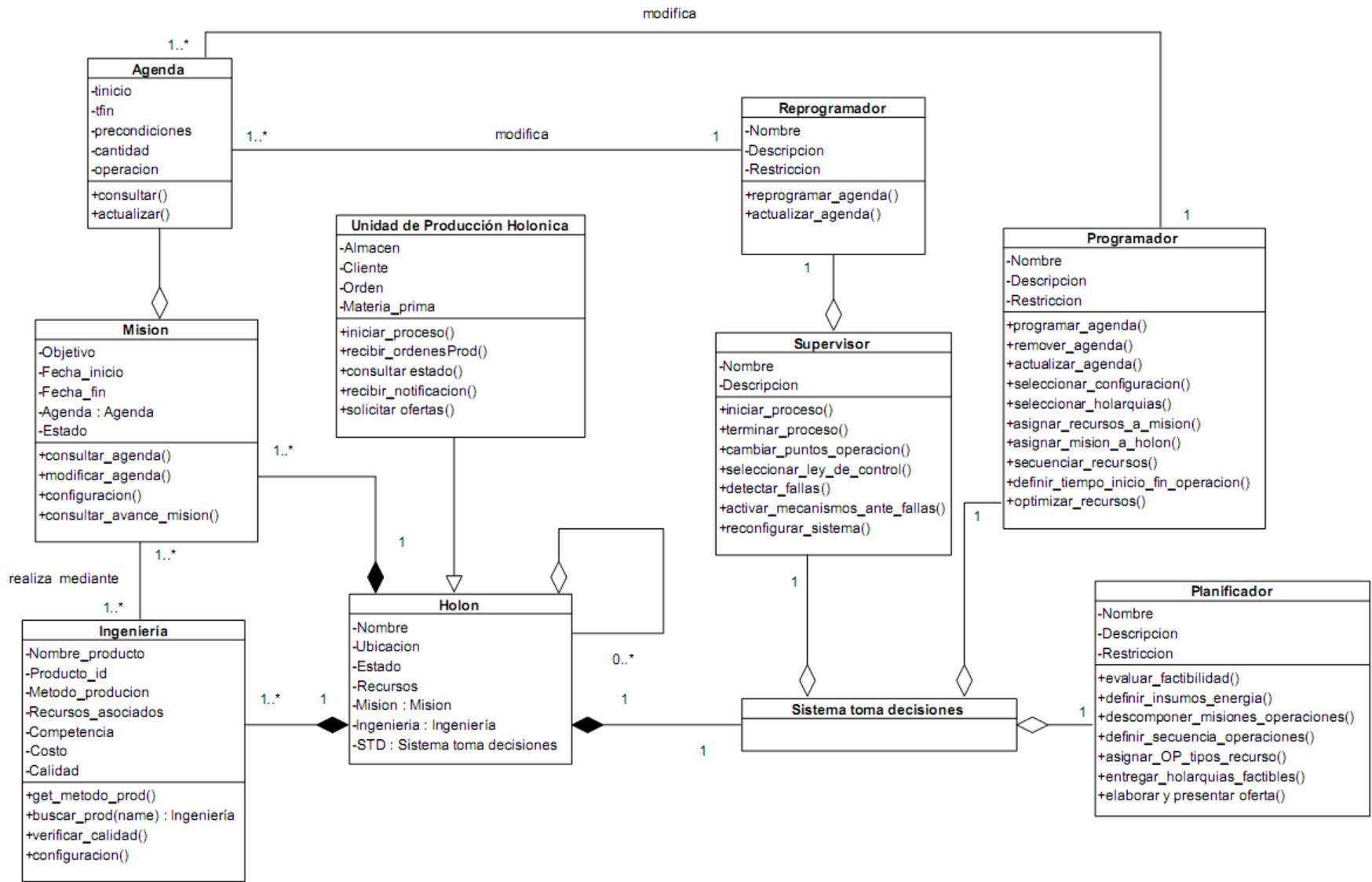


Figura 3.5: Modelo UML

3.1. Planificación de la Producción

La *planificación de la producción* define la forma como se obtiene el producto, incluyendo todas las secuencias posibles de las operaciones y genera planes para productos individuales, entregando la secuencia de los recursos requeridos y los tiempos de producción. Define el volumen de producción y los momentos en que debe iniciarse, estableciendo un equilibrio entre la producción y la capacidad en los distintos niveles en los que se realiza la planificación. En resumen, la *planificación* maneja la estrategia de producción y su factibilidad con los recursos existentes.

La *planificación* desde el enfoque jerárquico convencional se puede dar en tres niveles, como se muestra en la Figura 3.6, ubicándose esta propuesta en los niveles táctico (componente de *production planning*) y operacional (*production scheduling*) [104].

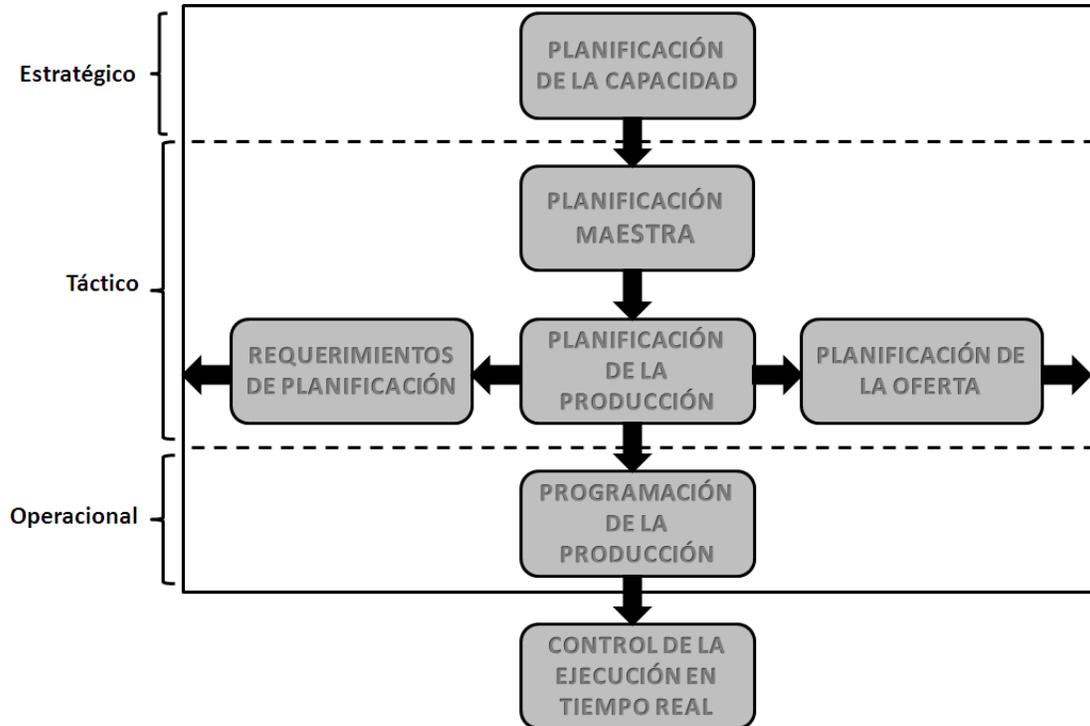


Figura 3.6: Niveles de planificación jerárquica. Tomado de [104]

Formalmente se tiene en el planificador:

- I. Un horizonte de planificación dividido, en un conjunto T de nT períodos de tiempo.
- II. Un conjunto I de nI productos con un costo de mantenimiento hi ; y una demanda di para el producto $i \in I$.

El planificador conoce:

- I. Capacidad de los recursos.
- II. Los costos de producción.

En la definición de secuencias de las operaciones, el *planificador* establece la sincronización entre los recursos, resuelve los eventuales conflictos que se puedan generar debido al uso de recursos compartidos y debe garantizar que en las condiciones definidas en el plan, es posible producir determinado producto y que la misión negociada por la UPH es factible.

El *planificador* entrega todas las posibles configuraciones que la UPH puede ofrecer para ejecutar el proceso productivo y evalúa alternativas de planes factibles para el producto usando diferentes rutas.

Los *recursos*, con base en el conocimiento que tienen del proceso que realiza y del conocimiento de su estado, que le permiten establecer su disponibilidad y capacidad actual, envían al *planificador* una oferta que contiene básicamente la capacidad de

producción actual, el costo, la calidad, la confiabilidad y la información relacionada con tiempos de producción. Con esta información se lleva a cabo el proceso de negociación.

Como parte del proceso de negociación, un *planificador holónico* define las holarquías y los holones que están en capacidad de realizar la misión.

En definitiva, el problema de un *planificador holónico* puede ser formulado así: Dada una misión, con una demanda de un producto específico y un plazo de entrega, encontrar un conjunto de holones y holarquías de la UPH que puedan realizar esa misión.

Según el diagrama de clases de la Figura 3.5, las operaciones del *planificador* son:

- Evaluar factibilidad para realizar la misión.
- Definir insumos y energía requeridos para realizar la misión.
- Generar requerimientos de materiales.
- Descomponer misión en operaciones.
- Definir secuencias de operaciones (sin definir recursos específicos).
- Elaborar y presentar ofertas, cuando la UPH es convocada como holón para una misión.
- Solicitar ofertas, cuando la UPH convoca holones para una misión.
- Asignar operaciones a tipos de recursos.
- Entregar holarquías con las cuales es factible la misión.

Planteando apropiadamente las operaciones del *planificador* como un problema de control supervisorio, se pueden aplicar las redes de Petri y el análisis mediante el árbol de alcanzabilidad para sintetizar un supervisor que encuentre la combinación de los recursos que pueda realizar una misión. Además debe sincronizar su utilización, evitar conflictos entre ellos, verificar las restricciones operacionales, evitar que el sistema llegue a estados prohibidos y permitir que alcance estados de finalización satisfactoria. Sobre esa concepción se fundamenta la propuesta que se presenta.

Soluciones desde este enfoque, que elaboran un modelo compuesto de productos y recursos mediante PN y que realizan la síntesis desde la teoría de control supervisorio mediante análisis del árbol de alcanzabilidad se encuentran en [9, 67, 68, 105–108].

3.1.1. Negociación de la misión

Para realizar el proceso de negociación se hace uso del protocolo más utilizado para negociar tareas en sistemas distribuidos, denominado *ContractNet* [109]. Este protocolo fue propuesto por [110] y ha sido empleado para negociación y formación de holarquías en sistemas holónicos por [61, 62, 111, 112] y para negociación en sistemas Multi-Agente [113].

En *ContractNet*, los holones juegan dos roles: *iniciador* y *participante*. El *iniciador* es el administrador de la negociación y los *participantes*, los contratistas de la misión, es decir, los holones. El *iniciador* hace parte del *planificador* de la holarquía o de la UPH, según la instancia en la que se esté desarrollando el proceso.

El protocolo está compuesto por cinco etapas en las que se establece el contrato entre el *iniciador* y los participantes, tal como se ilustra en la Figura 3.7. Las primeras tres etapas se llevan a cabo entre el *planificador* de la UPH y los holones. La cuarta

etapa, en la que se analizan las ofertas, la desarrollan tanto el *planificador* como el *programador*.

La etapa restante del protocolo de negociación, la ejecuta el *programador* con los holones.

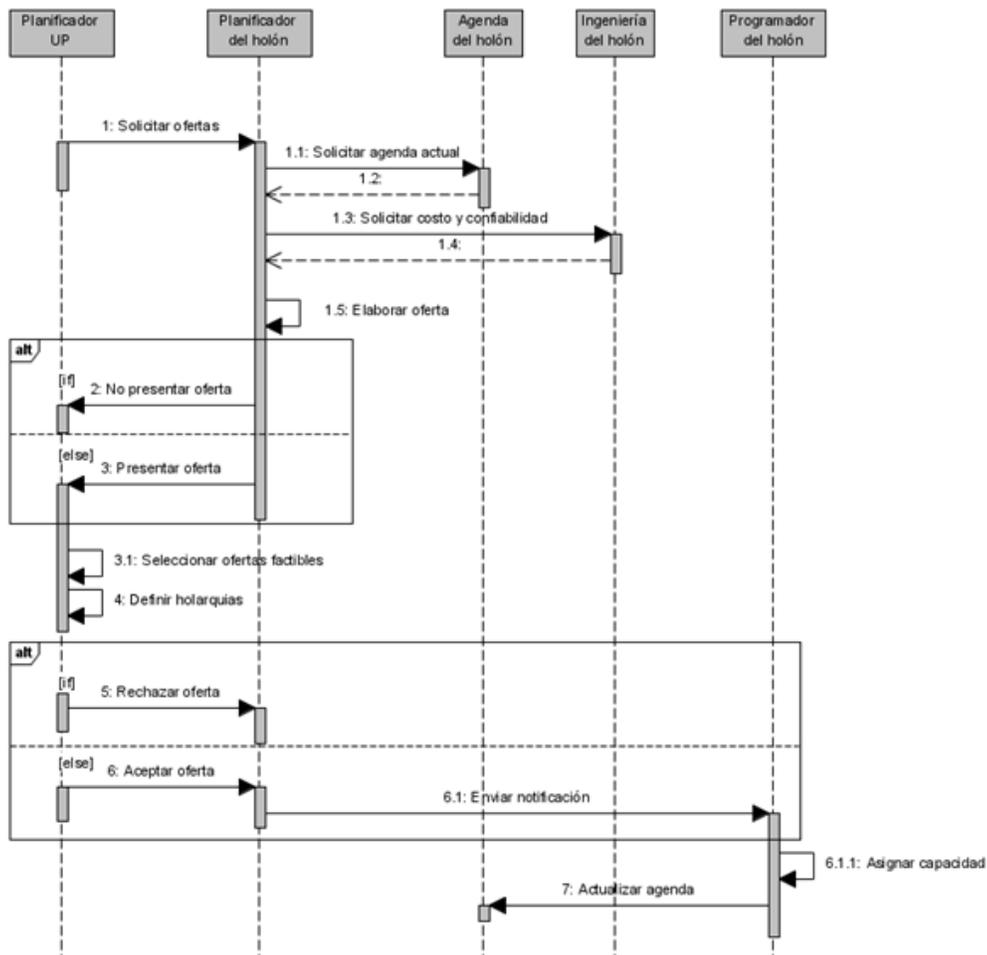


Figura 3.7: Diagrama de secuencia *ContractNet*

Una descripción más detallada de las etapas del protocolo, como se muestra en [3] es la siguiente:

- Solicitud de ofertas: el *planificador* solicita ofertas a los recursos para que compitan por una misión. La solicitud se envía a los holones mediante mensajes tipo *Multicast*, múltiples destinos a la vez.
- Elaboración de la propuesta: en respuesta a un anuncio de solicitud de propuesta, los *participantes* (holones) pueden evaluar su interés mediante la consulta al módulo ingeniería acerca de los requerimientos para producir: especificaciones funcionales, restricciones operacionales, disponibilidad de materiales, funcionalidad de recursos y su plan de procesamiento. Igualmente, el holón consulta su programa de producción y a partir de estos análisis, evalúa si tiene la competencia y la disponibilidad para producir, y elabora una oferta que contiene la cantidad de producto que puede entregar (capacidad declarada), el costo, la confiabilidad y la calidad. El plan de producción del holón está representado en su *agenda*, según se explica en la sección 4.2.1.
- Presentación de ofertas: cada holón envía su oferta al *planificador*. Esquemas más elaborados de *ContractNet*, como el que presenta [114] incluyen plazos de entrega de las ofertas para evitar que el proceso de negociación se quede bloqueado si no hay oferentes.
- Análisis de ofertas: el análisis de las ofertas se adelanta en dos etapas.
 - Con base en los datos que componen las ofertas, el *planificador* define los posibles holones y holarquías que pueden recibir la misión.
 - El *programador* recibe el conjunto de posibles holones y holarquías y aplica algoritmos de optimización, propios de cada proceso, para evaluar las ofertas. A partir de esta evaluación, se selecciona las configuraciones y los recursos, las cantidades de producto que debe elaborar cada uno y los tiempos de inicio y fin. Este proceso debe tener en cuenta las restricciones operacionales, para asignarle a cada holón, misiones que sean factibles.

- **Contratación:** Una vez definida la asignación de misiones, se envía un mensaje de aceptación o rechazo a cada holón. Para los holones que han sido contratados se envían los datos de la misión, con el fin de que los holones actualicen su programa de producción.

3.1.2. Análisis y selección de las configuraciones

La propuesta para analizar y seleccionar las configuraciones en sistemas de producción continuos utiliza modelos obtenidos mediante PN que combinan recursos de producción holónicos, con los productos que ellos están en capacidad de producir.

Los productos se descomponen en operaciones y si un *Holón Recurso* (HR) puede realizar una operación, se dice que tiene la “*competencia*” para esa operación.

Mediante los modelos de los productos y los HR, se construye una PN global de la UPH.

En la primera fase de negociación, se establece si existen configuraciones de la UPH para la elaboración del producto y la factibilidad de la misión desde la perspectiva de la configuración. Las configuraciones se obtienen a partir del árbol de alcanzabilidad de la PN, aplicando el algoritmo de síntesis del supervisor que lleve a terminaciones satisfactorias del producto. Si existen varias configuraciones posibles, se utilizan criterios de optimización para la selección definitiva de la configuración de la UPH para la misión que se está negociando. Esta fase de la negociación se realiza fuera de línea y permite además formar las holarquías que serán responsables de la misión. Para cada holarquía se genera una PN siguiendo los mismos principios de construcción aplicados para la UPH, evidenciando la recursividad del paradigma holónico.

Construcción del modelo PN

Modelo del producto

Para construir la PN global se parte del modelo del producto. Se tendrá un modelo por cada producto que elabore la UPH y cada uno se especifica independientemente de cualquier sistema de producción. En el modelo se establecen las secuencias de operaciones requeridas para su obtención. Para la representación de productos en procesos continuos se usan los P-Graph propuestos por Fiedler [42], los cuales son grafos utilizados para modelar estructuras de red. Los vértices del grafo representan operaciones y materia prima y las conexiones representan flujo de material (Figura 3.8).

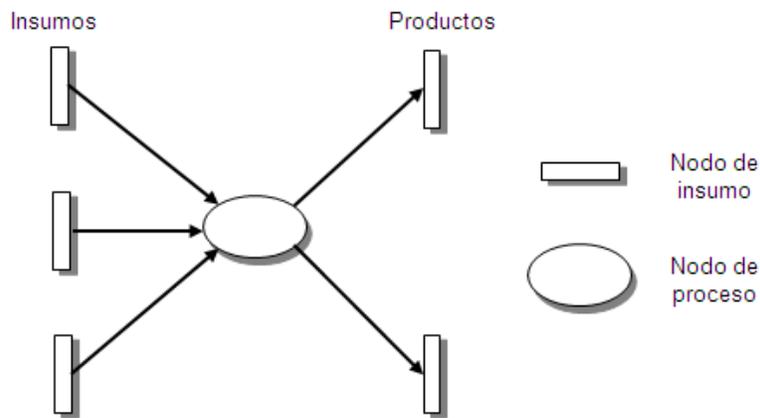


Figura 3.8: P-Graph

Para efectos de determinar una configuración, se considera la dinámica discreta del producto, no la dinámica continua. Es decir, para obtener un producto se requiere que haya disponibilidad de materia prima y que el nodo de proceso esté disponible para realizar la operación de transformación. El modelo no considera los flujos de masa y energía, sólo las condiciones necesarias para que se produzcan. Los nodos de proceso representan operaciones de transformación, como por ejemplo “calentar”, “enfriar”, “mezclar”, “separar”, “presurizar”. Estas operaciones indican las competencias exigidas a los recursos que las deben realizar.

La representación del producto mediante una PN se hace siguiendo la estructura de la Figura 3.9, en la que se muestra la materia prima, la operación requerida (competencia del recurso) y el producto obtenido.

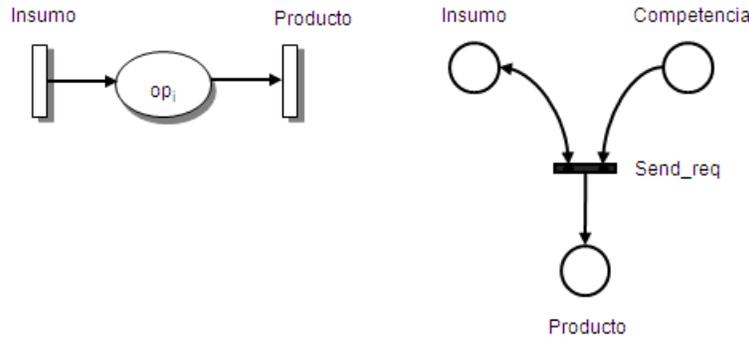


Figura 3.9: Modelo PN del producto

Por ejemplo, la línea de producción que se muestra en la Figura 3.10 permite obtener un producto cuyo modelo se representa en la Figura 3.11. El modelo PN de la dinámica discreta del producto se muestra en la Figura 3.12.

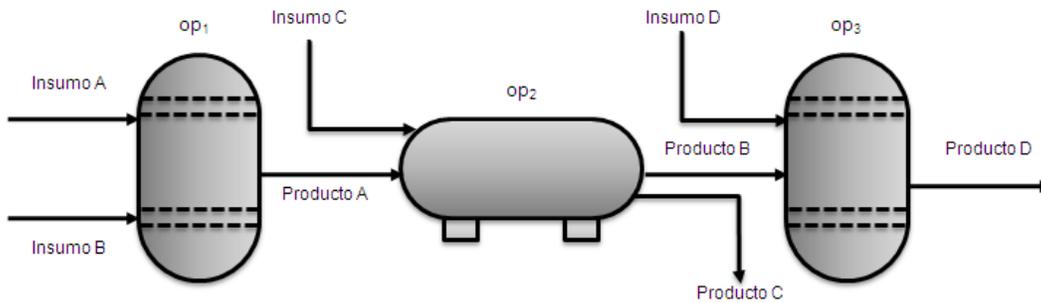


Figura 3.10: Proceso continuo

Modelo del holón recurso

Para determinar la configuración, se requiere conocer del holón recurso su disponibilidad y sus competencias. La disponibilidad permite establecer el marcaje inicial de la PN y las competencias permiten el enlace con el modelo del producto.

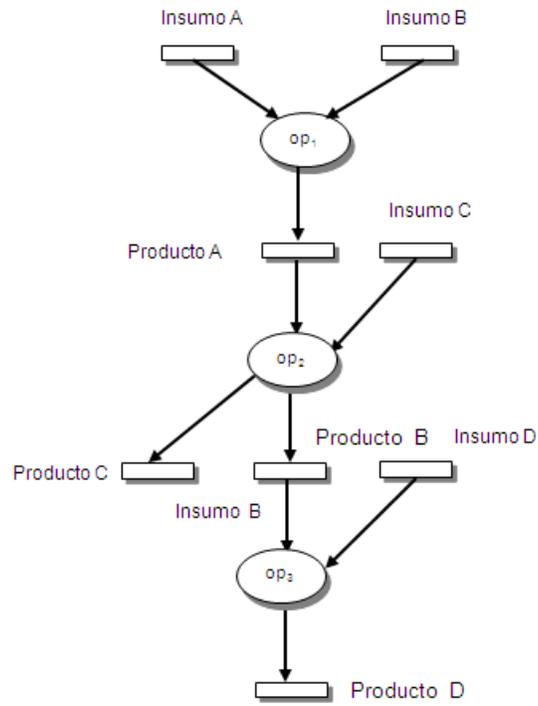


Figura 3.11: Grafo del producto

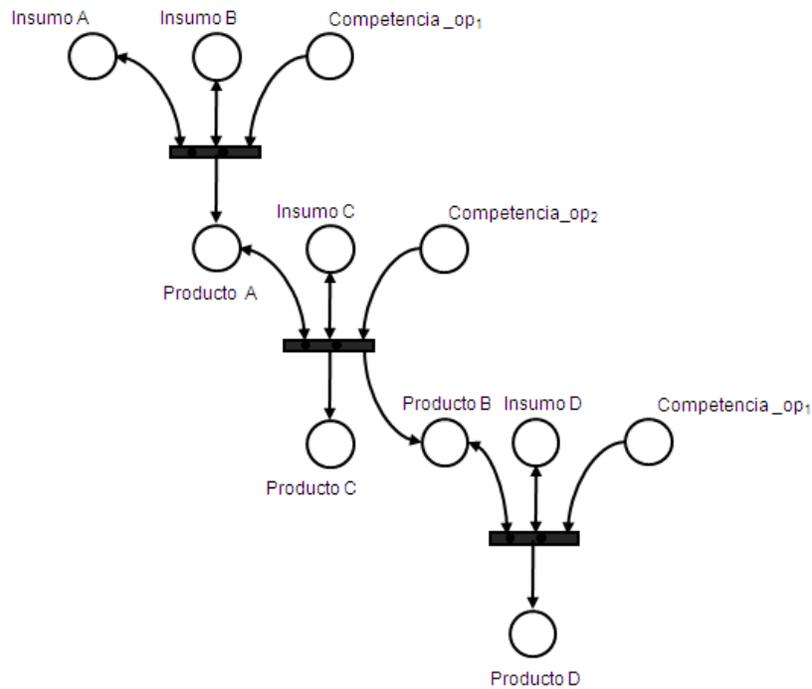


Figura 3.12: Dinámica discreta del producto representada mediante PN

De la PN del HR se determina la disponibilidad del recurso (si está realizando una operación, presenta una falla o está en mantenimiento).

La Figura 3.13 muestra el modelo y en el Cuadro 3.1 se presentan los estados y eventos.

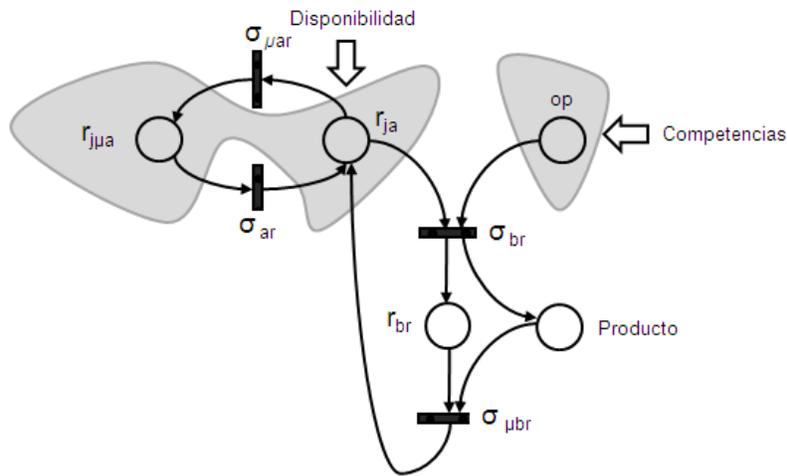


Figura 3.13: Modelo del recurso

Estados	Descripción
r_{ja}	Recurso j disponible
r_{jua}	Recurso j no disponible
op	Competencias
r_{jb}	Recurso j reservado
Eventos	Descripción
σ_{uar}	a no disponible
σ_{ar}	a disponible
σ_{br}	b reservado
σ_{ubr}	b no reservado

Cuadro 3.1: Estados y eventos del modelo

Modelo de las conexiones

Las conexiones garantizan el flujo del producto entre recursos y su disponibilidad o no disponibilidad incide en la definición de la configuración. Los modelos de las conexiones se obtienen desde las restricciones operacionales y físicas impuestas por

el proceso. Esas restricciones operacionales pueden ser expresadas como restricciones de comportamiento de un sistema de eventos discretos y de esa forma se facilita su representación en el modelo de la red de Petri. Para permitir el flujo de producto entre recursos conectados, cada uno de ellos tiene puertos de entrada y salida. Las disponibilidades de los puertos y de las conexiones también se incluyen en el modelo. En la Figura 3.14 se muestra la PN para las conexiones con sus respectivas leyendas en el Cuadro 3.2

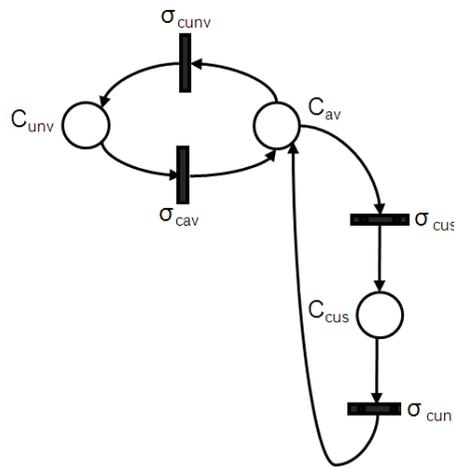


Figura 3.14: Modelo de las conexiones

Estados	Descripción
c_{av}	Conexión disponible
c_{unv}	Conexión no disponible
c_{cus}	Conexión usada
Eventos	Descripción
σ_{cav}	c disponible
σ_{cus}	c usada
σ_{cun}	c no reservada

Cuadro 3.2: Estados y eventos de las conexiones

Para los sistemas de las figuras 3.15, 3.16 y 3.18 que muestran un conjunto de unidades conectadas de distintas maneras, las válvulas permiten configurar distintos tipos de conexiones, entre las que se tienen:

- Recursos en conexión serie: la salida de producto de un recurso, ingresa directamente como insumo al siguiente recurso, sin que se presenten derivaciones en el recorrido.

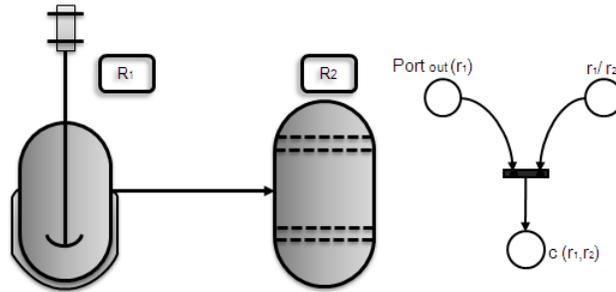


Figura 3.15: Recursos conectados en serie

- Bifurcación Asíncrona (Multiproducto): permite la distribución de producto a dos destinos, de manera simultánea o individual.

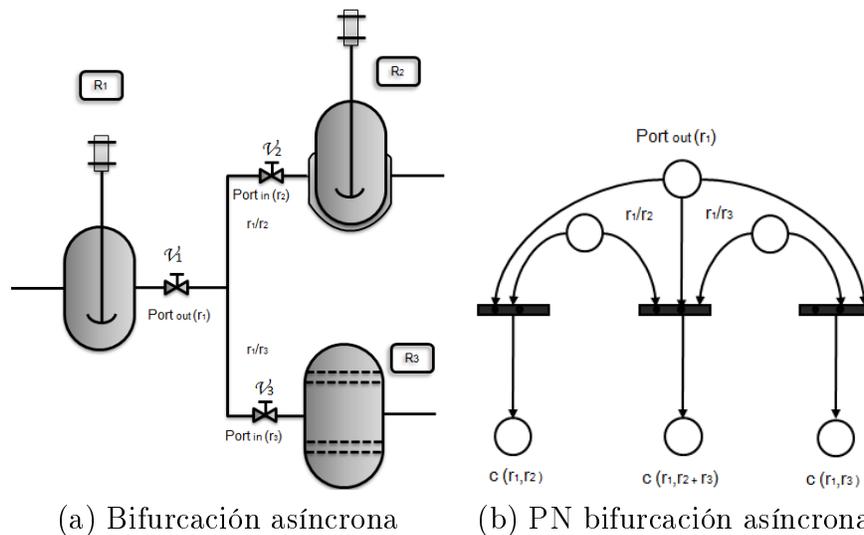


Figura 3.16: Bifurcación asíncrona

Para que los recursos estén en bifurcación asíncrona, debe cumplirse, en el caso de la Figura 3.16(a), la siguiente condición operativa de las válvulas:

$$v_1 \bullet (v_2 + v_3) = 1$$

- Bifurcación Síncrona (Separación): permite el flujo de material solo a un destino a la vez.

La conexión entre los recursos es la misma de la Figura 3.16(a), con la siguiente condición operacional:

$$v_1 \bullet (v_2 \bullet \bar{v}_3 + \bar{v}_2 \bullet v_3) = 1$$

El modelo PN es el de la Figura 3.17.

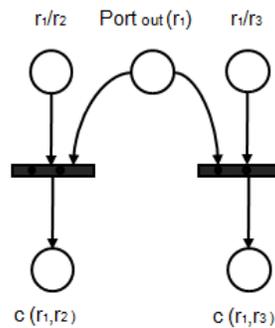


Figura 3.17: Bifurcación Síncrona

- Unión Asíncrona (Multialimentación): recibe flujo de material desde dos fuentes, de manera individual o simultánea (ver Figura 3.18(a)).

La condición operacional es la siguiente:

$$v_3 \bullet (v_1 + v_2) = 1$$

- Unión Síncrona (Mezcla): recibe flujo de material de sólo una fuente a la vez.

El modelo en PN está en la Figura 3.19.

La condición operacional para el arreglo de la Figura 3.18(a), es:

$$v_3 \bullet (v_1 \bullet \bar{v}_2 + \bar{v}_1 \bullet v_2) = 1$$

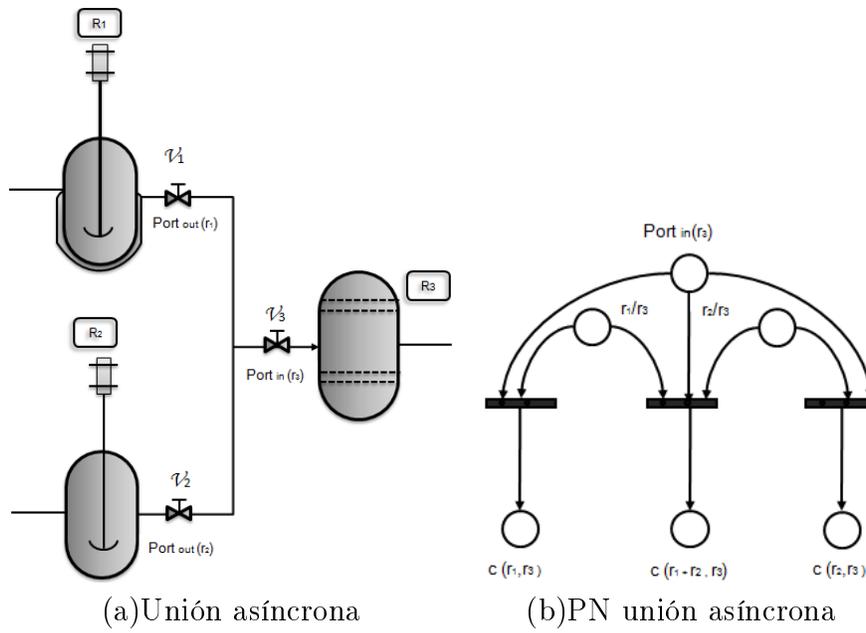


Figura 3.18: Unión Asíncrona

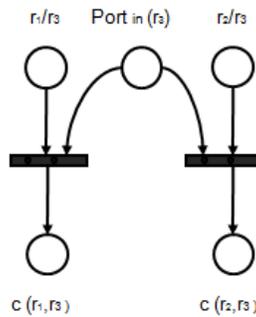


Figura 3.19: Unión Asíncrona

Para conectar recursos, se tiene en cuenta que un recurso aguas arriba habilita el puerto de salida y para un recurso aguas abajo, la conexión es una condición adicional para la habilitación. La PN que representa dos recursos conectados, se ilustra en la Figura 3.20.

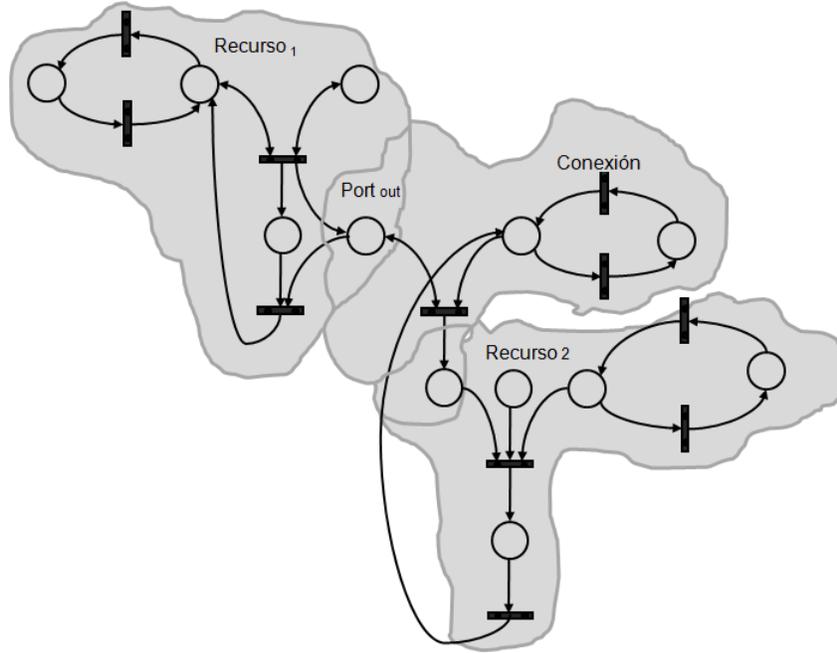


Figura 3.20: Dos holones Recurso conectados

Recursos de servicio

Su función es suministrar servicios a la UPH. No son recursos inteligentes, sin embargo, tienen el conocimiento de su capacidad y su disponibilidad se convierte en una restricción para el holón. Entre los recursos de servicio, se pueden mencionar los que suministran agua, gas, vapor, combustible.

Modelo global

El modelo PN de la UPH se obtiene mediante la composición de los modelos del producto, los recursos y las conexiones. Para la composición se sigue la técnica de fusión de lugares en redes de Petri coloreadas (CPN), propuesta por Jensen en [115].

Composición mediante fusión de lugares

La idea con los métodos de composición es que a partir de modelos modulares, representados mediante autómatas o PN, se determina un modelo global, sin que se altere

la evolución dinámica y de esta forma, se obtiene el árbol de estados de todo el sistema.

La fusión de lugares ha sido planteada por [94] como un método de simplificación y por [115] como un método de jerarquización de las PN.

En la propuesta de Jensen, la idea con la fusión es que los lugares que son fusionados representan un mismo lugar, así se representen como lugares individuales. En la Figura 3.21, por ejemplo, se tienen dos modelos modulares, en los que los lugares etiquetados como **A** hacen parte de un mismo conjunto de fusión, es decir, son el mismo lugar y a partir de ellos se puede componer el modelo de la Figura 3.22.

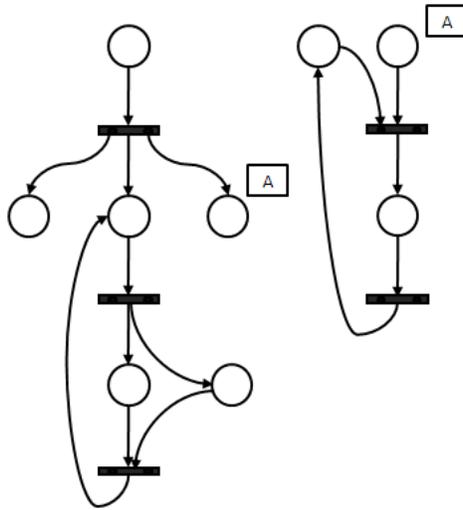


Figura 3.21: Fusión de lugares. Modelo Modular

Para la composición del *producto* con el *recurso* se hace la siguiente construcción: a la salida de la transición “*enviar_peticion*” se crean los lugares “*competencia*” (ver Figura 3.23). Estos lugares son de fusión y mediante ellos el *producto* convoca a los holones recurso que tienen la competencia para ejecutar la operación. Se fusionan los lugares “*competencia*” del producto con los lugares “*competencia*” de los HR correspondientes, obteniendo el modelo de la Figura 3.24. La transición “*enviar_peticion*”

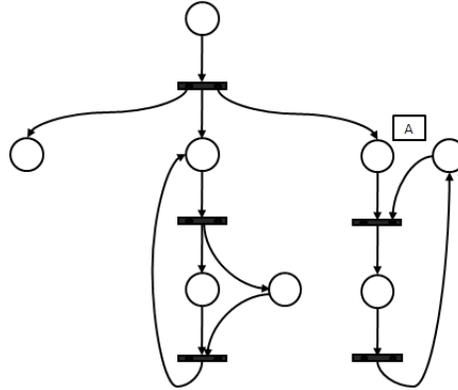


Figura 3.22: Fusión de lugares. Modelo Compuesto

se etiqueta como un evento silencioso para que no afecte los lenguajes generado y marcado del modelo; el lugar “*producto*” se activa cuando el recurso está en operación, indicando con ello la presencia de producto.

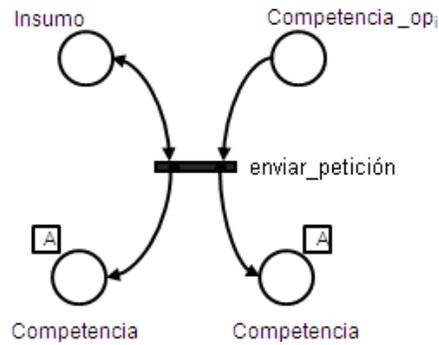


Figura 3.23: Construcción del modelo global

Se tiene por ejemplo una planta continua como la que se muestra en la Figura 3.25. En el Cuadro 3.3 se indican las competencias de los recursos y sus capacidades en unidades de producto (U) o unidades de flujo de producto. La Figura 3.26 representa uno de los productos y su modelo en PN.

Los recursos están conectados en bifurcación asíncrona/unión asíncrona. Las restricciones operacionales se muestran en el Cuadro 3.5, de acuerdo con las líneas de co-

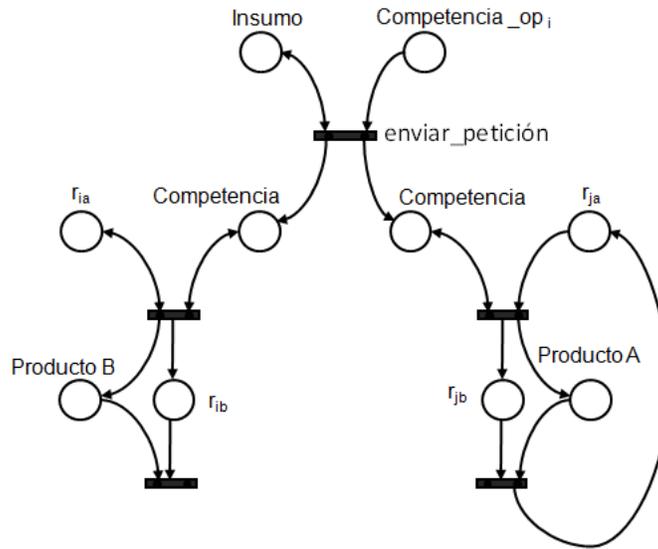


Figura 3.24: Composición Recurso - Producto

Holón	Competencia	Capacidad
HR_1	op_1	80
HR_2	op_1	90
HR_3	op_2	50
HR_4	op_2	40
R_1	op_3	
R_2	op_3	

Cuadro 3.3: Competencias y capacidades de los Holones

nexión entre los recursos que se muestran en el Cuadro 3.4. Las restricciones operacionales se expresan en términos de las conexiones habilitadas cuando determinada conexión está en uso. Las conexiones que no están habilitadas, estarán bloqueadas y no podrán ser usadas por ningún recurso, en la situación operativa establecida. Las conexiones se designan como $c(\text{recurso origen}, \text{recurso destino})$.

El modelo completo de la planta representado desde CPNTools [115] es el de la Figura 3.28. Para su construcción se hace la composición entre el producto de los recursos HR_1 , R_1 , HR_2 y R_2 como se muestra en la parte sombreada superior de la figura.

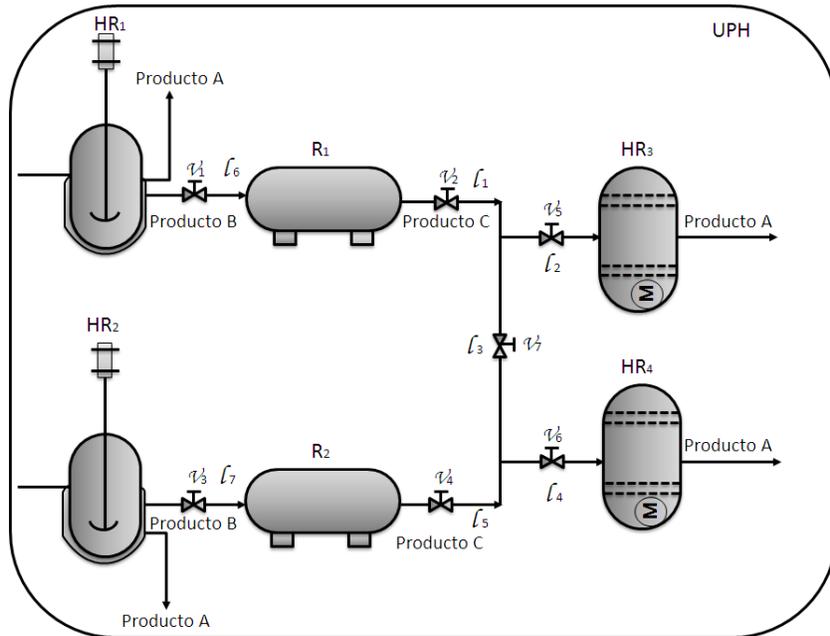


Figura 3.25: Planta de producción continua

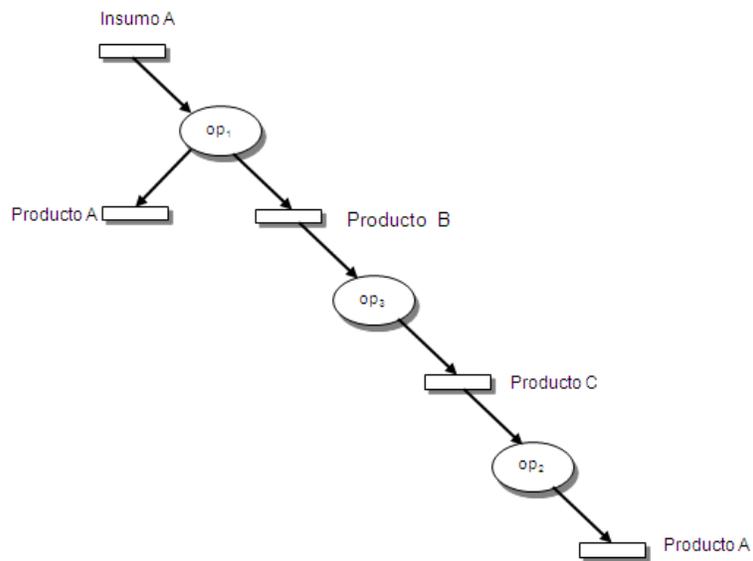


Figura 3.26: Grafo del producto para la planta continua

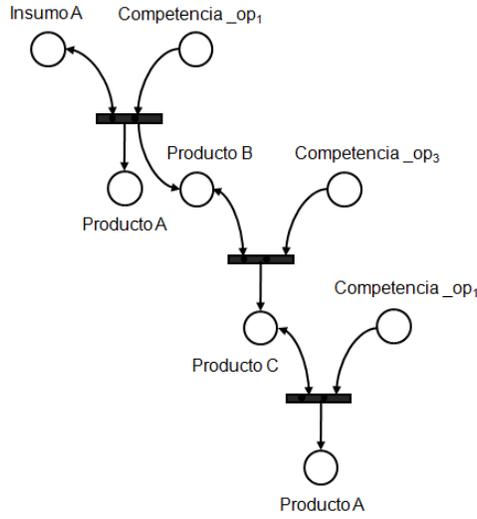


Figura 3.27: Modelo PN del producto

Línea	Válvulas (on)	Recursos conectados
l_6	v_1	$c(hr_1, r_1)$
l_1l_2	v_2, v_5	$c(r_1, hr_3)$
$l_1l_3l_4$	v_2, v_7, v_6	$c(r_1, hr_4)$
$l_1l_3l_4l_2$	v_2, v_7, v_6, v_5	$c(r_1, hr_3 + hr_4)$
l_7	v_3	$c(hr_2, r_2)$
l_5l_4	v_4, v_6	$c(r_2, hr_4)$
$l_5l_3l_2$	v_4, v_7, v_5	$c(r_2, hr_3)$
$l_5l_3l_2l_4$	v_4, v_7, v_6, v_5	$c(r_2, hr_3 + hr_4)$
$l_1l_5l_3l_2$	v_2, v_4, v_7, v_5	$c(r_1 + r_2, hr_3)$
$l_1l_5l_3l_4$	v_2, v_4, v_7, v_6	$c(r_1 + r_2, hr_4)$
$l_1l_5l_3l_4l_2$	v_2, v_4, v_7, v_5, v_6	$c(r_1 + r_2, hr_3 + hr_4)$

Cuadro 3.4: Conexiones entre los recursos

En uso	Habilitada
l_1l_2	l_5l_4
$l_1l_3l_4$	Ninguna
$l_1l_3l_4l_2$	Ninguna
l_5l_4	l_1l_2
$l_5l_3l_2$	Ninguna
$l_5l_3l_2l_4$	Ninguna
$l_1l_5l_3l_2$	Ninguna
$l_1l_5l_3l_4$	Ninguna
$l_1l_5l_3l_4l_2$	Ninguna

Cuadro 3.5: Restricciones en las operaciones de los recursos

En la parte sombreada intermedia, se representan las conexiones entre los recursos R_1 y R_2 con los recursos HR_3 y HR_4 .

En la parte inferior se muestra la composición entre el producto y los recursos HR_3 y HR_4 .

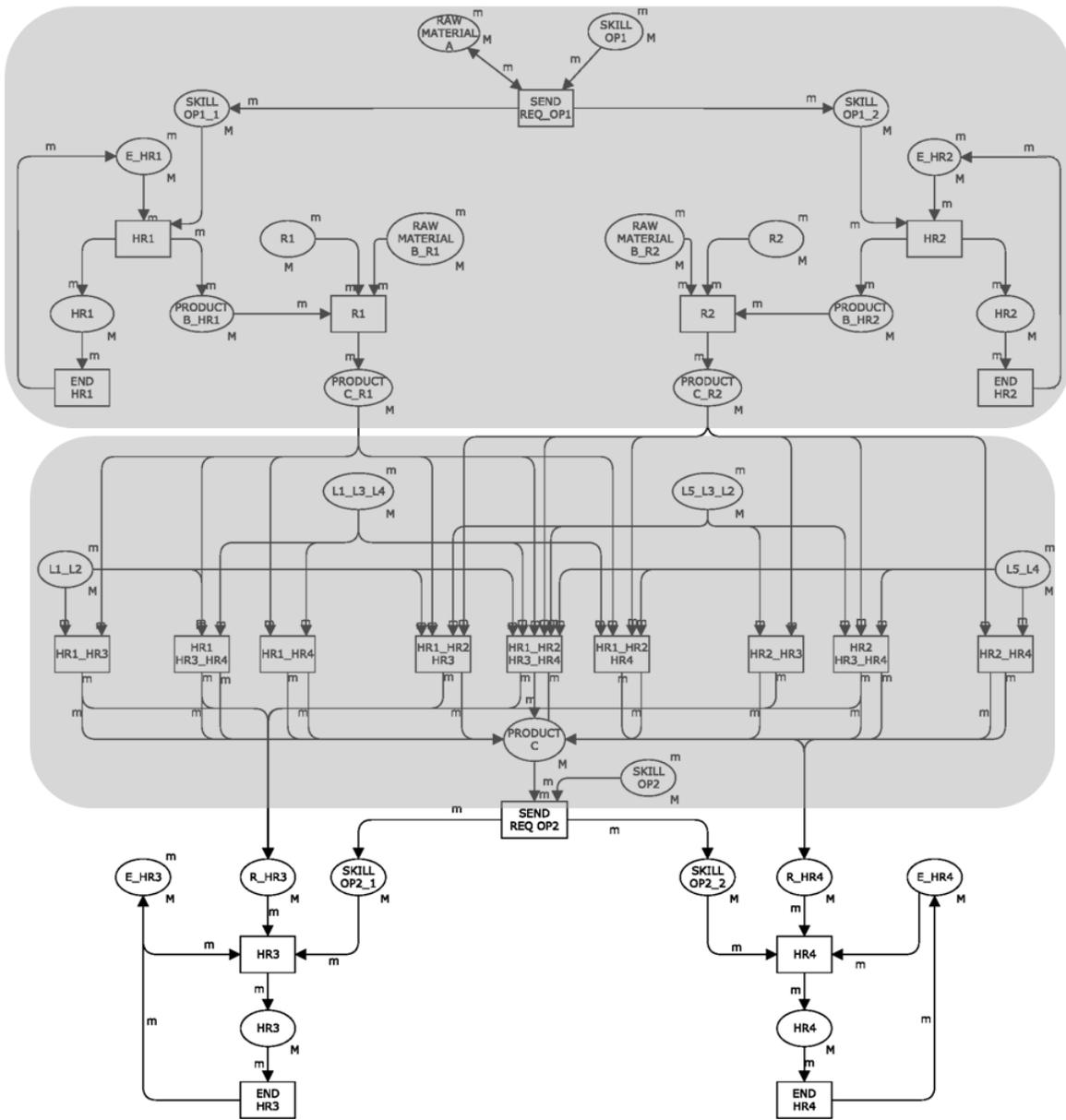


Figura 3.28: Modelo Global

El modelo obtenido debe cumplir las propiedades de acotamiento, seguridad y vivacidad. Para ello debe hacerse el análisis de propiedades como se establece en la sección 2.3.2.

Una vez definido el modelo global se pueden determinar todas las posibles configuraciones para obtener el producto a partir del árbol de alcanzabilidad. El espacio de estados completo de la UPH se establece a partir del marcaje inicial, con todos los holones y los recursos disponibles. El mismo árbol entrega también todas las posibles secuencias de operaciones.

Para el ejemplo que se ilustra, el árbol de alcanzabilidad con todos los recursos disponibles es el que se muestra en la Figura 3.29.

Si se recorren todas las trayectorias que llevan a terminaciones satisfactorias del producto, se determinan todas las configuraciones posibles.

El conjunto de estado finales, definido como el conjunto de estados que llevan a terminaciones satisfactorias del producto, está dado por:

$$Q_m = \{15, 16, 17, 78, 79, 81, 82, 86, 91, 92, 93, 94\}$$

Etiquetando apropiadamente los eventos con el recurso utilizado en cada transición de estado, como se indica en la Figura 3.30, se llega a que el lenguaje marcado $L_m(G)$ del árbol de alcance es el conjunto de configuraciones posibles de la UPH (ver Cuadro 3.6).

$$L_m(G) = \{\textit{Todas las configuraciones de la UPH}\}$$

$$L_m(G) = \{hr_1, hr_1r_1hr_3, hr_1r_1hr_3hr_4, \dots, hr_1r_1hr_3hr_2r_2hr_4\}$$

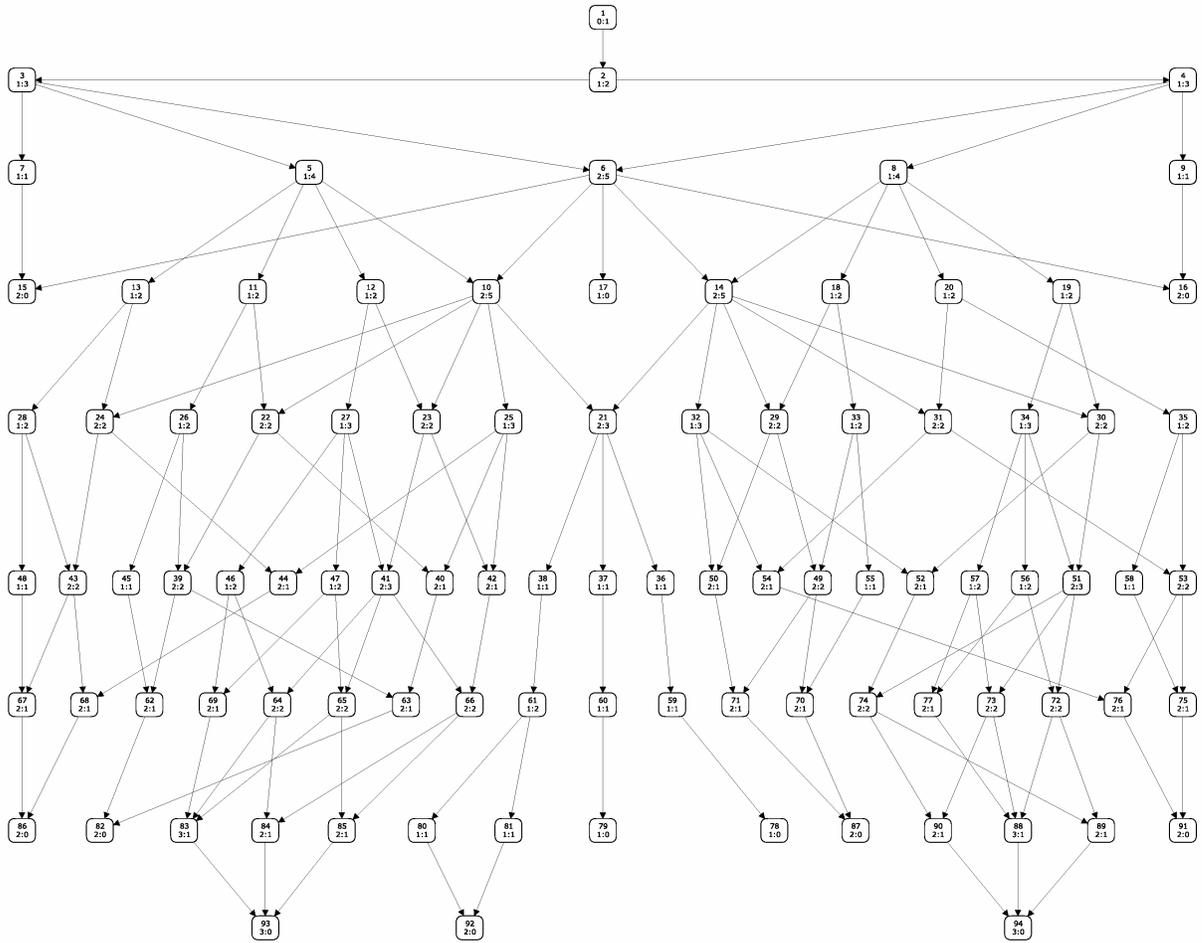


Figura 3.29: Árbol de alcanzabilidad completo

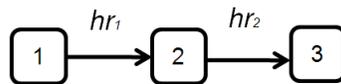


Figura 3.30: Eventos con etiquetas

Selección de la configuración

Para la negociación de la misión y seleccionar la configuración que la ejecutará, se considera la información del estado de los recursos, contenida en la oferta presentada por los holones y que incluye su disponibilidad y capacidad.

NÚMERO	UPH	R
1	HR_1	
2	HR_2	
3	$HR_1 + HR_2$	
4	$HR_1 + HR_3$	1
5	$HR_1 + HR_4$	1
6	$HR_1 + HR_3 + HR_4$	1
7	$HR_2 + HR_3 + HR_4$	2
8	$HR_2 + HR_3$	2
9	$HR_2 + HR_3$	2
10	$HR_1 + HR_2 + HR_3$	1
11	$HR_1 + HR_2 + HR_3$	2
12	$HR_1 + HR_2 + HR_3$	1+2
13	$HR_1 + HR_2 + HR_4$	1
14	$HR_1 + HR_2 + HR_4$	2
15	$HR_1 + HR_2 + HR_3$	1+2
16	$HR_1 + HR_2 + HR_3 + HR_4$	1
17	$HR_1 + HR_2 + HR_3 + HR_4$	2
18	$HR_1 + HR_2 + HR_3 + HR_4$	1+2

Cuadro 3.6: Configuraciones posibles de la UPH

Con esta información se establece el marcaje inicial de la PN y se obtiene el árbol de alcanzabilidad para la condición operativa actual de los holones, los recursos y las conexiones.

Una vez se tiene el árbol, se aplica el algoritmo de síntesis del supervisor para suprimir los estados que no garantizan la controlabilidad y los estados que no conducen a terminaciones satisfactorias del producto. Se obtiene así un autómata que es controlable y que entrega rutas de producto que conducen a terminaciones satisfactorias. El procedimiento se ilustra paso a paso con el caso de estudio del capítulo 6.

Marcaje inicial

El marcaje inicial del modelo global de la UPH en PN se establece a partir de las ofertas presentadas por los holones en el proceso de negociación. El formato de la oferta es el siguiente:

$$bid(holon_i) = \{disp, capacidad(U), costo(USD/U), confiabilidad(\%)\}, \text{ con:}$$

$$disp \in \{0, 1\}, \begin{cases} disp = 1 & \text{Si el recurso esta disponible} \\ disp = 0 & \text{Lo contrario} \end{cases}$$

$capacidad, costo, confiabilidad \in \mathbb{R}$

La Figura 3.31 ilustra un ejemplo de envío de ofertas por parte de los holones y la Figura 3.32, la forma como se establece el marcaje inicial desde las ofertas presentadas.

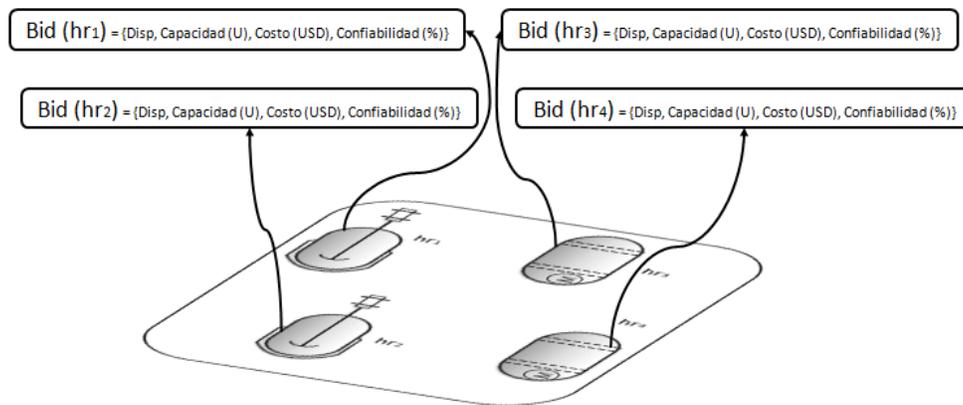


Figura 3.31: Envío de ofertas

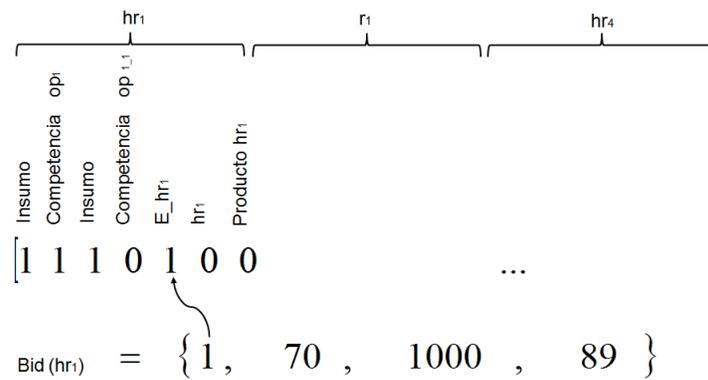


Figura 3.32: Marcaje inicial a partir de la oferta

Al ejecutar la PN para el marcaje definido, se obtiene el árbol de alcanzabilidad para la condición actual de los recursos y que está contenido en el árbol completo, esto es:

$$R(N, M_{current}) \subseteq R(N, M_{all})$$

Donde $M_{current}$ es el marcaje para una condición operativa, presentada en la oferta y M_{all} es el marcaje para todos los recursos disponibles.

Aplicación del algoritmo de síntesis del supervisor

Definido el autómata G a partir de $R(N, M_{current})$, se aplica el algoritmo de la sección 2.2.3 (Síntesis del supervisor), para retirar los estados que hacen que el sistema sea no controlable, los estados que generan bloqueos y los estados que no lleven a terminaciones satisfactorias del producto.

Si todos los eventos son controlables, esto es $\Sigma_{nc} = \emptyset$, el sistema es controlable, ya que se cumple la condición de controlabilidad. Al concatenar con un conjunto vacío, se obtiene:

$$\overline{K} \cap L(G) \subseteq \overline{K}$$

La propiedad de no bloqueo se verifica sobre la base de la expresión

$$\overline{L_m(G)} = L(G)$$

El autómata controlable que se obtiene G_{cont} está contenido dentro del autómata generado por $R(N, M_{current})$, con lo que se tiene un espacio de estados de menor tamaño.

Asignación de misiones factibles

Para evaluar la asignación de la misión, se seleccionan las configuraciones que tienen la capacidad de ejecutarla. De forma consistente con el método propuesto basado en análisis del árbol de alcanzabilidad, se define un *árbol de alcanzabilidad con capacidades*, en el cual, a cada estado marcado se le asocia la capacidad que la respectiva

configuración está en condiciones de realizar. Estas capacidades son los valores actuales ofrecidos por los holones en la negociación y son definidos por ellos de forma individual según su estado.

Definición 3.1 (Árbol de alcanzabilidad con capacidades)

Sea G_{cont} el autómata controlable de una PN que representa el modelo global de una UPH, se define el árbol de capacidades de G_{cont} como:

$$G_{cap} = \langle G_{cont}, cap_config \rangle$$

Donde,

$$cap_config : Q_m \rightarrow \mathbb{R}^+$$

Q_m , es el conjunto de estados marcados de G_{cont} , que llevan a terminaciones satisfactorias del producto.

A cada q_{mi} se le asocia un número real positivo que indica la capacidad de la configuración que lleva a ese estado final.

Una vez definido el autómata con capacidades, se suprimen los estados para los cuales la misión no es factible.

Se llega finalmente a tener un árbol de alcanzabilidad, el cual se obtiene a partir del estado actual de los holones, es controlable, conduce a estados de terminación satisfactoria del producto y para esos estados finales, la misión es factible. Este árbol de misiones factibles es mucho más acotado que el árbol completo del modelo global de la UPH.

$$G_{feasible} \subseteq G_{cont} \subseteq G_{current} \subseteq G_{all}$$

El árbol de misiones factibles permite definir todas las configuraciones para las cuales es posible alcanzar la misión y desde esas configuraciones, se definen las holarquías que se pueden formar. Todas las configuraciones para las cuales la misión es factible están dadas por $L_m(G_{feasible})$.

3.1.3. Formación de holarquías

Una holarquía es una agrupación de holones, que se organizan de manera cooperativa para alcanzar una misión común.

Como restricción conceptual para formar holarquías, se plantea que éstas deben tener por lo menos dos holones para permitir la cooperación entre ellos. Como restricción tecnológica, entre los holones que forman la holarquía debe existir conexión física que permita el flujo del producto.

En este sentido, un criterio para definir una holarquía es que al asociarse, tanto en sus sistemas de toma de decisiones como en sus conexiones e infraestructura de producción, la holarquía debe estar en condiciones de entregar un producto, verificando así otra condición del enfoque holónico: una holarquía es a su vez una unidad de producción.

El análisis sobre el árbol de alcanzabilidad de misiones factibles, haciendo uso de la teoría de lenguajes, permite configurar las posibles holarquías que pueden realizar la misión, verificando las restricciones conceptuales y tecnológicas.

Una secuencia de operaciones s que pertenece a $G_{feasible}$ para satisfacer una misión, es una holarquía si:

- $s \in L_m(G_{feasible})$.
- $|s| > 1$.
- Si $s = s_1s_2 \dots s_n$ entonces los recursos s_1, s_2, \dots, s_n están conectados físicamente.

La primera condición establece que la secuencia conduce a terminaciones satisfactorias del producto y que se puede agrupar como una UPH.

La segunda condición exige que en la secuencia exista más de un recurso para que se pueda formar la holarquía.

Con la tercera condición se verifica que la holarquía es una ruta para el producto.

Para determinar si la secuencia es una ruta para el producto, se establece su pertenencia a uno de los siguientes grupos de conexiones:

Recursos conectados de manera secuencial

En este arreglo, el puerto de salida de un recurso aguas arriba, está conectado al puerto de entrada del recurso aguas abajo, sin tener derivaciones en su recorrido.

En este tipo de conexión para la secuencia s se cumple que:

$$\begin{aligned}
 Port_{out}(s_1) &= Port_{in}(s_2) \\
 Port_{out}(s_2) &= Port_{in}(s_3) \\
 &\vdots \\
 Port_{out}(s_{n-1}) &= Port_{in}(s_n)
 \end{aligned}$$

Recursos conectados en bifurcaciones o uniones

Para definir si los holones que forman la secuencia están conectados en bifurcaciones o uniones, se consideran los modelos de las figuras 3.16, 3.17, 3.18 y 3.19. La pertenencia a cada uno de los grupos se hace comparando el número de lugares del modelo PN, correspondientes a los puertos de entrada y salida y el número de conexiones que ellos habilitan.

Sea la secuencia $s = s_1s_2s_3$, con p_{outi} el lugar que representa la disponibilidad del puerto de salida del recurso i ; p_{ini} , el lugar que representa la disponibilidad del puerto de entrada del recurso i . Sean los conjuntos $Port_{out}$, $Port_{in}$, puertos de entrada y salida de los holones s_1 , s_2 y s_3 .

Los holones s_1 , s_2 y s_3 están conectados en:

(a) Bifurcación asíncrona si:

$$|Port_{out}| = 1, |Port_{in}| > 1 \wedge |p_{out}^\bullet| = |Port_{in}| + 1 \wedge M(p_{out}) \leq 1$$

Para esta conexión se puede formar el conjunto de holarquías H_1 , como se muestra en la Figura 3.33: $H_1 = \{s_1s_2, s_1s_3, s_1s_2s_3\}$.

(b) Bifurcación síncrona si:

$$|Port_{out}| = 1, Port_{in} = \{Port_{in2}, Port_{in3}\} \wedge |p_{out}^\bullet| = |Port_{in}| \wedge M(p_{out}) \leq 1$$

Para esta conexión se puede formar el conjunto de holarquías H_2 , como se muestra en la Figura 3.34: $H_2 = \{s_1s_2, s_1s_3\}$.

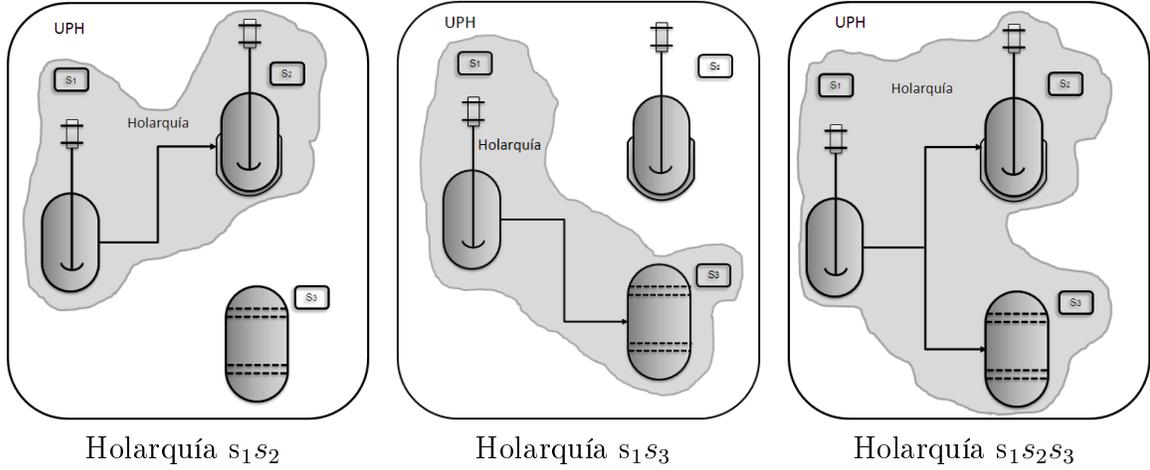


Figura 3.33: Holarquías en bifurcación asíncrona

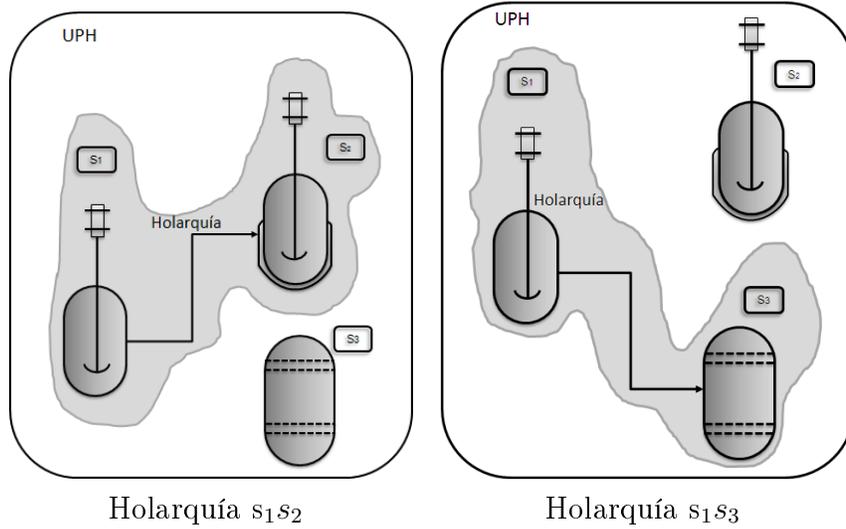


Figura 3.34: Holarquías en bifurcación síncrona

(c) Unión asíncrona si:

$$|Port_{in}| = 1, |Port_{out}| > 1 \wedge |p_{in}^{\bullet}| = |Port_{out}| + 1 \wedge M(p_{in}) \leq 1$$

Para esta conexión se forma el conjunto de holarquías H_3 , como se muestra en la Figura 3.35: $H_3 = \{s_1s_3, s_2s_3, s_1s_2s_3\}$.

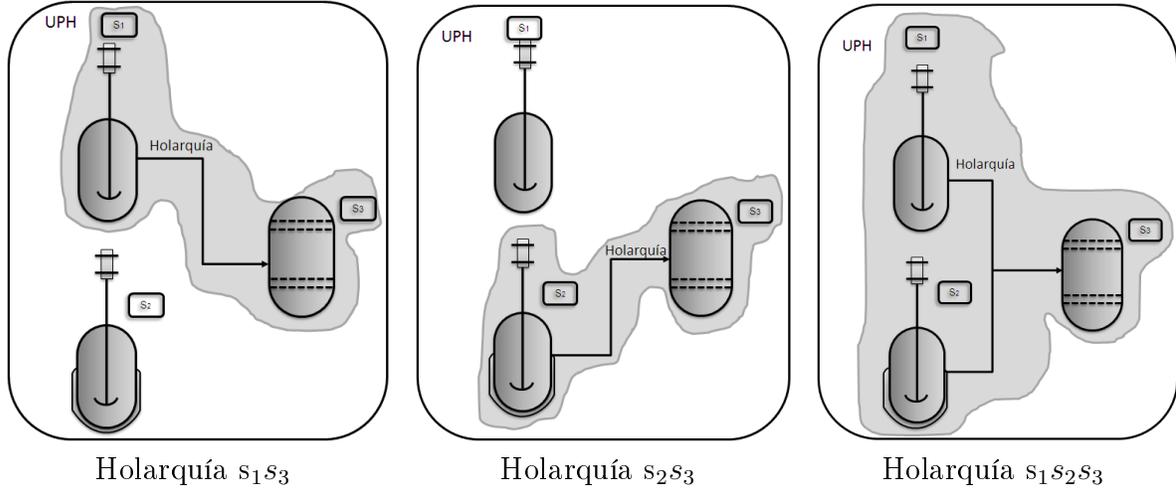


Figura 3.35: Holarquías en unión asíncrona

(d) Unión síncrona si:

$$|Port_{in}| = 1, P_{out} = \{p_{out1}, p_{out2}\} \wedge |p_{in}^\bullet| = |Port_{out}| \wedge M(p_{in}) \leq 1$$

Para esta conexión se forma el conjunto de holarquías H_4 , como se muestra en la Figura 3.36: $H_4 = \{s_1s_3, s_2s_3\}$.

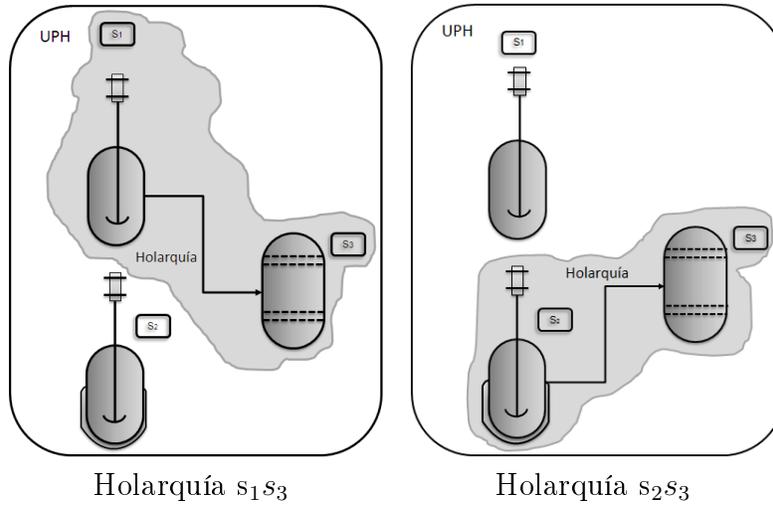


Figura 3.36: Holarquías en unión síncrona

El resultado final del proceso de *planificación*, que se entrega al *programador*, es el conjunto de holones y holarquías que están en condiciones de cumplir la misión.

El conjunto de holarquías está dado por:

$$H = \{s \in G_{feasible} : s \in L_m(G_{feasible}), |s| > 1\}$$

El resultado del *planificador* está dado por $L_m(G_{feasible})$.

Ejemplo de planificación

Para ilustrar la propuesta de planificación haciendo uso de la teoría de control supervisorio y el enfoque holónico se considera la planta continua de la Figura 3.25, el modelo global de la Figura 3.28 y las capacidades de los holones del Cuadro 3.3.

La capacidad de la UPH es de 260 Unidades de producto o unidades de flujo de producto. Supóngase que se va a negociar una misión de 140 unidades de producto A.

Las ofertas presentadas por los holones son:

$$Bid(hr_1) = \{1, 70, 1000, 89\}$$

$$Bid(hr_2) = \{1, 80, 1120, 92\}$$

$$Bid(hr_3) = \{1, 45, 990, 90\}$$

$$Bid(hr_4) = \{0, 40, 980, 92\}$$

El estado de los recursos es:

$$r_1 = 1$$

$$r_2 = 1$$

El estado de la línea l_3 es no disponible ($l_3 = 0$), con lo que el estado inicial de las conexiones es:

$$c(r_1, hr_3) = 1$$

$$c(r_2, hr_4) = 1$$

Las conexiones restantes no están disponibles, ya que la no disponibilidad de l_3 impide que se habiliten los demás arreglos.

Para facilitar la definición del marcaje inicial, se presenta el Cuadro 3.7, en la que se realiza la enumeración de los lugares de la PN del modelo global.

De acuerdo con las ofertas presentadas por los holones y el estado de recursos y conexiones, el marcaje inicial es el siguiente:

$$M_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T.$$

Al ejecutar la PN, se obtiene el árbol de la Figura 3.37.

Del análisis del árbol se concluye lo siguiente:

- Los estados finales son los nodos 13, 14, 15, 17, 31, 32.
- Los estados 13, 14, 15 y 32 conducen a terminaciones satisfactorias del producto.

$$Q_m = \{13, 14, 15, 32\}$$

LUGAR	ETIQUETA/NOMBRE	MARCAJE INICIAL
p1	RAW MATERIAL OP1	1
p2	SKILL OP1	1
p3	RAW MATERIAL	1
p4	SKILL OP1_1	0
p5	E_HR1	1
p6	SKILL OP1_2	0
p7	HR1	0
p8	PRODUCTB_HR1	0
p9	R1	1
p10	RAW MATERIAL R1	1
p11	RAW MATERIAL R2	1
p12	R2	1
p13	E_HR2	1
p14	PRODUCTC_R1	0
p15	PRODUCTC_R2	0
p16	PRODUCTB_HR2	0
p17	HR2	0
p18	L1_L2	1
p19	L1_L3_L4	1
p20	L5_L3_L2	1
p21	L5_L4	1
p22	REQ OP2	0
p23	E_HR3	1
p24	SKILL HR3	0
p25	REQ HR3	0
p26	HR3	0
p27	SKILL OP2	1
p28	REQ HR4	0
p29	SKILL HR4	0
p30	E_HR4	1
p31	HR4	0

Cuadro 3.7: Lugares del modelo global

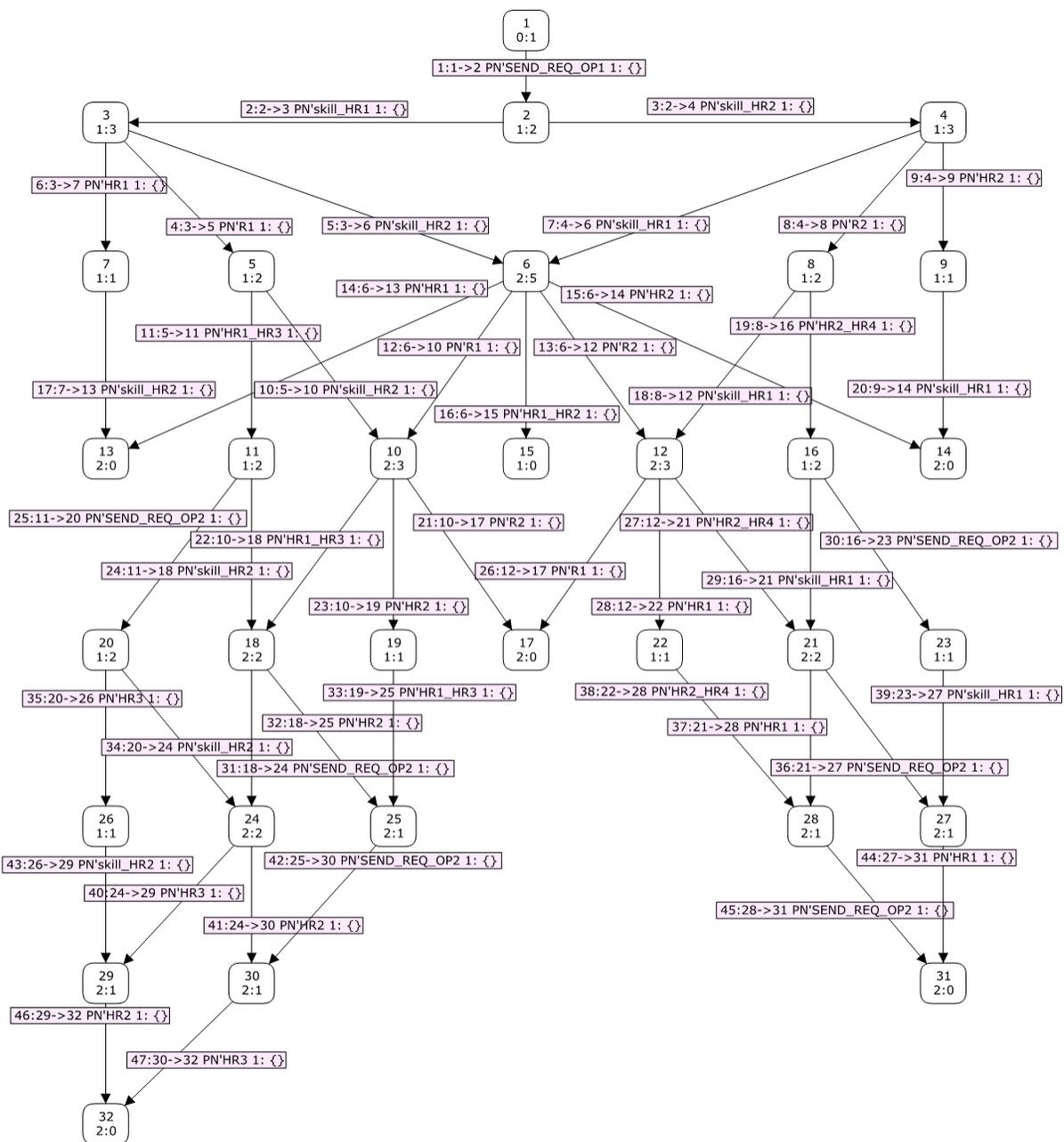


Figura 3.37: Árbol de alcanzabilidad según ofertas y estado conexiones

- Los estados 17 y 31 no conducen a terminaciones satisfactorias del producto, debido a que consideran el uso del recurso r_2 sin tener disponible un recurso aguas abajo que reciba el Producto C y entregue el Producto A. De acuerdo con esto, ninguna secuencia que lleve a r_2 es permitida. Por ejemplo, la secuencia $s = hr_1r_1hr_3hr_2r_2$, no es permitida.

Al aplicar el algoritmo de síntesis del supervisor, verificando que el autómata es controlable, suprimiendo estados que lleven a bloqueos, evitando los estados 17 y 31, se obtiene el árbol de la Figura 3.38. Asignando las capacidades a cada nodo final, se obtiene el árbol de alcanzabilidad controlable y con capacidades de la Figura 3.39.

Una vez se tiene este árbol, se suprimen los estados para los cuales la misión no es factible; es decir, se retiran los estados 5, 7 y 13; obteniendo el árbol de la Figura 3.40, con el estado 18 como único estado para el cual la misión es factible.

Si se recorren las trayectorias que llevan al estado final de misión factible, se obtiene:

$$L_m(G_{feasible}) = \{hr_1r_1hr_2hr_3, hr_1r_1hr_3hr_2, hr_1hr_2r_1hr_3, hr_2hr_1r_1hr_3\}$$

La única holarquía que puede realizar la misión es:

$$H = \{hr_1r_1hr_3\} \cup \{hr_2\}$$

3.2. Programación de la Producción

Con base en las posibles configuraciones y en la disponibilidad de los recursos y sus capacidades actuales, se elabora la asignación de los recursos en el tiempo; tarea que corresponde a la *programación de la producción*.

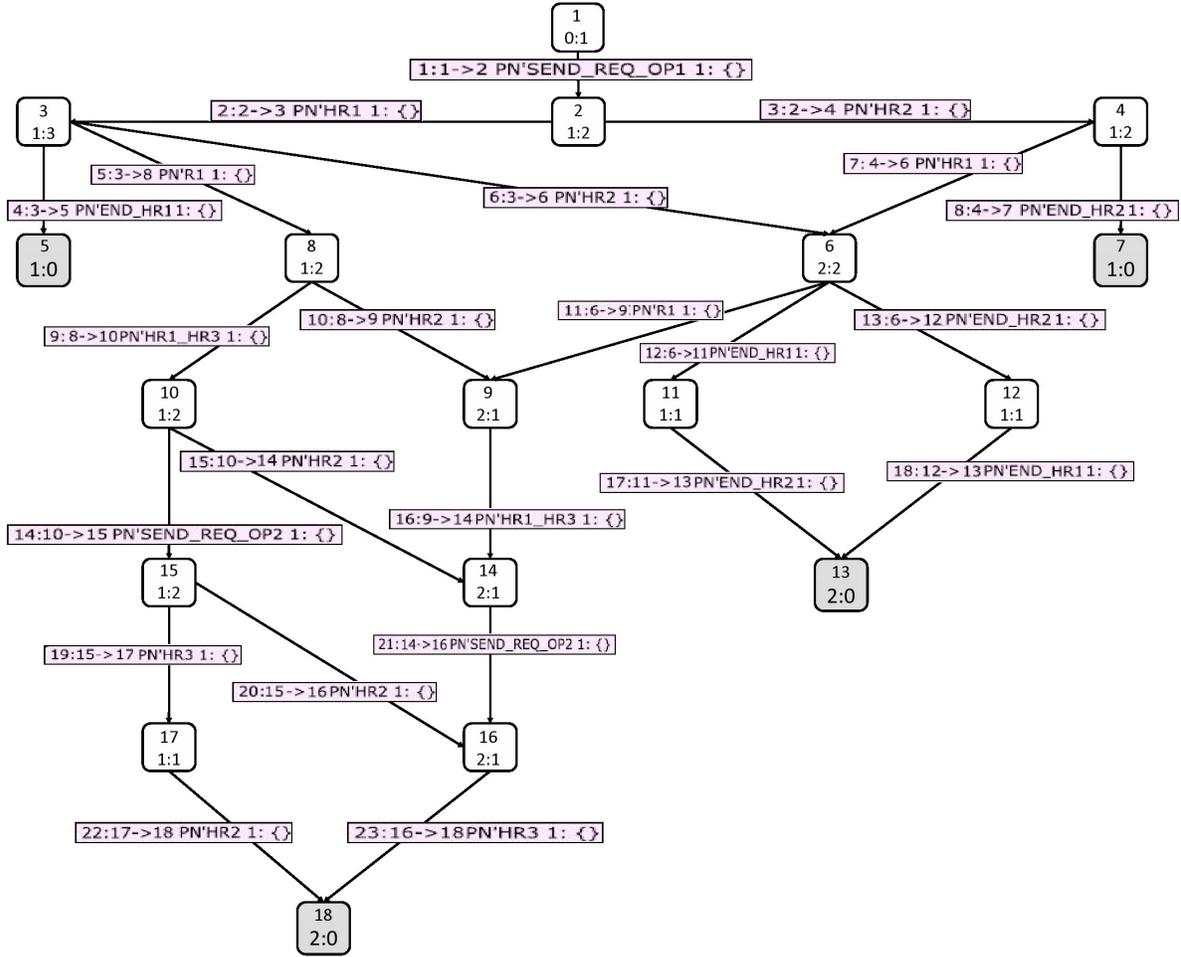


Figura 3.38: Árbol de alcanzabilidad controlable

De acuerdo con esto, la *programación de la producción* es la actividad de la toma de decisiones relacionada con la asignación óptima y detallada en el tiempo de operaciones a recursos de producción limitados y la determinación de la secuencia de operaciones de tal forma que las restricciones operacionales se cumplan.

Desde el enfoque holónico, el *programador* tiene la función de asignar las misiones a las holarquías y holones, mediante procesos de optimización que se basan en las capacidades y disponibilidades de dichas unidades holónicas y a partir de las configuraciones entregadas por el *planificador* como resultado del proceso de negociación.

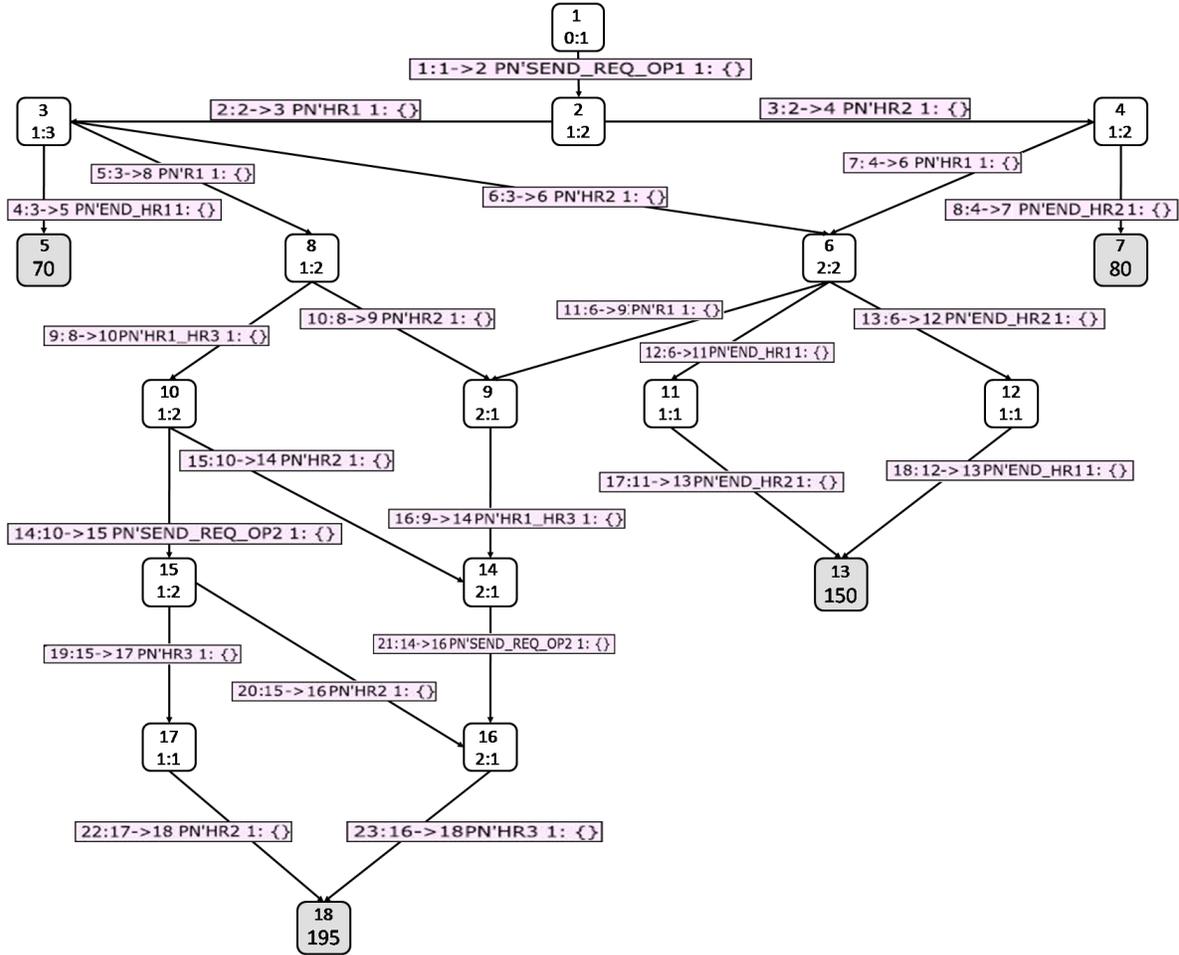


Figura 3.39: Árbol de alcanzabilidad controlable y con capacidades

Las decisiones de optimización incluyen:

- La *cantidad de producción* P_{it} , del producto $i \in I$ en el período $t \in T$.
- *Nivel de inventario*, S_{it} del producto i al final del período t .

La optimización se orienta según los siguientes objetivos: incremento de las ganancias, reducción de costos, ahorro de energía en el transporte del producto, reducción de penalizaciones.

Cabe señalar que el problema de *programación de la producción* con cada uno de los objetivos descritos anteriormente es un problema de optimización muy complejo, y

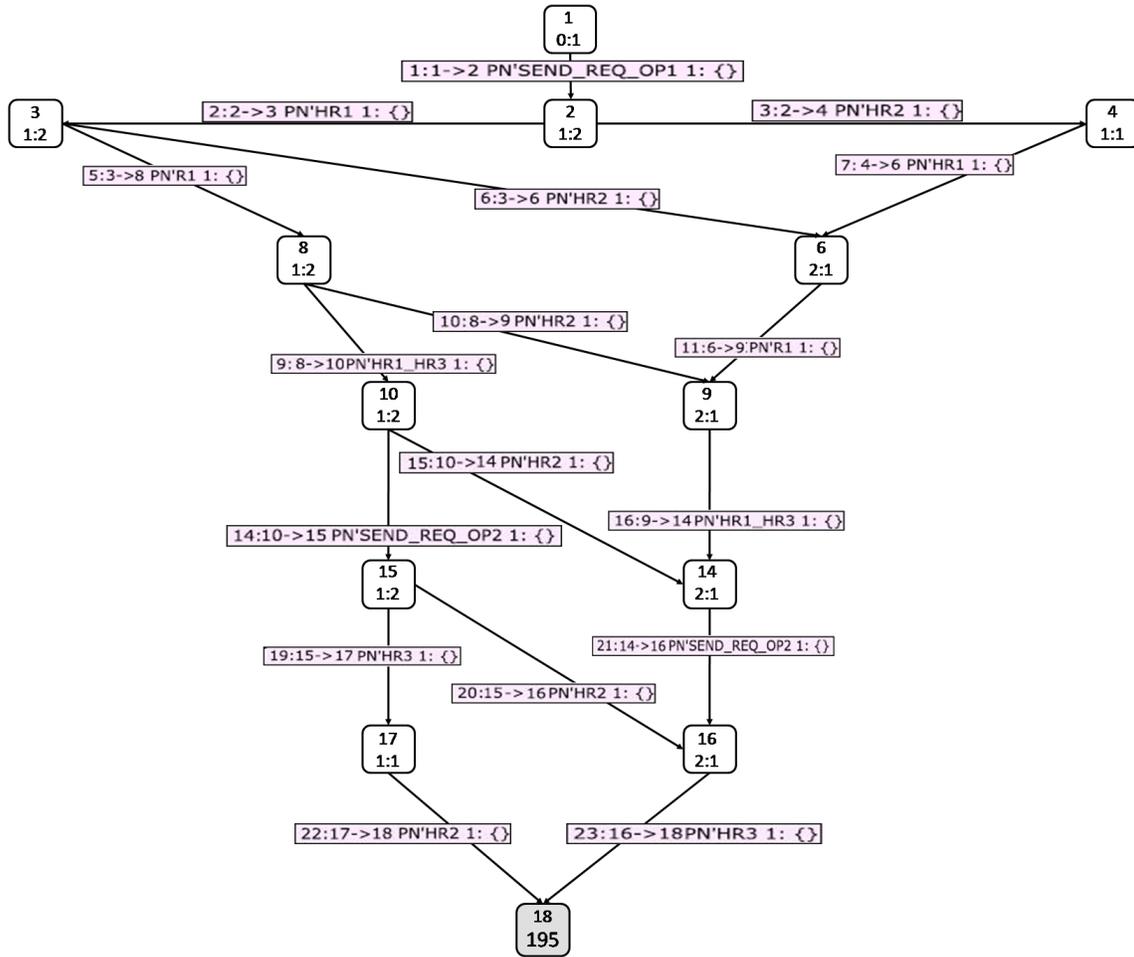


Figura 3.40: Árbol de alcanzabilidad de misiones factibles

esos objetivos pueden entrar en conflicto unos con otros. Así el programa de producción a corto plazo se convierte en un reto de optimización. El problema con múltiples criterios se ha resuelto mediante técnicas de relajación Lagrangiana, programación no lineal entera mixta, métodos basados en modelo o técnicas de inteligencia artificial [116].

En muchos procesos continuos, la cantidad de producción es la tasa de flujo de producto.

El resultado de la *programación de la producción*, es un *programa de producción*, que se puede definir como: “un plan con referencia a la secuencia y el tiempo asignado para cada operación necesarios para su finalización” [117].

Dentro de la concepción holónica, el *programa de producción* se presenta como una *agenda* y es manejada por cada holón como componente fundamental de su autonomía [3, 35, 98, 118].

La *agenda* de producción de cada holón es definida por el *programador* y según la misión asignada, la capacidad declarada, la secuencia de operaciones y las restricciones operacionales, asigna los intervalos de producción constante.

En estos términos, un *programador holónico* recibe del *planificador*, las posibles configuraciones con las que se puede cumplir una misión, y entrega misiones a los holones contenidas en las *agendas* de cada uno.

Las operaciones que realiza el *programador holónico* son (ver Figura 3.5):

- Asignar recursos para una misión.
- Asignar misiones a holones y holarquías.
- Secuenciar los recursos.
- Definir tiempos de inicio y fin de las operaciones.
- Optimizar el uso de los recursos con base en costos de producción.
- Seleccionar configuración.
- Programar *agenda* (ver Definición 3.3).

- Asignar intervalos de producción constante (ver Definición 3.4).
- Remover *agenda*.
- Actualizar *agenda*.

3.2.1. Descripción de la Agenda

De la concepción de la autonomía se ha establecido que los sistemas holónicos actúan orientados por metas u objetivos. Los compromisos de producción adquiridos por una UPH, se convierten en las *misiones* que orientan su comportamiento y se expresan mediante una *agenda de producción*. A partir de la *agenda* se lleva a cabo el seguimiento de la misión mediante la función de supervisión.

La UPH recibe una misión, la cual debe expresar, en todo su detalle, el producto o pedido que debe procesar: cantidades, calidades, plazos y precios. El detalle y el formato de la misión, depende del tipo de producto o proceso que realice la UPH.

La *agenda* tiene vigencia para un período de tiempo establecido, el cual coincide con el horizonte de planificación a corto plazo u horizonte de operación.

Para procesos de generación de energía térmica o hidráulica, estaciones de bombeo, gasoductos, oleoductos, el periodo de la *agenda* se establece diariamente. El procedimiento de optimización genera objetivos de producción de 24 horas, teniendo en cuenta acciones de control, dinámica del sistema, condición de los equipos, restricciones físicas y costos operativos.

Definición 3.2 (Capacidades)

La agenda representa los compromisos de producción adquiridos para el período de planificación y para ello, se definen las siguientes capacidades [119]:

- *La capacidad de producción es la mayor razón de producción sostenible por la planta bajo una composición de productos, materiales, mano de obra y equipos. Está determinada por la capacidad de producción comprometida, disponible y no atendida. La capacidad de producción es la máxima capacidad teórica disponible para ser usada en producción.*
- *La capacidad comprometida define los recursos que son comprometidos para el período establecido y está determinada por la capacidad asignada a la UP después del proceso de negociación y optimización (Programación).*
- *La capacidad declarada, es la capacidad que ofrece la UP para el proceso de negociación del objetivo del período de producción siguiente, para lo cual tiene en cuenta la condición de sus recursos, disponibilidad de material y utilización de equipos.*
- *La diferencia entre capacidad de producción y capacidad declarada, se denomina capacidad no atendida.*
- *La capacidad disponible es la capacidad adicional y no comprometida para producir. Es la diferencia entre la capacidad declarada y la capacidad comprometida. La capacidad disponible es ofrecida por los recursos a la holarquía para atender perturbaciones.*

La Figura 3.41 ilustra las definiciones de capacidad presentadas arriba.

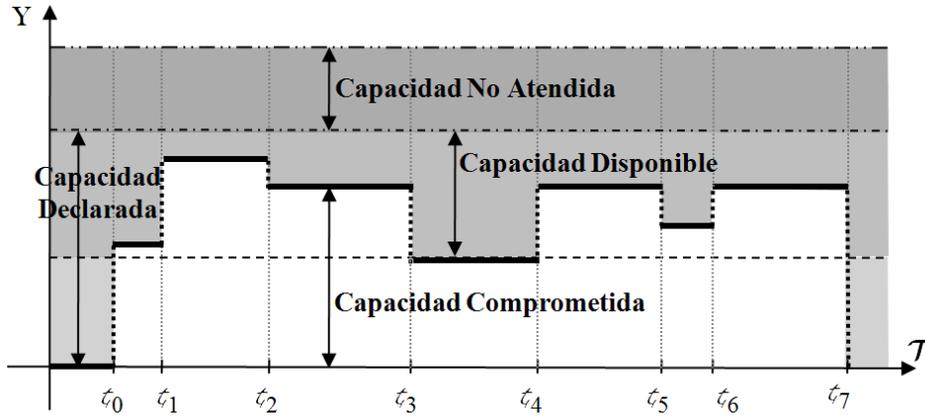


Figura 3.41: Capacidad de producción

La *agenda de producción* para un horizonte de operación, se calcula mediante técnicas de solución de problemas de optimización de tiempo discreto [120–125]. El *programador* entrega la *agenda* dividida en períodos horarios (*n-hourly*), estableciendo en dichos períodos la capacidad comprometida. La Figura 3.42 ilustra una *agenda de producción* para períodos de 1 hora.

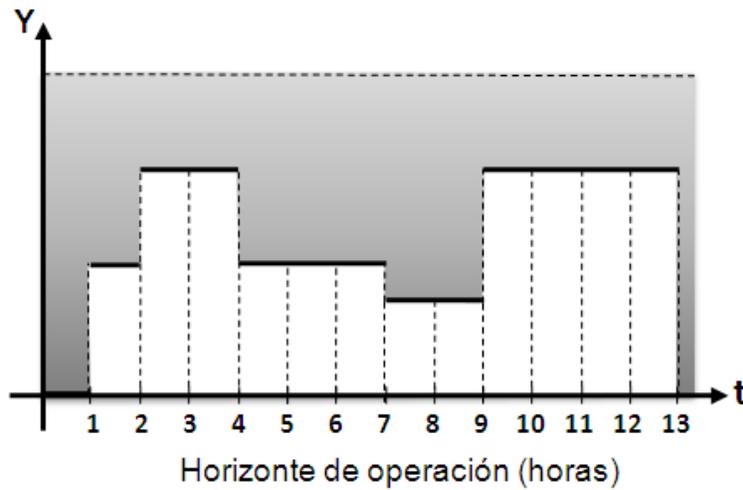


Figura 3.42: Agenda de Producción diaria

Definición 3.3 (Agenda)

La agenda de producción se define como:

$$\mathbb{AP} : \text{periodo} \rightarrow \mathbb{R}$$

$\text{periodo} = 1, \dots, n; n = 24$, para horizontes de operación de 24 horas y períodos de 1 hora.

Definición 3.4 (Intervalo de producción constante)

La agenda de producción también se puede expresar mediante una sucesión de intervalos de producción constante (cpi). Un cpi mantiene el valor de capacidad comprometida durante n períodos consecutivos y está delimitado por un intervalo de tiempo (t_i, t_j) , donde t_i es el instante de inicio del intervalo actual y t_j es el instante de inicio del intervalo siguiente.

Se define entonces: $\mathbb{CPI} = \{cpi_1, cpi_2, \dots, cpi_m\}$, un conjunto de intervalos de producción constante.

Cada intervalo está definido por un par (t, y) , donde t es el tiempo de inicio e y es la capacidad comprometida en el intervalo, expresada en términos de la variable de estado relacionada o en términos de la unidad de medida de la variable de salida de la UPH. En consecuencia se tiene:

$$cpi_i = (t_i, y_i), t_i \in \mathbb{R}^+, y_i \in \mathbb{R}$$

La agenda de producción expresada como una sucesión de intervalos es:

$\mathbb{AP} = \{(t_1, y_1), (t_2, y_2), \dots, (t_i, y_i), (t_j, y_j)\}$, $cpi_i \prec cpi_j \therefore \prec$ es una relación de precedencia.

Como se observa en el diagrama UML de la Figura 3.5, sobre la *agenda* se pueden realizar las operaciones *consultar()* y *actualizar()* y puede ser modificada por el *programador* y el *reprogramador*.

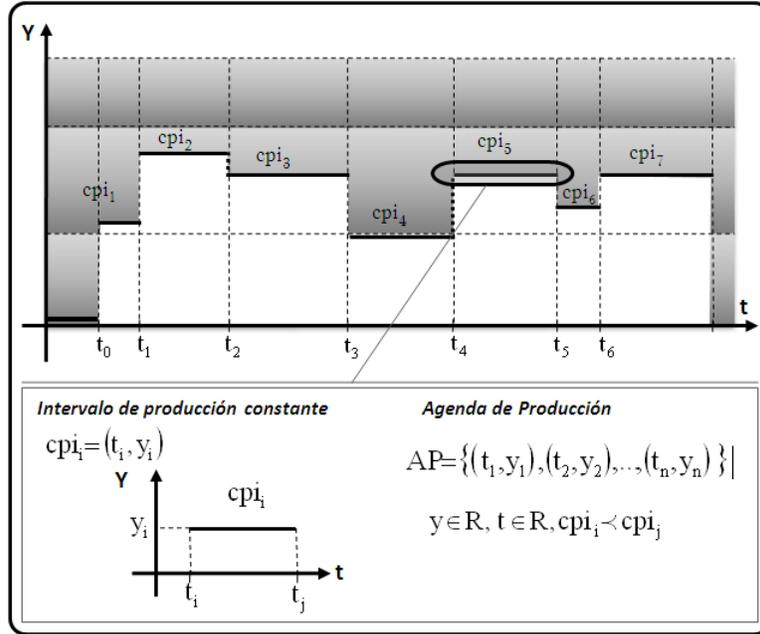


Figura 3.43: La *agenda de producción* como sucesión de intervalos constantes

Una vez que la UPH ha recibido una misión, ésta se descompone en misiones para los holones recurso y para las holarquías. La descomposición de la misión dentro de la holarquía es un proceso interno de negociación y optimización, similar al que se presenta entre la UPH y los holones. En la Figura 3.44 se ilustra la descomposición de la *agenda de producción* en misiones para los holones. A su vez, la misión asignada a cada holón queda representada en la *agenda del holón*, la cual tiene el mismo formato que se define para la Agenda de UPH. La Figura 3.45 muestra una misión de una UPH, descompuesta en misiones de holones recursos y representadas en sus agendas.

Según la definición de la *agenda* y el conjunto de holones y holarquías factibles para una misión, la programación de la producción desde el enfoque holónico puede ser expresada formalmente como se indica a continuación.

Dada una misión m_i y un conjunto H de holones y holarquías definidos desde $L_m(G_{feasible})$, para los cuales m_i es factible:

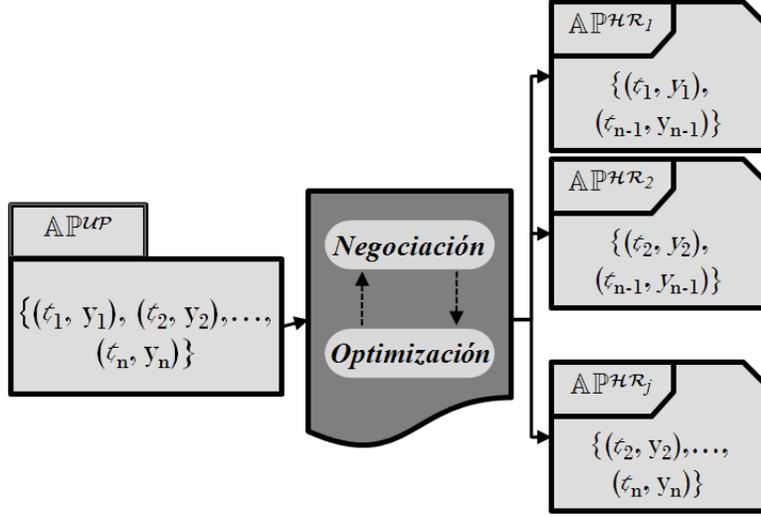


Figura 3.44: Negociación y optimización en la descomposición de la *agenda*

- I. Seleccionar la configuración óptima para realizar m_i .
- II. Asignar una Agenda de producción $\mathbb{A}\mathbb{P}$ a cada holón y holarquías seleccionadas.

A cada recurso u holarquía perteneciente a H se le asigna un costo:

$$\mathcal{W} : H \rightarrow \mathbb{R}^+$$

El problema consiste en encontrar $\min_H \mathcal{W}$ sujeto a la restricción que m_i es factible y que satisface las restricciones operacionales de la UPH.

Una vez seleccionados los holones y holarquías que realizarán la misión, se hace uso del árbol de alcanzabilidad para secuenciar las operaciones. Debe anotarse que, según lo planteado en el método de elaboración del modelo global en PN, el árbol de alcanzabilidad obtenido considera las restricciones operacionales relacionadas con precedencias entre recursos. Igualmente, el árbol entrega todas las posibles secuencias de operación.

Para la configuración seleccionada existe un estado final $q_{mf} \in Q_m$. Si del árbol $G_{feasible}$ como el de la Figura 3.46(a), se retiran las trayectorias que llevan a esta-

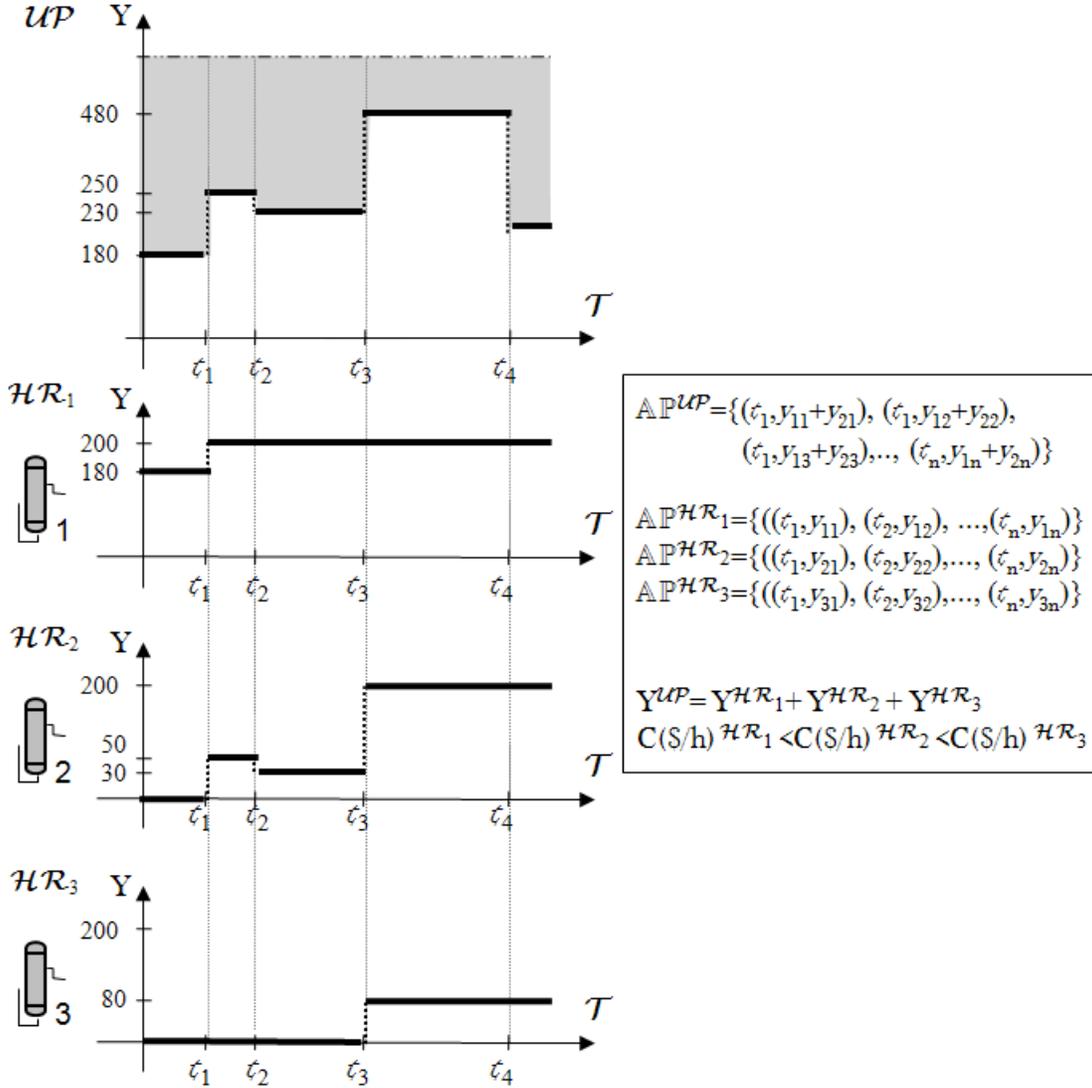


Figura 3.45: Descomposición de misiones entre holones recurso

dos finales diferentes a q_{mf} , se obtiene un autómata G_{mf} , según se muestra en la Figura 3.46(b). El conjunto de posibles secuencias está dado por:

$$L_m(G_{mf}) = \{s \in \Sigma^* | \delta(s, q_{mf})!\}$$

En la definición de las secuencias, además de las precedencias, se deben considerar los retardos que existen para que el producto fluya entre los recursos. Para recursos conectados en serie, los retardos incluyen: tiempo de arranque del recurso aguas arriba (t_s), tiempo de proceso en el recurso aguas arriba (t_p), retardo de transporte entre

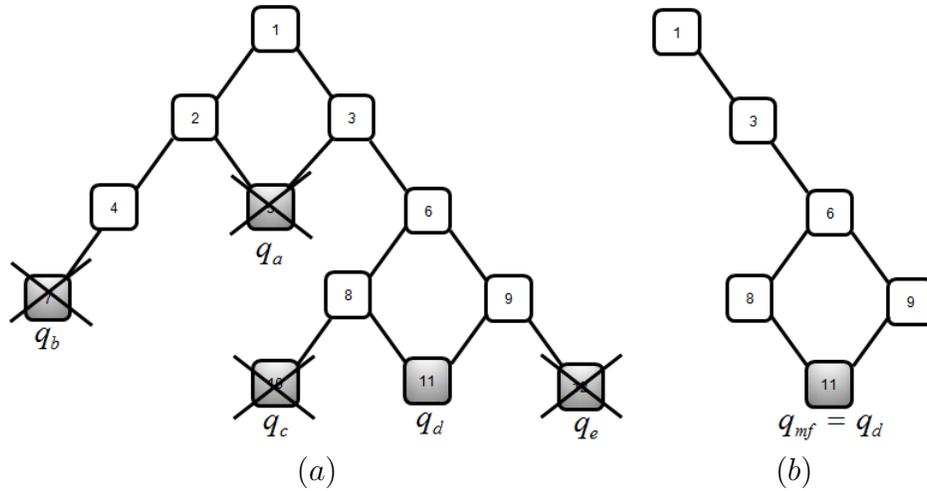


Figura 3.46: Autómata G_{mf}

el recurso aguas arriba y el recurso aguas abajo (t_i), tiempo de proceso en el recurso aguas abajo (ver Figura 3.47).

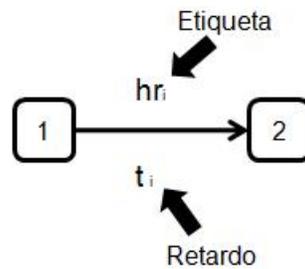


Figura 3.47: Retardos asociados a recursos conectados en serie

Para secuenciar las operaciones haciendo uso del árbol de alcanzabilidad, a cada arco que conecta los estados en G_{mf} se le asigna un número real que representa el retardo para pasar de un estado al otro, como se ilustra en la Figura 3.48. Se define entonces una función:

$$T : \delta \rightarrow \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$$

Para recursos conectados en serie como los que se muestran en la Figura 3.15, la secuencia de las operaciones es la que se presenta en la Figura 3.49.

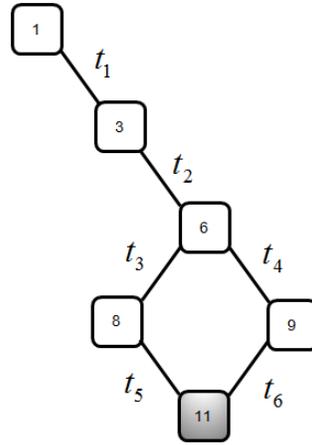


Figura 3.48: Árbol de alcanzabilidad con retardos

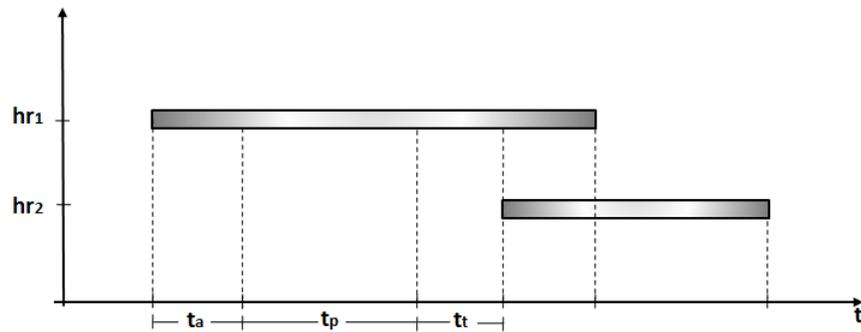


Figura 3.49: Secuencia de operaciones. Recursos en serie

Si los recursos están conectados mediante bifurcaciones asíncronas o mediante uniones asíncronas, como se presenta en las figuras 3.16 y 3.18, las trayectorias son las que se presentan en los diagramas de las figuras 3.50(a) y 3.51(a), así como los diagramas temporales de las figuras 3.50(b) y 3.51(b).

Para el caso de conexiones en bifurcación síncrona o unión síncrona, una vez se selecciona el recurso destino, los recursos origen y destino quedan conectados en serie.

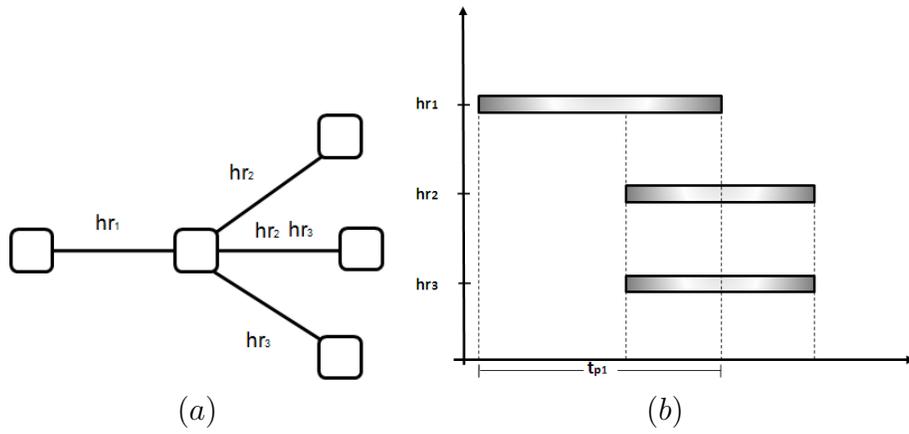


Figura 3.50: Trayectorias y secuencias. Bifurcación asíncrona

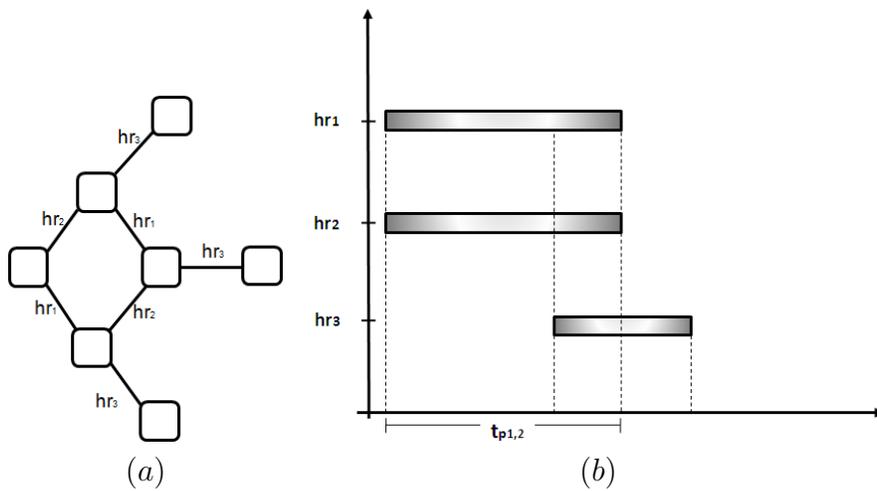


Figura 3.51: Trayectorias y secuencias. Unión asíncrona

Si dos recursos pueden arrancar simultáneamente porque ninguno es precedente del otro, la secuencia de operación se puede resolver a favor del recurso de menor costo.

Definidas las secuencias de las operaciones, el último paso es establecer la *agenda* de cada recurso, asignando los intervalos de producción constante, según la misión asignada, la secuencia definida y las restricciones operacionales.

Dentro de las restricciones operacionales se pueden mencionar por ejemplo, valores máximos de flujo de producto permitidos en las secuencias de arranque y número de períodos de duración del arranque.

Si se definen:

t_s , tiempo de arranque.

t_f , tiempo de finalización de la misión.

nT_s , número de períodos de arranque.

y_{si} , valor de salida de producto máximo permitido para el período i .

y_m , valor de salida de producto negociado como misión.

Debe cumplirse que:

$$\forall cpi \in \mathbb{AP}, \forall t_i \in (t_i, y_i), \text{ se asigna un } y, \text{ tal que: } \begin{cases} y \leq y_{si} & s \ 0 \leq t < t_s \\ y \leq y_m & s \ t_s \leq t < t_f \end{cases}$$

Otra consideración importante que se debe tener para asignar los intervalos de producción constante, es que para la UPH debe cumplirse que:

$$\Sigma mission_i = mission_{UPH}$$

Esto es, la sumatoria de las misiones de los holones debe cumplir la misión asignada a la UPH. Así, en períodos en los cuales un holón no puede cumplir el valor de misión asignado, por ejemplo, por restricciones en el arranque o por la secuencia de operación, otros holones deben entrar a suplir ese faltante para no afectar el compromiso de la UPH.

Dependiendo del proceso específico, pueden establecerse otras restricciones con respecto a la asignación de salida de producto en cada intervalo de producción constante.

El procedimiento expuesto para la *programación de la producción* se expresa en el algoritmo que se muestra en el diagrama de flujo en la página siguiente.

Ejemplo de Programación de la producción

Para negociar una misión de 140 unidades de flujo de producto, el Planificador entregó el siguiente conjunto de secuencias:

$$L_m(G_{feasible}) = \{hr_1r_1hr_2hr_3, hr_1r_1hr_3hr_2, hr_1hr_2r_1hr_3, hr_2hr_1r_1hr_3\}$$

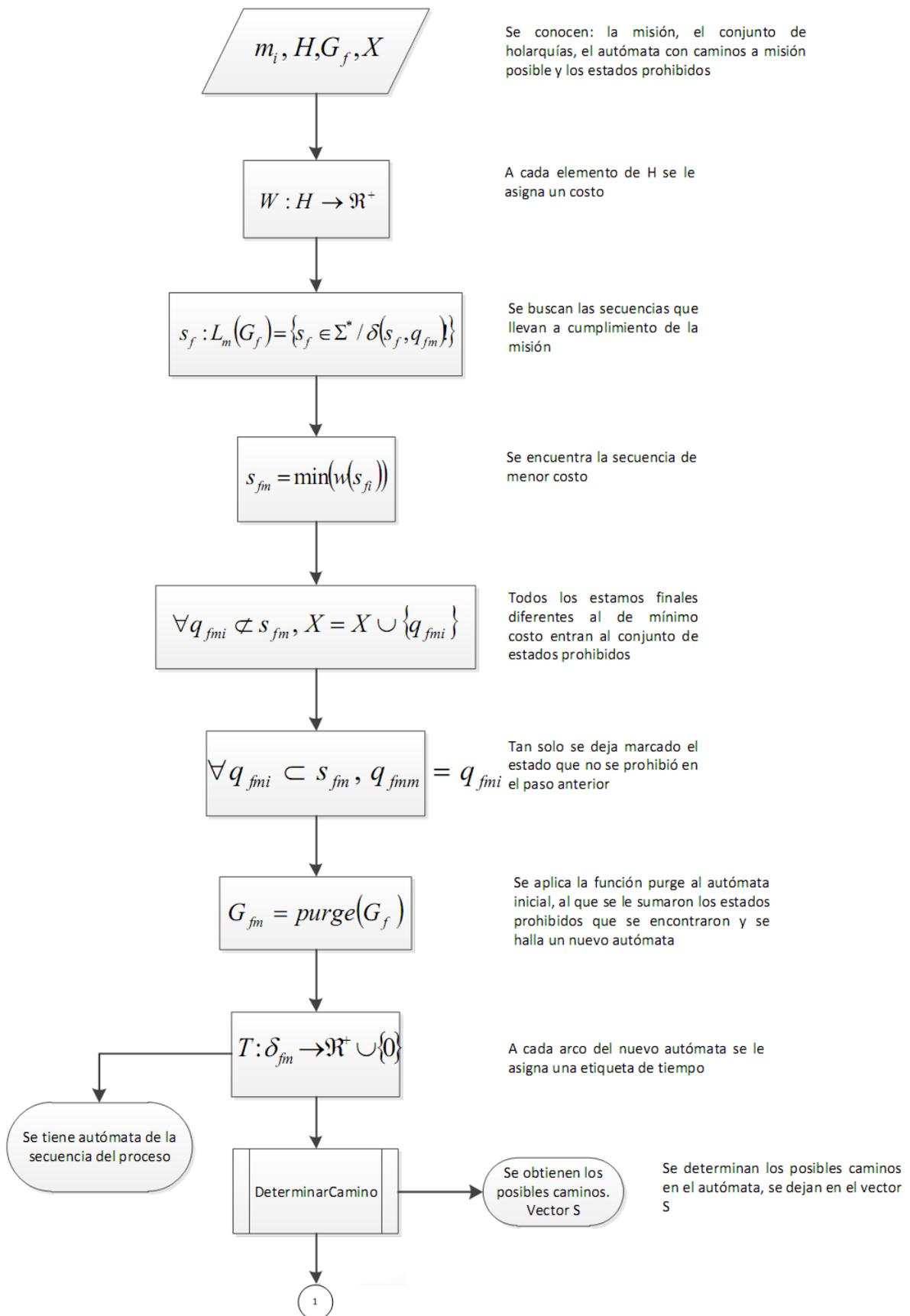
Si se tienen en cuenta las ofertas presentadas por los holones y realizando una asignación teniendo como criterio el mínimo costo, se tiene:

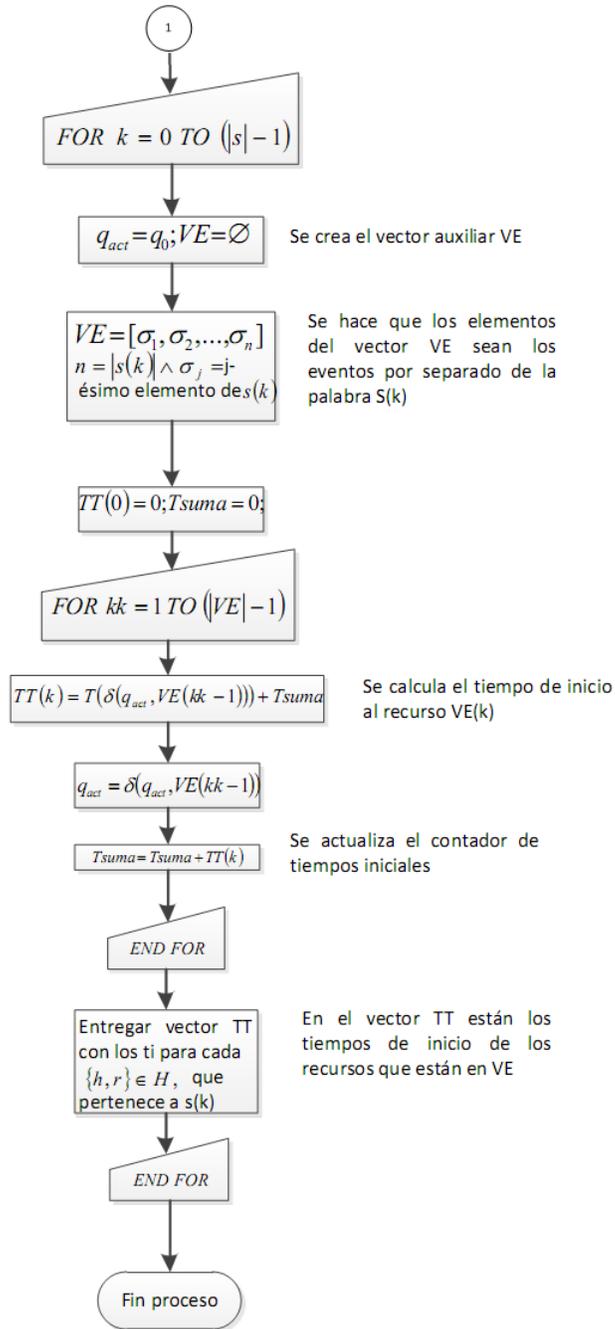
$$mision(hr_3) = 45U$$

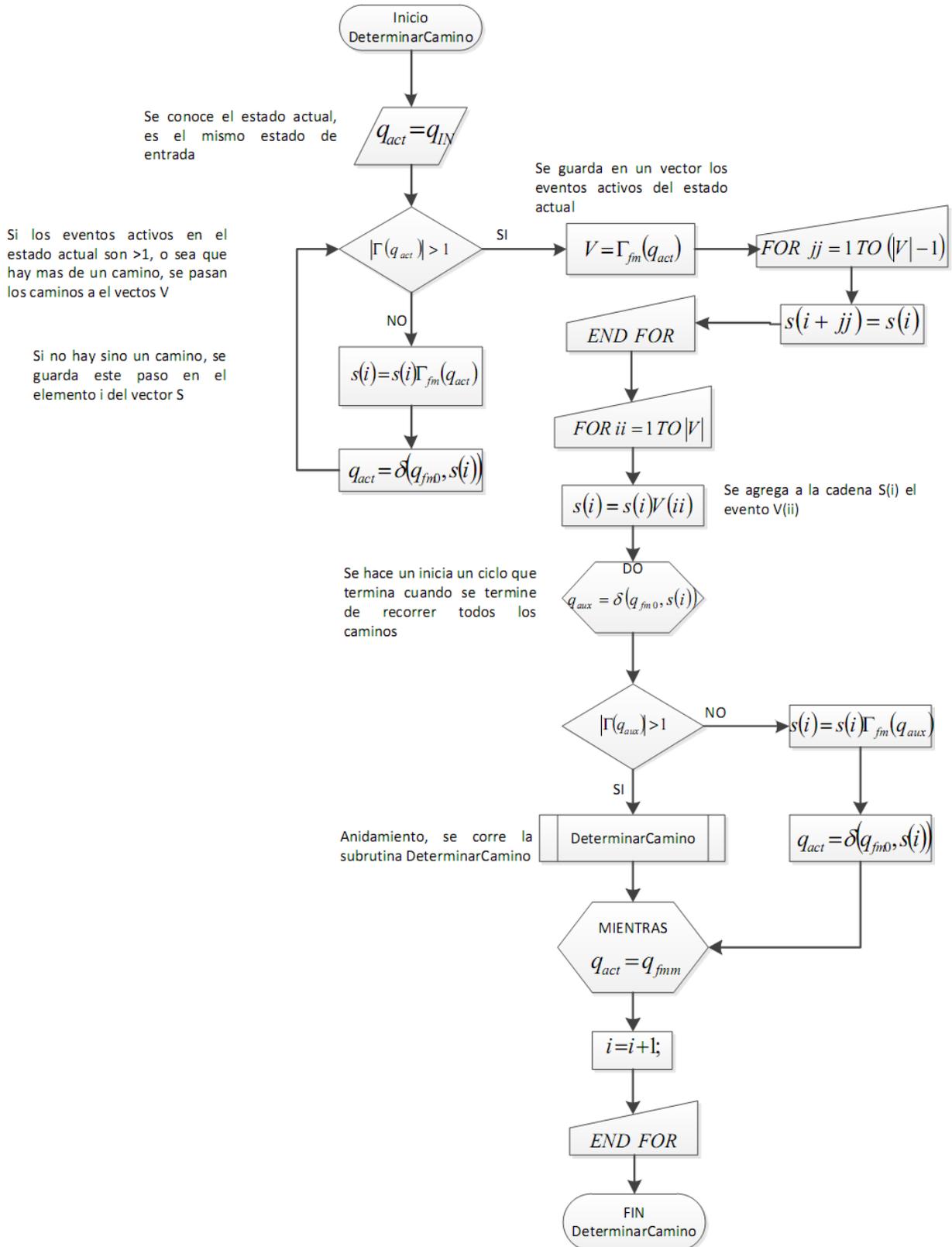
$$mision(hr_1) = 70U$$

$$mision(hr_2) = 25U$$

Los datos de tiempos para secuenciar las operaciones y los valores máximos en los arranques se muestran en el Cuadro 3.8.







Recurso	Tiempo de arranque (horas)	Tiempo de proceso (horas)
hr_1	1	1
hr_2	1	1
hr_3	2	0.5
hr_4	1.5	0.5
r_1	0	0.5
r_2	0	0.5
Tiempos de transporte		
Origen	Destino	Tiempo
hr_1	r_1	0.25
r_1	hr_3	0.25
hr_2	r_2	0.25
r_2	hr_4	0.25
Valores máximos permitidos durante los periodos de arranque		
Recurso	Período	Valor máximo (Unidades de flujo de producto)
hr_1	1	50
hr_2	1	50
hr_3	1	20
	2	40
hr_4	1	20
	2	40

Cuadro 3.8: Tiempos para secuenciar operaciones

Para secuenciar las operaciones, los recursos hr_1 y hr_2 deben arrancar simultáneamente para poder cumplir la misión. Así mismo, deben arrancarse 1 hora antes, para que en el instante de inicio de la misión se pueda cumplir con el valor establecido. El recurso hr_3 arranca 2.5 periodos después del arranque de hr_1 . En el diagrama de la Figura 3.52 se indican las secuencias de operaciones.

Para la asignación de los intervalos de producción constante, se tienen en cuenta los valores máximos permitidos en los periodos de arranque expresados en el Cuadro 3.8 y que la UPH cumpla la misión globalmente.

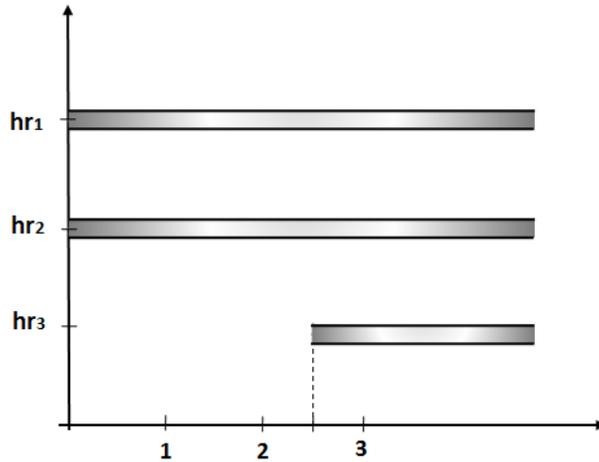


Figura 3.52: Secuencias de operaciones

Las *agendas* para los holones, como resultado del proceso de *programación de la producción*, se presentan en la Figura 3.53.

3.3. Análisis de los resultados obtenidos

- Según el criterio definido, el *programador* genera la solución de mínimo costo.
- El resultado de la *programación* cumple las restricciones operacionales e indica la secuencia en la que deben operar los recursos, cumpliendo con lo establecido para el cumplimiento de la misión y resuelto según la propuesta presentada.
- La misión es alcanzable por la UPH y distribuida entre los holones según el resultado del proceso de negociación.
- La agregación de las misiones individuales da como resultado la misión global de la Unidad de producción.

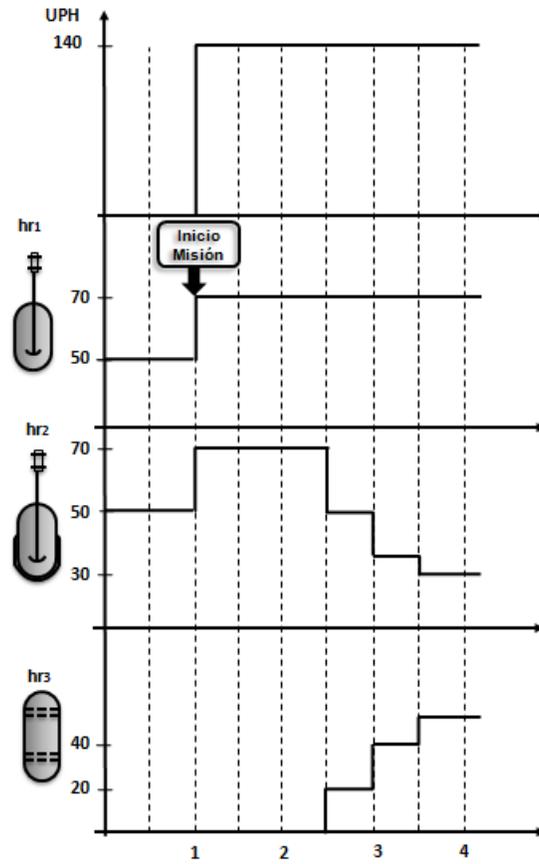


Figura 3.53: Misiones para los holones

Conclusiones

- Una de las características clave del paradigma holónico es la descentralización de la toma de decisiones. Desde esta concepción, se presenta una propuesta para descentralizar las funciones de *planificación* y *programación de la producción* en sistemas continuos, dotando a cada Unidad de Producción Holónica (UPH), cada holarquía y cada holón, de una estructura recursiva y distribuida para planificar y programar su producción, empleando para ello mecanismos de negociación.
- Planteando apropiadamente la planificación y programación como problemas de control supervisorio, se puede hacer uso de la síntesis de supervisores y el

análisis del espacio de estados, para generar una solución que resuelve situaciones propias de los sistemas de eventos discretos, como conflictos, secuencias, recursos compartidos, concurrencias, múltiples rutas; que están presentes en la planificación y la programación. El espacio de estados se obtiene a partir de un modelo global de la UPH representado mediante redes de Petri.

- El resultado, una base formal unificada que permite seleccionar configuraciones, definir secuencias de operación, evaluar factibilidad de la misión, formar holarquías y asignar misiones.
- Para realizar todas estas operaciones propias de la planificación y la programación de la producción, se evidenció la ventaja de emplear la teoría de lenguajes y el análisis del árbol de alcanzabilidad, facilitando ampliamente la elaboración de algoritmos para programar estas operaciones.
- Se aporta además una expresión formal sobre el resultado de la *planificación holónica*, en términos de la teoría de lenguajes.

Capítulo 4

Reprogramación de la producción

Introducción

El ambiente en el que se desarrolla un proceso productivo es dinámico y está sujeto a cambios en su entorno, tanto internos como externos. Se pueden presentar perturbaciones en el piso de planta, como fallas de los recursos, pérdidas de capacidad de los mismos, problemas con la calidad del producto, desviaciones en los tiempos de proceso estimados; cambios en las órdenes de producción, debidos a la llegada de pedidos más urgentes, cancelación de pedidos o cambios en las prioridades de órdenes ya programadas. También se pueden presentar incumplimientos por parte de proveedores de materia prima que afectan la ejecución del *plan de producción programado*.

El principal atributo considerado en un Sistema de Producción Holónico (HPS), es que el sistema responda rápidamente ante este tipo de perturbaciones y eventos no previstos. Las ventajas del enfoque holónico se evidencian precisamente en la forma como el sistema de producción responde a las situaciones cambiantes. Autores como Bongaerts [4] y Leitao [35] afirman incluso que en operación normal, el sistema de control de la producción obedece a una estructura jerárquica y durante contingen-

cias, la estructura es heterárquica. Esta combinación entre esquemas jerárquicos y heterárquicos es propia del paradigma holónico y se propone así para combinar la optimización global con la respuesta rápida a perturbaciones.

La componente heterárquica está concebida para que mediante la autonomía, cooperación, proactividad y reactividad, la UPH ajuste su estructura de producción y sus leyes de control para adaptarse a las nuevas condiciones operativas y pueda cumplir la misión negociada siempre que sea posible, aún en situaciones de falla.

Un evento inesperado como los que se han descrito puede ocasionar que el plan de producción no sea factible y que la unidad de producción holónica llegue a incumplimientos.

Si el plan de producción no es factible por el cambio del estado de la UPH, debe iniciarse el proceso de *reprogramación de la producción*. En procesos continuos el nuevo plan debe asegurar continuidad y estabilidad de la producción.

En la propuesta que se presenta y que se ilustra en el diagrama de la Figura 3.5, el *plan de producción* está representado en la *agenda del holón*. En consecuencia, la función principal del *reprogramador* es modificar la agenda para ajustarse a una nueva condición de operación.

Las siguientes situaciones o eventos pueden ocasionar que se re programe la producción. Se agregan algunos casos propios del enfoque holónico, como la reprogramación debida a la solicitud de cooperación de un holón.

- Fallas en los recursos.
- Pérdida de capacidad de recursos; operación degradada.

- Problemas de calidad.
- Retrasos en la entrega de insumos.
- Arribo de nuevas misiones.
- Cancelación de misiones.
- Variaciones en tiempos de proceso o de transporte estimados.
- Cambios en prioridades de misiones.
- Optimización, cuando el nivel jerárquico hace cambios en la programación realizada de manera heterárquica para optimizar el plan de producción.
- Solicitudes de cooperación de holones fallados.
- Ingreso de nuevos recursos o de aquellos que estaban en mantenimiento.
- Salida temporal o definitiva de recursos.
- Desviaciones en el desempeño del proceso.

A diferencia de las funciones de *planificación* y *programación* que se realizan fuera de línea, una exigencia adicional que se le impone a los sistemas de control de la producción es que la *reprogramación* debe actuar con criterios de desempeño de tiempo real. Soluciones que no son óptimas son aceptables debido a que la principal métrica es la respuesta temporal.

El desempeño en tiempo real implica que un nuevo plan es determinado dinámicamente según el avance de la misión y los cambios en el estado de la UPH. El nuevo plan debe ser generado tan rápido como sea posible, siendo entonces el desempeño temporal, un reto para la reconfiguración.

Para cumplir con esa exigencia, los HPS se dotan de mecanismos de respuesta, agilidad y flexibilidad que les dan la robustez frente a las perturbaciones. Dentro de esos mecanismos se incluyen las funciones de coordinación y supervisión distribuidas, la formación de holarquías y la cooperación, que permiten reconfigurar de manera dinámica la infraestructura de producción y las leyes de control para ajustarse a las nuevas condiciones operativas.

Un sistema de producción es reconfigurable si es flexible en términos de asignación de operaciones y de arquitecturas de control que brinden la posibilidad de aplicar diferentes políticas para distintas clases de servicios o adaptar las estrategias para alcanzar nuevos requerimientos impuestos por los cambios en el ambiente productivo. Cambios en la asignación de operaciones o en las estrategias de control implican cambios en el plan de producción y en consecuencia, la reconfigurabilidad es una propiedad de los sistemas holónicos que beneficia la reprogramación de las operaciones, como respuesta a una nueva condición operativa que hace que el plan de producción vigente no sea factible.

En ADACOR [79], Leitao define la reconfigurabilidad como la habilidad de un sistema para cambiar dinámicamente su configuración, usualmente para responder a cambios en su ambiente.

En [69] se define un sistema de manufactura reconfigurable (RMS) como aquel que debe estar habilitado para adaptar su configuración en tiempo real, dependiendo de los objetivos de producción y los recursos disponibles. En el proceso de reconfiguración se definen los pasos para determinar las acciones necesarias para poner el sistema en un estado compatible con la continuidad de la producción. La reconfiguración se expresa y resuelve como un problema de alcanzabilidad en redes de Petri. Dentro de

las acciones de reconfiguración se consideran rutas alternativas, arranque y parada de recursos, secuencias de operación factibles. Es importante anotar que este trabajo se enfoca en el uso de modelos de control que generan procedimientos de reconfiguración habilitados para reorganizar tanto la estructura de la planta como los objetivos de producción en sistemas continuos.

En los trabajos de Berruet [126,127] se establece que los procedimientos de reconfiguración consisten en buscar distintas rutas, habilitando a los distintos productos a que consigan los recursos apropiados para desempeñar las operaciones de producción requeridas. La reconfiguración y capacidades de adaptación de un sistema de producción son limitadas. En consecuencia, los modelos modulares, flexibles y distribuidos son muy útiles para hacerlo, tanto como el control en tiempo real, el monitoreo y la supervisión.

La formación de holarquías y la cooperación son otros mecanismos de los que dispone el enfoque holónico para alcanzar agilidad y flexibilidad. En [128] se plantea que la robustez de un sistema holónico frente a perturbaciones está dada por que el enfoque dispone de mecanismos de monitoreo para reiniciar holones y reprogramar sus tareas.

Maturana en [129] propone una arquitectura de reconfiguración dinámica basada en holones y agentes. Dependiendo de las capacidades de organización social de los agentes, un sistema autónomo puede evolucionar hacia organizaciones complejas de agentes denominadas *holarquías temporales*. La negociación basada en costos soporta la formación de holarquías. Se entiende una holarquía temporal como una organización de agentes centrada en tareas y basada en costos.

Chokshi y McFarlane, en un trabajo muy extenso y completo, proponen una arquitectura distribuida basada en el paradigma holónico para el control reconfigurable de

operaciones en procesos continuos. La propuesta distribuye las funcionalidades de planificación, programación, reprogramación, coordinación y control [5,42]. Una revisión sobre planeamiento distribuido y programación de holones reconfigurables se puede consultar en [100]. Otros trabajos que abordan la reconfiguración desde el enfoque holónico se presentan en [57,103,130,131].

Como se plantea en la sección 4.1, el esquema de respuesta a las perturbaciones considera los atributos holónicos básicos en la construcción de una estructura de reprogramación de la producción con características de respuesta en tiempo real.

4.1. Esquema de respuesta a las perturbaciones

En la construcción del esquema de respuesta a las perturbaciones que exige que se re programe la producción, el paradigma hace uso de los atributos holónicos básicos que le dan a una UPH las propiedades de agilidad y flexibilidad para responder rápidamente a situaciones no esperadas.

Ante la presencia de una falla, el holón, en uso de su *autonomía*, trata de ajustar su desempeño para adaptarse a la nueva condición y en la medida de lo posible, cumplir la misión asignada. Para hacerlo, redefine puntos de operación, cambia leyes de control y disminuye sus exigencias de desempeño para operar en condiciones de degradación. Estas acciones son llevadas a cabo por la función de *supervisión* que se explica en detalle en el capítulo 5.

El comportamiento para atender una falla de manera autónoma y descentralizada no afecta el plan de producción de la holarquía ni de la UPH, pero si puede afectar el plan de producción del holón expresado en su *agenda*, ya muchas de las decisiones

para atender una falla pueden implicar cambios en el plan de producción. De acuerdo con esto, las perturbaciones que puede atender el holón no son visibles para la holarquía o para la UPH y precisamente en eso radica la autonomía: que el holón pueda tomar decisiones para atender perturbaciones sin consultar con niveles superiores. De esta forma, la autonomía también permite restringir la propagación de las perturbaciones, debido a que éstas permanecen en el nivel de decisión que las puede atender.

El atributo de la *proactividad* considera la detección de fallas incipientes y le da al holón la capacidad de anticiparse a las consecuencias que puedan presentarse en cuanto a incumplimientos en la misión, si la falla causa la salida del recurso. Si las fallas que predice o los incumplimientos que estima, los puede atender el holón de manera autónoma anticipando acciones correctivas, aplica lo expresado en los párrafos anteriores con respecto al uso de la autonomía.

Si el holón establece que definitivamente no es capaz de cumplir la misión ante la nueva condición, mediante el atributo de la *cooperación* acude a la holarquía para que en esta instancia se resuelva la situación a través del supervisor de la holarquía. Debido a la *recursividad* del paradigma, aplica lo expresado con respecto a la autonomía:

“En uso de su autonomía, la holarquía trata de ajustar su desempeño para adaptarse a la nueva condición”.

Las fallas de los holones que son visibles para la holarquía afectan la Agenda de la holarquía y en consecuencia, exigen que se re programe la producción.

La *reprogramación* de la producción a nivel de la holarquía es un proceso de renegociación de las misiones de los holones que la conforman, en el que puede participar

incluso el holón fallado, el cual presenta una nueva oferta para su condición operativa actual.

Si la holarquía no está en condiciones de atender la perturbación, ésta se hace visible a la UPH, la cual, nuevamente por la recursividad, trata de atenderla de manera autónoma, convocando a las holarquías que la conforman a un proceso de renegociación de misiones y reprogramación de las agendas de holones, holarquías y UPH.

Si no es posible resolver la contingencia a nivel de la UPH, ésta acude a la UPH mayor que la contiene, la cual ve a la UPH fallada como un holón, replicando nuevamente el esquema de respuesta ante perturbaciones. Finalmente, lo que se pretende es mejorar la *reactividad* del sistema de producción holónico.

El esquema de respuesta a perturbaciones se resume como sigue y se ilustra en la Figura 4.1.

- Si un holón bajo condiciones de falla o probable falla, puede ajustarse de manera autónoma para atender la situación y cumplir la misión, lo hace.
- Si no es posible atender la perturbación de manera local, acude a la holarquía que lo contiene.
- Si la holarquía puede atender la perturbación, lo hace.
- Si para la holarquía no es posible atender la falla, acude a la UPH.
- Si la UPH la puede resolver entre los holones y holarquías que la conforman, lo hace.
- Si la UPH no puede atender la perturbación, acude como holón que es, a la UPH que la contiene.

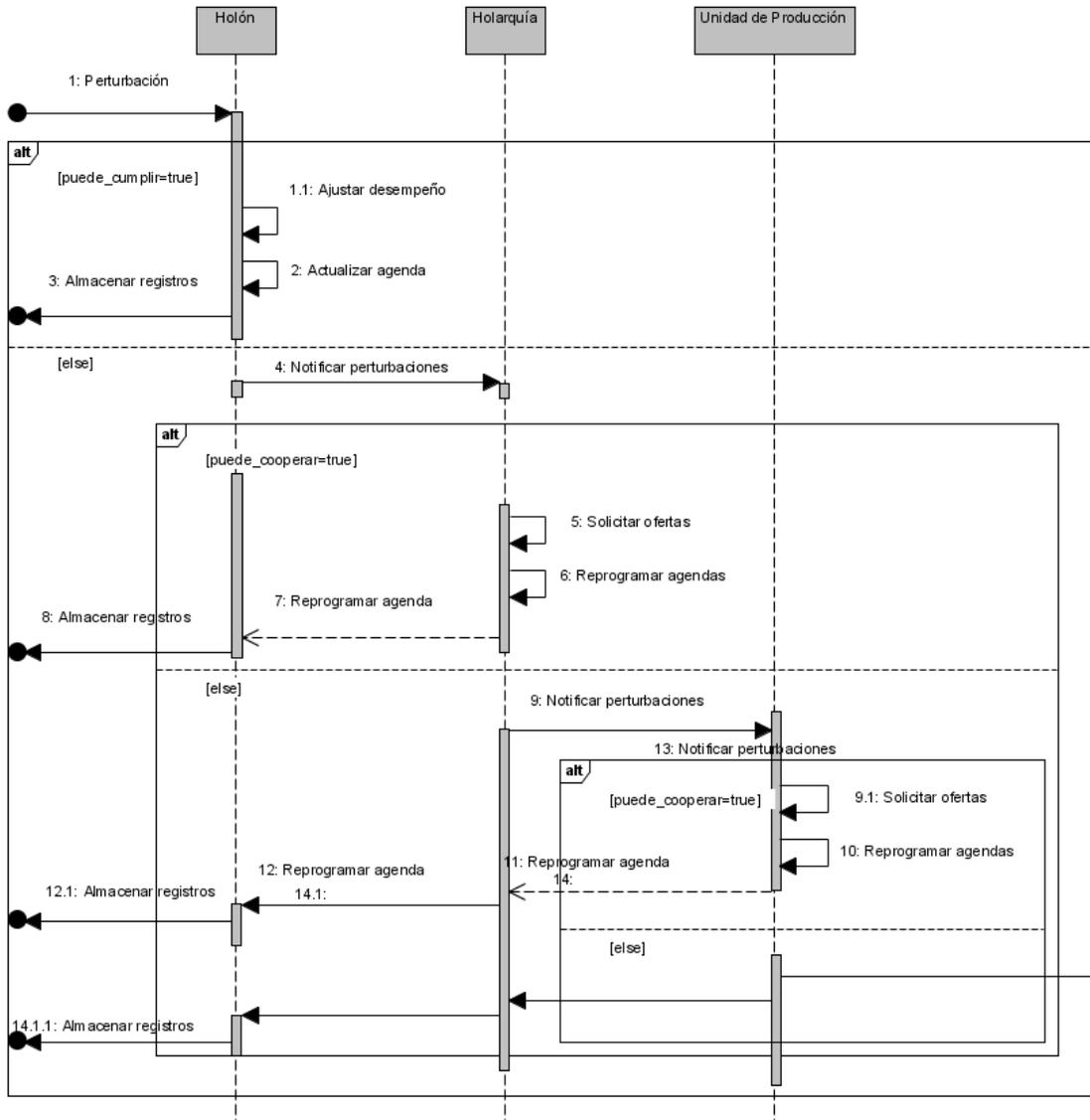


Figura 4.1: Esquema de respuesta a las perturbaciones

4.2. Reprogramación de la producción en las holarquías

Al interior de la holarquía, la *reprogramación de la producción* como respuesta a una perturbación, puede ser resuelta haciendo uso del mismo esquema de solución aplicado para planificar la producción, basado en la teoría de control supervisorio y en el análisis del espacio de estados del modelo global construido mediante redes de Petri.

La selección de una nueva configuración para reprogramar la *agenda* de la holarquía es básicamente un problema de alcanzabilidad de estados y por eso la técnica es aplicable.

Una vez que las holarquías han sido asignadas para determinada misión, se crea la red de Petri de la holarquía.

Supóngase por ejemplo que para la planta de la Figura 3.30 se ha asignado una misión y se ha formado la holarquía H_1 que se muestra en la Figura 4.2.

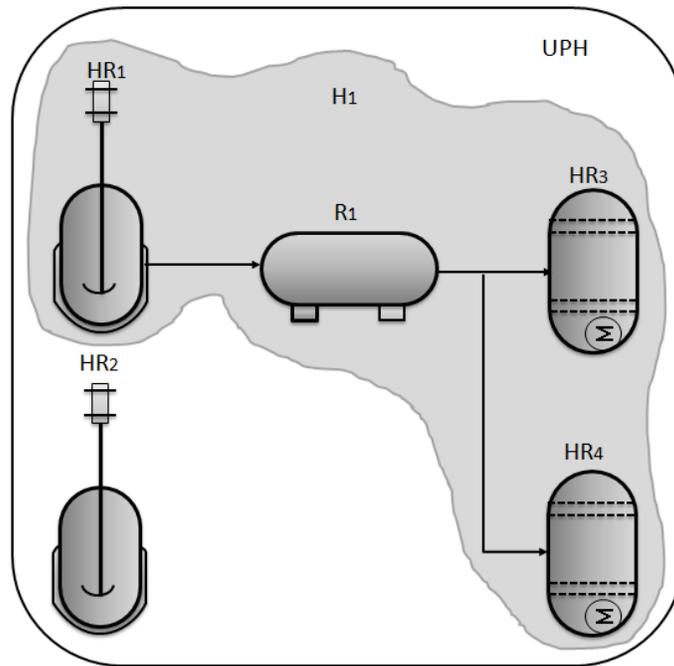


Figura 4.2: Holarquía H_1

La PN de la holarquía se presenta en la Figura 4.3 y el respectivo árbol de alcanzabilidad, en el que se muestra el estado operativo actual, se ilustra en la Figura 4.4. Para la elaboración del modelo PN y el árbol de alcanzabilidad, se tiene en cuenta lo presentado en el capítulo 3.

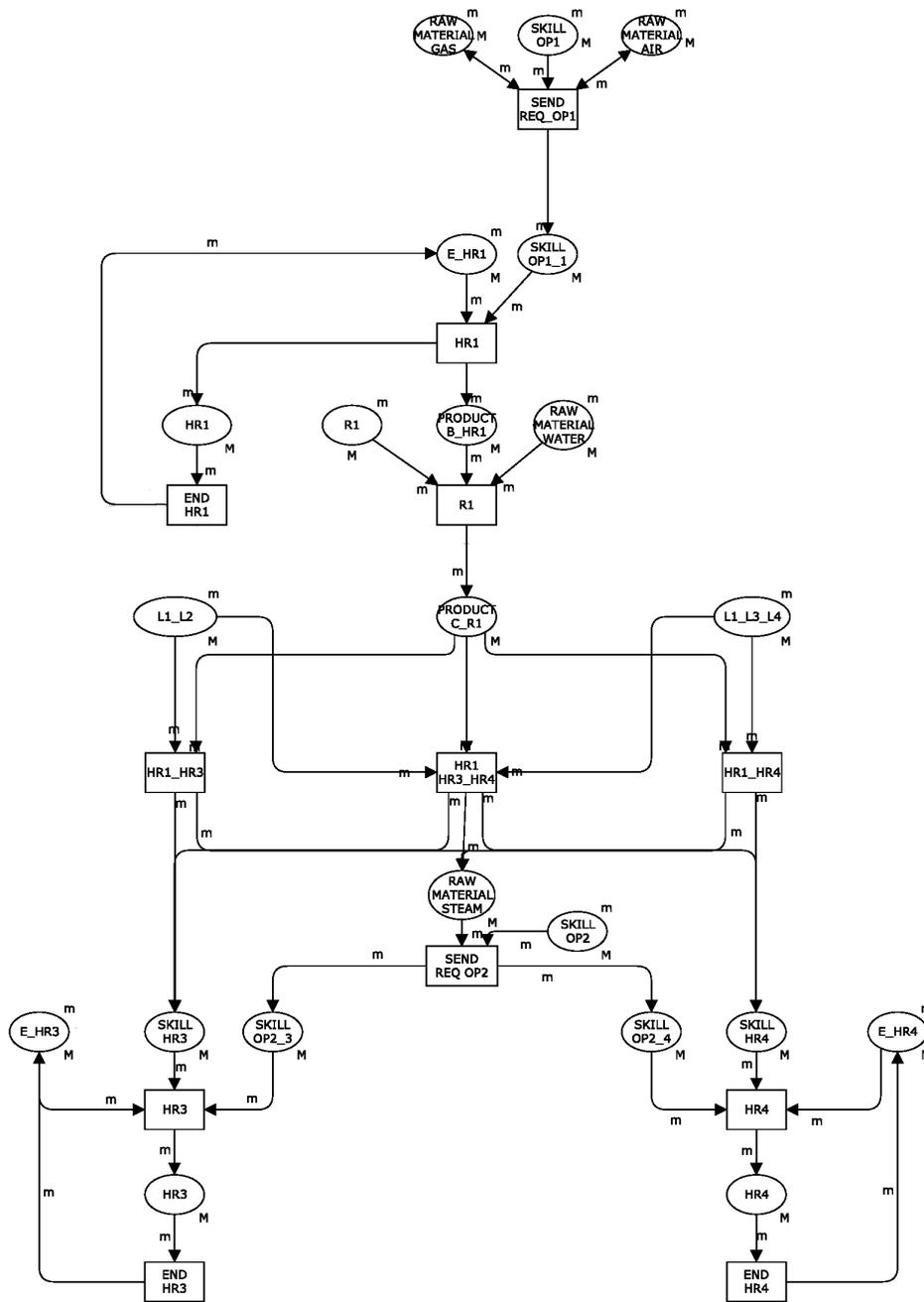


Figura 4.3: Modelo PN para la holarquía H_1

En el nodo 16 se ubica el estado operativo actual. Si se presenta una falla en el recurso HR_4 se genera un nuevo marcaje y un nuevo árbol para esa condición, el cual se muestra en la Figura 4.5. En este árbol, el nuevo estado es el nodo 13.

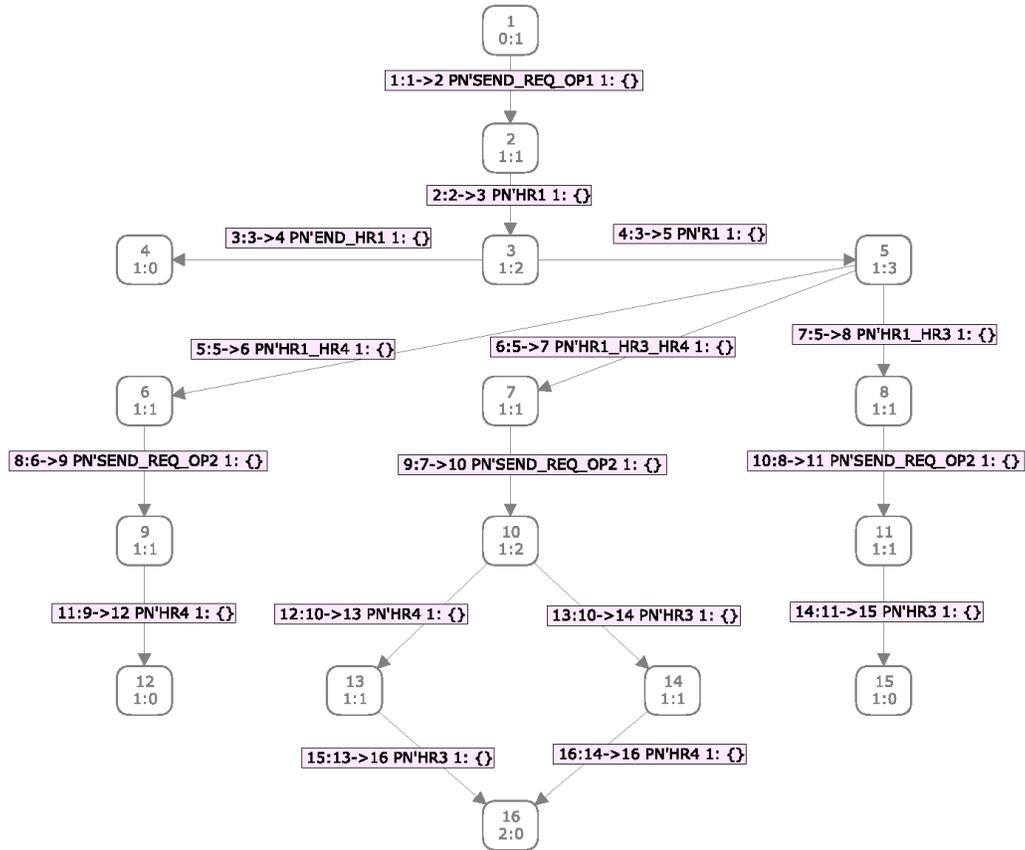


Figura 4.4: Árbol de alcanzabilidad de la holarquía H_1

Analizando este árbol se establece que los nodos 9 y 12 no son soluciones debido a que no llevan a terminaciones del producto por que el holón HR_4 está fallado.

Si en el estado operativo actual es posible asumir la misión, debido a que el nodo tiene la capacidad, el sistema se queda operando en ese nodo, reasignando las misiones a los holones involucrados.

Si el nodo no tiene la capacidad para recibir la misión, se busca una nueva configuración, recorriendo las diferentes trayectorias del árbol, de la misma forma que se realizó para la planificación de la producción.

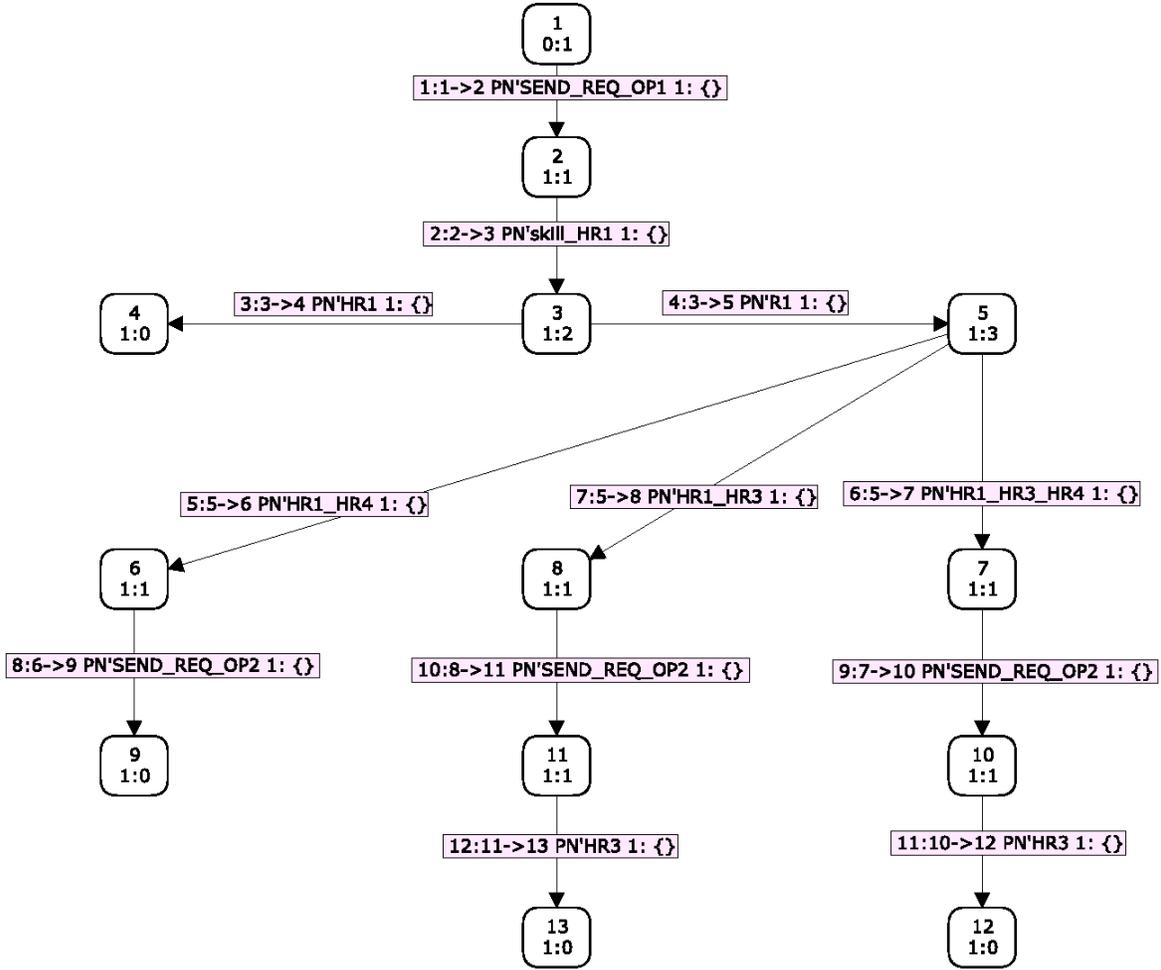


Figura 4.5: Árbol de alcanzabilidad para una nueva condición operativa

Al finalizar esta búsqueda, si no se encuentra un nodo para el cual la misión sea factible, la holarquía declara que no está en condiciones de responder a la perturbación y hace visible este evento a la UPH para que ella lo resuelva.

En el caso de que se pueda resolver internamente entre los holones que forman la holarquía, se hace el ajuste de las respectivas agendas, siguiendo los criterios impuestos por las restricciones operacionales.

4.3. Reprogramación de la Producción en el Nivel de la UPH

Las perturbaciones que no se resuelven internamente por las holarquías son transferidas a la UPH. Esta transferencia se hace mediante el envío de un evento de falla al autómata que representa el estado del recurso, como se explica en el capítulo 5

La UPH convoca a un nuevo proceso de renegociación de misiones, en el que participan las holarquías y holones que están formadas ejecutando la misión actual.

Para el proceso de reprogramación a nivel de la UPH, se crea dinámicamente un modelo en PN que tiene en cuenta esas holarquías y holones. Las holarquías son vistas por la UPH como holones. Así, un modelo interno de una holarquía como el representado en la Figura 4.3 para la holarquía H_1 de la Figura 4.2, es visto por la UPH como un recurso modelado según la Figura 3.13.

Para la UPH de la Figura 3.25, el modelo visto con las holarquías es el de la Figura 4.6. Nótese como se ha simplificado la PN, si se compara con el modelo global presentado en la Figura 3.28.

Sobre la base de este modelo simplificado se realiza el análisis del espacio de estados para seleccionar las holarquías u holones que tienen capacidad disponible y que pueden eventualmente atender la situación de falla.

Esta concepción de la reprogramación simplifica considerablemente el espacio de estados del problema, debido a que la UPH ya no tiene que renegociar con todos los holones, si no con las holarquías que están formadas y a que el proceso de reconfi-

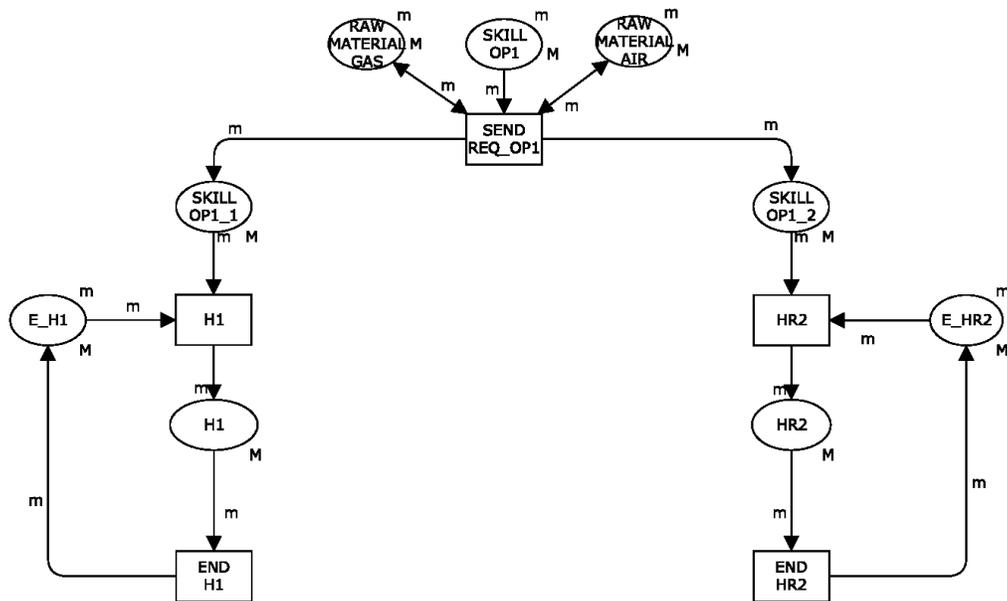


Figura 4.6: Modelo PN de la UPH con holarquías

guración inicia en el estado y configuración actual. Esta consideración se establece teniendo en cuenta que una nueva configuración para atender una perturbación debe mantenerse tan similar a la configuración inicial como sea posible.

Para el modelo de la Figura 4.6, el espacio de estados se reduce al árbol de la Figura 4.7.

Si el análisis del árbol establece que para la UPH no es factible atender la misión para la condición de falla, ésta se propaga al nivel holónico siguiente, continuando de manera recursiva con el esquema de respuesta a las perturbaciones para atender el proceso de reprogramación de la producción. La reprogramación puede llevar incluso a renegociar la misión.

La propuesta para *reprogramación de la producción* se ilustra en detalle en el caso de estudio del capítulo 6, sección 6.7.3.

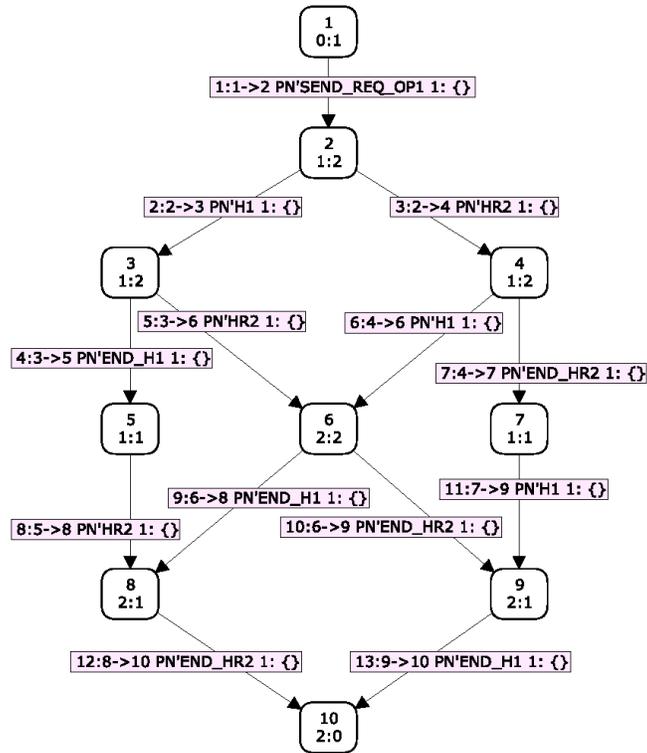


Figura 4.7: Árbol de alcanzabilidad para modelo UPH con holarquías.

4.4. Desempeño en tiempo real

El aporte fundamental de la propuesta de *reprogramación de la producción* es la reducción considerable del árbol de alcanzabilidad, lo que redundará en la disminución de tiempos de ejecución y la habilita para entregar soluciones en tiempo real. Como se anotó anteriormente, el desempeño temporal es la mayor exigencia que se le impone a un sistema de reprogramación.

En la reducción de la complejidad inciden básicamente:

- El modelo en PN y el marcaje inicial que generan un árbol de alcanzabilidad acotado y que es de una complejidad reducida, comparada con técnicas basadas en autómatas.
- El árbol solo incluye nodos de misiones factibles.

- La configuración de la UPH antes de la perturbación. El nuevo plan debe mantener esta configuración tanto como sea posible siendo el punto de partida para la reprogramación.
- La formación de holarquías. La perturbación se intenta resolver inicialmente al interior de la holarquía, para lo cual se genera un árbol de alcanzabilidad muy reducido. Si la holarquía no la puede resolver, solicita cooperación y sale del proceso de negociación, con lo que se hace una reducción del espacio de estados correspondiente a la holarquía fallada.
- Una vez formadas las holarquías en el proceso de *planificación*, la UPH no tiene que renegociar misiones con holones individuales si no con holarquías. Cada una de estas, independiente de los recursos que tenga internamente, es vista por la UPH como un recurso. Esta concepción es la que hace un mayor aporte en la reducción de la complejidad del problema y en los tiempos de reprogramación.

La complejidad computacional del algoritmo de *reprogramación* está dada por el número de nodos del árbol de alcanzabilidad, ya que estos determinan el tiempo requerido para recorrerlo.

Para la *reprogramación de la producción* de la UPH, la complejidad computacional está dada por $\mathcal{O}(n)$, donde $\mathcal{O}(n)$ es la complejidad computacional temporal del algoritmo de *reprogramación*, de orden lineal y n es el número de holarquías formadas durante la *planificación*. El árbol obtenido para las holarquías formadas es muy reducido, el problema computacional es simple y los tiempos de respuesta se encuentran en la escala de los milisegundos.

Al interior de la holarquía, la complejidad es combinatoria y está dada por $\mathcal{O}(pqr)$, donde p es el número de nodos por recurso; q el número de recursos y r el número de configuraciones posibles dentro de la holarquía. El árbol es mucho mayor comparado con el de la UPH y presenta tiempos de respuesta del orden de segundos.

En la sección 6.7.3 se reportan resultados de desempeño temporal del algoritmo de *reprogramación*, sobre pruebas realizadas con el caso de estudio.

Conclusiones

- La aplicación del paradigma simplifica la toma de decisiones, minimiza las intervenciones de niveles superiores, mejora los tiempos de respuesta y restringe la propagación de las perturbaciones, debido a que éstas solo son visibles en el nivel de toma de decisiones que las puede resolver. Estas son consecuencias de la aplicación de atributos como la autonomía, la cooperación y la proactividad, que mejoran considerablemente la reactividad de un sistema de producción.
- A partir de un modelo en redes de Petri que considera las holarquías ya formadas, la configuración y el estado actual de la UPH, se establece un proceso de renegociación, el cual es tratado como un problema de alcanzabilidad de estados y resuelto mediante el análisis del árbol generado por la PN.
- La complejidad de la reprogramación se reduce notablemente, debido a que la UPH no renegocia misiones con holones individuales si no con holarquías ya conformadas. Esto hace que el modelo de PN y en consecuencia, el árbol de alcanzabilidad, se reduzcan enormemente, brindando amplias posibilidades para contar con soluciones de reprogramación en tiempo real.

- La concepción propuesta también hace aportes para dotar a los sistemas de producción holónicos de mecanismos de reconfiguración de las estructuras de control, ya que se generan dinámicamente modelos en PN para cada condición operativa que permiten establecer un nuevo estado como consecuencia de situaciones de falla.
- Los principios holónicos de brindar autonomía al recurso para que responda a las perturbaciones y de renegociar misiones con holarquías ya formadas, combinados con el poder de análisis de las redes de Petri y la teoría de control supervisorio, brindan amplias posibilidades para crear herramientas de reprogramación de la producción con desempeño temporal apropiado y son mecanismos para dotar a un sistema de producción de las propiedades de agilidad, flexibilidad y reconfigurabilidad.

Capítulo 5

Supervisión de sistemas holónicos

Introducción

La *supervisión* es la función de un sistema de control de producción encargada de mantener el funcionamiento del sistema, aún en condiciones de falla. Para sistemas continuos y desde una concepción centralizada y jerárquica, el supervisor comanda los distintos controladores de las dinámicas continuas del proceso y se encarga del arranque, parada y cambios de puntos de operación de los recursos de producción.

En el caso de la supervisión convencional, el operador humano tiene un modelo mental sencillo del sistema, el cual incluye parámetros y restricciones de producción, que resumen las relaciones que se deben tener entre los parámetros para mantener los estándares de calidad [132]. El operador es capaz de identificar situaciones normales y anormales y toma acciones apropiadas [133].

En la literatura consultada se encuentran múltiples definiciones para la función de supervisión. Por ejemplo, en [134, 135] y [136] la función es la coordinación y selección de los puntos de operación de los lazos de control. En [137], la función del sistema de

supervisión es mantener las variables de control en puntos óptimos. De esta forma, un sistema de supervisión puede mejorar el desempeño global del sistema mediante el uso eficiente de controladores locales y la conmutación de políticas de configuración [138]. Igualmente, en [139] se presenta un método basado en descomposición de regiones de operación. Diferentes modelos locales y controladores, son aplicados bajo diferentes condiciones de operación. El propósito del supervisor es coordinar los controladores. Esta coordinación resulta de la selección de un único controlador, el cual en su momento, provee el mejor desempeño.

El controlador de alto nivel, cuyo objetivo es conmutar el controlador de bajo nivel, se denomina “supervisor”. Esquema similar se propone en [138] y en [140], donde se afirma que es inadecuado tener un único conjunto de parámetros que permitan que el sistema se desempeñe satisfactoriamente. Esto debido entre otras razones a las perturbaciones externas que cambian las condiciones de operación del sistema controlado. El monitoreo continuo del desempeño del sistema permite la selección y aplicación de técnicas apropiadas de control para hacer que el sistema alcance los objetivos de desempeño establecidos.

Desde el punto de vista de la planificación, en [141] se establece que la tarea del supervisor es ejecutar la programación en tiempo real (*RT scheduling*) y supervisar las operaciones del proceso de acuerdo al plan de producción. En [142] la función del supervisor es *supervisar* que la planta opere de acuerdo a la planificación de las órdenes de producción (*scheduling*). Cuando un sistema está siendo perturbado, la función de supervisión modifica el plan de producción establecido, de acuerdo con diferentes normas y restricciones [143]. Debe tenerse en cuenta que la propuesta de [142] aplica para procesos *batch*. La vigilancia de rangos de variables es otra función que aparece en [144].

En [145] se mencionan como tareas del sistema de supervisión: monitoreo de datos del proceso, análisis de estados actuales, detección y diagnóstico de anomalías del proceso y ejecución de acciones de control apropiadas.

Muchos trabajos y propuestas enfocan el problema de supervisión desde el diagnóstico de fallas (FD) [146,147]. La concepción de un sistema de supervisión obedece a la misma funcionalidad de un sistema de diagnóstico de fallas: primero, detectar estados normales o anormales, calificarlos, aislar la causa potencial y posiblemente contribuir en la selección de una acción a tomar.

La tendencia del énfasis en FD dio origen al denominado Control Tolerante a Fallas (FTC) [136,148]. Desde este enfoque “el objetivo final de la supervisión es lograr sistematizar la tolerancia a las fallas. Otra parte importante es la ayuda en la toma de decisiones con el propósito de disminuir los efectos de las fallas en el funcionamiento del proceso” [136]. El intercambio de información entre estos sistemas se realiza mediante el diagnosticador, el cual proporciona información sobre la existencia de fallas y sus características y actúa mediante la activación de los mecanismos de reconfiguración frente a fallas [149].

El objetivo del sistema de supervisión es realizar sus funciones para que el sistema alcance la tolerancia a fallas y es el encargado de activar los mecanismos de tolerancia. La tolerancia a fallas se entiende como la capacidad de un sistema de control para mantener los objetivos a pesar de la aparición de una falla, admitiéndose una cierta degradación de sus prestaciones [149]. El FTC combina técnicas de diagnóstico de fallas con control supervisorio para tener sistemas con autonomía para reconfigurarse ante la presencia de fallas.

Los sistemas actuales muestran tendencias hacia los denominados *sistemas de supervisión integrados* [140] y los *sistemas de supervisión inteligentes*: [133, 150–153].

Los sistemas basados en arquitecturas de agentes cooperantes, que se fundamentan en los avances de la computación distribuida y la solución distribuida de problemas, están siendo introducidos en aplicaciones de supervisión de procesos industriales, como sistemas de apoyo a los operadores en tareas como diagnóstico de fallas y restablecimiento del sistema [148, 150]. La detección temprana de condiciones anormales mediante sistemas proactivos de monitoreo pueden ayudar a prevenir salidas no planeadas, reducir pérdidas de producción y frecuencia de mantenimiento, mejorar la eficiencia del operador al mejorar la identificación de fallas [154].

La complejidad del sistema de supervisión se reduce con componentes especializados sintonizados para resolver tareas simples que deben operar bajo coordinación, lo que es muy propio de un enfoque holónico [144].

La aparición del paradigma holónico y de los sistemas Multi-Agente (MAS) también ha influenciado el diseño de los sistemas de supervisión en dos sentidos. Por un lado, integrando los conceptos holónicos o de Sistemas Multi-Agente en el diseño de los supervisores [144, 148, 155], en procesos controlados con técnicas convencionales y por otro, abordando el diseño de los supervisores en sistemas en los que se adopta el paradigma holónico para su control [156]. Desde este enfoque, el supervisor es la inteligencia de tiempo real del holón y es el encargado de la componente reactiva.

El trabajo de Simao [156] aborda directamente el control holónico. Propone un *Supervisor Holónico (HSC - Holonic Supervisory Control)* y lo presenta como aquel sistema

cuyo propósito es controlar la cooperación de las necesidades de los equipos (holones) para producir partes, mediante un proceso de producción definido (método). El HSC es responsable de organizar la cooperación entre los recursos por medio de requerimientos de servicios con base en las decisiones que toma. Estas decisiones podrían estar basadas en las capacidades y estados de los recursos. Los equipos (holones) son elementos esenciales a ser manejados por el HSC. Así, el HSC promueve la cooperación de Holones-equipo por medio de *métodos* y *comandos*, y la toma de decisiones es suministrada mediante *notificaciones*.

Un modelo para el monitoreo de procesos industriales, basado en una ontología holónica es presentado en [157]. El modelo propuesto hace posible la efectividad de la distribución de inteligencia, mediante herramientas de asociación *web services* y distribución de trabajo a los holones a través de *workflow*.

La arquitectura propuesta por [158] se basa en sociedades de agentes, formadas por un conjunto de agentes de información mediadores con distintas responsabilidades o roles. La operación interna de los agentes se basa en el principio orientado por metas. El resultado final es un sistema de supervisión, basado en MAS, configurable por el usuario.

La cooperación es un atributo que le da a los holones la posibilidad de trabajar juntos para lograr una meta común. En [159] se propone una arquitectura de control cooperativo, basada en agentes, que opera como un supervisor de alto nivel en un modelo de automatización multicapas, monitoreando el nivel inferior del sistema de automatización y configurando su lógica de operación ante situaciones cambiantes. En el dominio de cooperación, los agentes encargados de los subprocesos cooperan con el supervisor y con los agentes subordinados.

Para abordar el diseño de sistemas de supervisión, es importante diferenciar claramente y clasificar las dinámicas predominantes del sistema: si es de variables continuas (*Continuous Variable Systems, CVS*), de evoluciones discretas o de naturaleza híbrida. Según sea esta dinámica, el diseño del sistema de supervisión tiene sus consideraciones específicas.

Coinciden muchos autores en afirmar que las dinámicas en el nivel de supervisión son de naturaleza discreta, así la dinámica del sistema sea continua: [54, 84, 85, 87, 142, 160, 161], y por esto, muchos de ellos abordan el problema desde la Teoría de Control Supervisorio (SCT).

Desde los sistemas de eventos discretos, en [162, 163] se plantea que el concepto de *supervisor* está asociado al concepto de *controlador*, haciendo una analogía con la teoría de control realimentado en CVS. En este sentido, la función de supervisión está asociada con la generación de acciones de control para habilitar y deshabilitar eventos controlables, con el objetivo de tener un desempeño del sistema en lazo cerrado, tal que la trayectoria de eventos esté siempre en un conjunto de cadenas de eventos deseados.

En [164] se obtiene una representación discreta de la evolución de los estados del proceso continuo, mediante *cuantizadores*. El problema de control supervisorio consiste en determinar una secuencia de eventos, a partir de una secuencia de eventos de entrada, para evitar que el sistema llegue a regiones prohibidas del espacio de estados.

En este capítulo se presenta una propuesta para la supervisión de procesos continuos, basada en el enfoque holónico y la teoría de control supervisorio.

Inicialmente se presentan las definiciones de términos relacionados con los sistemas de supervisión y las funciones de los sistemas convencionales. Posteriormente se muestran las características de los sistemas de supervisión holónicos y se establece una comparación con los esquemas convencionales.

Al final se presenta la arquitectura propuesta para la supervisión y se hace una propuesta de métricas de los atributos holónicos, basadas en la aplicación de la teoría de control supervisorio y la teoría de lenguajes.

5.1. Los sistemas de supervisión convencionales

En las estructuras de automatización y control jerárquicas, la supervisión es centralizada y se ocupa entre otras de comandar las acciones de arranque y parada del proceso, conmutar puntos de operación y leyes de control, comandar las acciones para operar en condiciones de operación degradada y para restablecer la operación normal del sistema.

Con el fin de establecer una diferenciación de términos, se presentan inicialmente definiciones asociadas a la supervisión y las funciones de estos sistemas.

5.1.1. Definiciones

Definición 5.1 (Variable relevante)

“Mínimo conjunto de información adquirida del proceso, que le permite al operador entender el comportamiento del sistema y evaluar su estado. Una variable pertenece a un conjunto de variables relevantes si es relevante para la supervisión del proceso completo [165].”

Definición 5.2 (Sistema de supervisión)

“Sistema con la habilidad de medir un proceso y actuar en él, formado por componentes interactivos que razonan acerca del comportamiento del proceso para proponer y ejecutar acciones apropiadas para mantener las condiciones de operación normal aún en caso de fallas [150].”

Definición 5.3 (Control supervisorio)

“Teoría general para la síntesis de controladores, llamados supervisores, en sistemas de eventos discretos [68, 166]. En esta teoría, el supervisor es un autómatas que controla el comportamiento del sistema de eventos discretos, denominado planta, restringiendo su comportamiento mediante la habilitación y deshabilitación de eventos y afectando la secuencia actual de eventos y la trayectoria de los estados discretos de la planta” [167].

“El supervisor de un sistema de eventos discretos cambia la entrada de control de acuerdo al estado actual del sistema, observa su estado y por cada estado admisible, una entrada de control debe ser aplicada en ese punto de funcionamiento. Un evento es admisible para un DES supervisado, si y sólo si es físicamente posible y autorizado por la función de supervisión [168].”

El control supervisorio también se aplica a los sistemas continuos cuando el supervisor se diseña desde los sistemas de eventos discretos.

Definición 5.4 (Control supervisado)

“Proceso sometido a un subsistema de control que interactúa directamente con las señales físicas restringiendo su comportamiento y con una entidad de orden jerárquico superior que coordina las tareas del controlador. El control supervisado presupone una estructura jerárquica en la que en el nivel bajo se tiene un sistema controlado (discreto o continuo) y en el nivel alto un supervisor que actúa sobre el sistema controlado,

presentando como ventaja que el supervisor sólo maneja la coordinación y no considera el control directo de los subsistemas (ver Figura 5.1) [91,169,170]”.

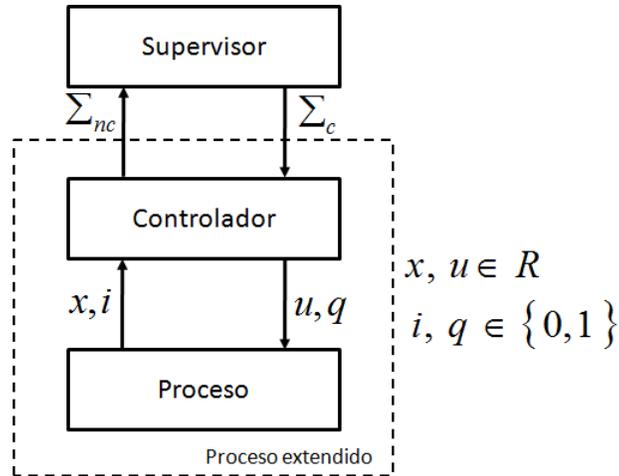


Figura 5.1: Control Supervisado

Definición 5.5 (SCADA, (*Supervisory control and data acquisition*))

Según ISA (*International Society of Automation*) es la tecnología que habilita a un usuario para recoger datos desde una o más instalaciones distantes y le permite enviar instrucciones de control limitadas a esas instalaciones [171]. Se privilegia en estos sistemas la captura de datos, los sistemas de comunicaciones (sistemas dispersos geográficamente) y mínimas opciones de control. Los SCADA requieren que un operario permanezca al frente del sistema o que visite frecuentemente la ubicación remota [171]. La definición de IEEE [172] establece que los SCADA son sistemas que operan con señales codificadas sobre canales de comunicación a fin de proporcionar control remoto de equipos, obteniendo información sobre el estado de éstos para la visualización o registro de sus funciones. Puede concluirse entonces que los SCADA son sistemas de adquisición de datos y que junto con un operador humano u otro sistema de toma de decisiones, conforman un sistema de supervisión en el sentido de la definición 6.2. (Ver Figura 5.2).

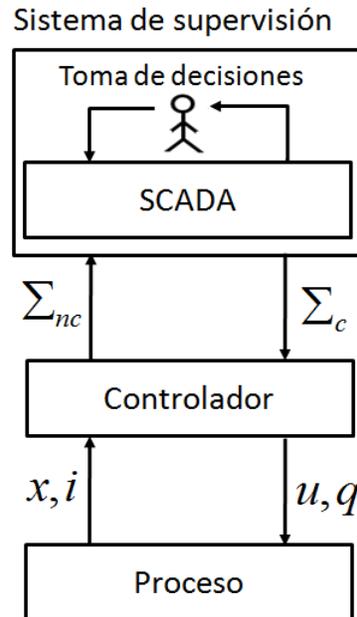


Figura 5.2: SCADA y sistema de supervisión

Definición 5.6 (Monitoreo)

Recolección de datos desde el proceso. Determina el estado actual del sistema controlado y hace inferencias necesarias para producir datos adicionales como históricos o diagnóstico. El monitoreo se limita a la captura de datos del proceso y no tiene acciones directas en los modelos o en la evolución del estado [86, 165, 173–175].

5.1.2. Funciones de supervisión

Las funciones de un sistema de supervisión convencional se agrupan así [176]:

- Funciones asociadas a las acciones sobre controladores locales determinadas por usuarios o sistemas de niveles superiores.
 - Procedimientos de arranque.
 - Procedimientos de parada.

- Selección de modos de operación.
- Cambio de punto de operación.
- Funciones asociadas a la selección y ajuste de leyes de control.
 - Determinación de regiones en las cuales opera el sistema.
 - Selección y conmutación de leyes de control según región de operación y criterios de desempeño esperados.
- Funciones asociadas a la respuesta ante fallas y comportamiento anormal.
 - Detección, diagnóstico, aislamiento de fallas.
 - Determinación de las condiciones de operación anormal.
 - Activación y ejecución de procedimientos de respuesta a situaciones anormales.
 - Activar reconfiguraciones del sistema en caso de falla.
 - Reprogramar la producción.

5.1.3. Supervisión de la dinámica continua

Se aborda en este trabajo una propuesta específica para supervisar sistemas continuos. En este tipo de sistemas, el comportamiento del proceso se puede expresar generalmente mediante ecuaciones diferenciales y las dinámicas continuas son controladas por sistemas de control de variable continua en lazo cerrado.

Un nivel jerárquico superior, generalmente de naturaleza discreta, supervisa las acciones de estos controladores. El sistema de decisiones que supervisa el comportamiento continuo se puede abstraer como un sistema de eventos discretos. Se tienen de esta

forma, sistemas de control y supervisión que combinan dinámicas continuas con dinámicas discretas.

Los sistemas que combinan estas dinámicas se han denominado *sistemas híbridos* [85, 177–180].

Diversas bases formales se han propuesto para el modelar, analizar y controlar estos sistemas: el *autómata híbrido* [180, 181], el *Autómata Global* [89] las *PN híbridas* [95, 182], las *PN con ecuaciones diferenciales* [138, 183, 184].

Específicamente para resolver el problema de supervisión de la dinámica continua, se encuentran propuestas en las que el espacio de estados es particionado en un conjunto de regiones o modos de operación y se hace una proyección de cada uno de estos modos con un estado cualitativo. De esta forma se establece una abstracción discreta de la dinámica continua, tal como lo proponen [85, 88, 164, 185, 186].

Lo que se busca con esta representación es poder aplicar la teoría de control supervisorio para la síntesis del supervisor, teniendo en cuenta que la abstracción de la dinámica continua representa la *planta* en una estructura del control supervisorio.

Cada uno de los modos de operación incluye el controlador de las variables continuas, por lo que la planta continua se denomina *planta controlada*, como se muestra en la Figura 5.3.

La planta continua es en general un sistema no lineal invariante en el tiempo representado mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales de la forma:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t))$$

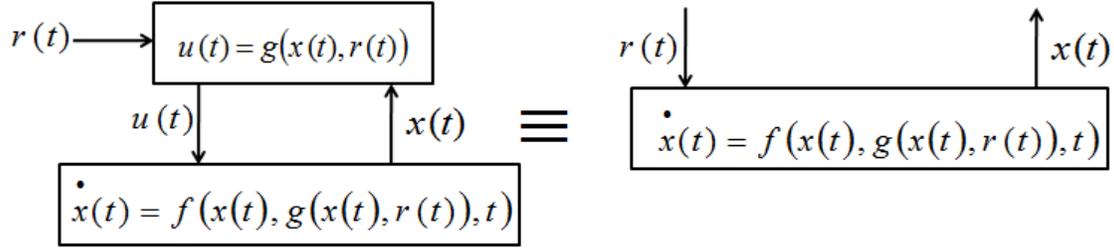


Figura 5.3: Planta continua controlada

Donde $x(t) \in \mathcal{X}$ y $u(t) \in \mathcal{R}$ son los vectores de estado y entrada respectivamente, $t \in \mathcal{R}$ es el tiempo, y $\mathcal{X} \subset \mathbb{R}^n$, $\mathcal{R} \subset \mathbb{R}^m$, con algún intervalo de tiempo $t \in [a, b)$. Para cada $u(t) \in \mathcal{R}$ fijo, la función $f(\cdot, u(t)) : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{X}$ es continua en \mathcal{X} y cumple las condiciones de existencia y singularidad de las soluciones para los estados iniciales, $x_0 \in \mathcal{X}$.

El sistema controlado queda expresado como:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), g(x(t), u(t)), t)$$

Donde $g(x(t), u(t))$ es una ley de control que tiene por objetivo mantener el sistema operando según el comportamiento deseado expresado mediante $u(t)$.

La representación DES se puede realizar mediante redes de Petri, en la que cada lugar tiene asociado un modo de operación y las transiciones entre lugares se dan por las transiciones en los modos. La Figura 5.4 ilustra esta concepción.

La selección de las PN se hace para guardar consistencia con la propuesta de una base formal unificada para representar los comportamientos holónicos. Así mismo, para explotar las ventajas de las PN sobre los autómatas de estados finitos, presentadas en la introducción del capítulo 2. Específicamente para expresar dinámicas continuas mediante PN, se resuelven problemas de no determinismo cuando se utiliza un modelo de conmutación entre regiones de operación [85, 164].

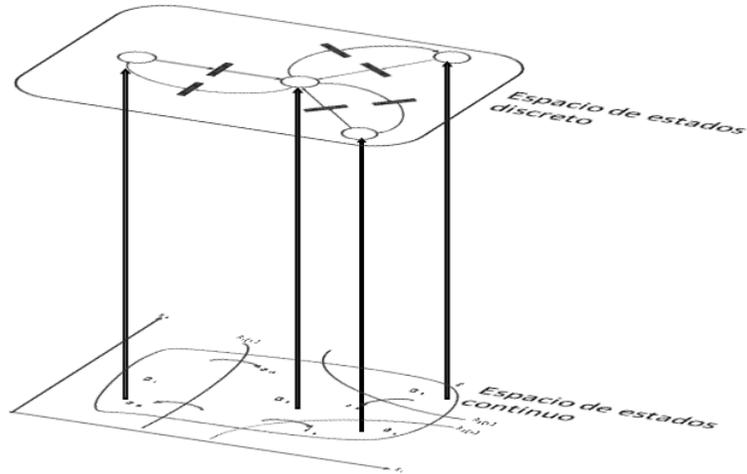


Figura 5.4: Proyección de la dinámica continua

El comportamiento discreto de la planta continua es en general no determinístico, en el sentido que una misma acción de control o evento controlable, puede llevar el sistema continuo a dos estados discretos diferentes.

La síntesis del supervisor expuesta en la sección 2.2.3 se aplica para autómatas determinísticos, por lo que el problema del no determinismo debe ser afrontado de la forma que se realice la construcción de la imagen discreta de la planta.

Una manera, como lo propone Lunze [164], es realizar el modelo discreto mediante PN, dada la posibilidad que ofrece este formalismo para expresar dinámicas no determinísticas. Como se expresó también anteriormente, el árbol de alcanzabilidad de la PN, sobre el que se realiza la síntesis del supervisor, es determinístico.

La propuesta de Antsaklis [85] está basada en la teoría de autómatas y hace una partición del espacio de estados fundamentada en *invariantes naturales* de la planta continua, de tal forma que se obtiene un autómata determinístico.

Para la definición de la base formal mediante redes de Petri, se explica inicialmente el concepto del generador de eventos o *Cuantizador*, en el que también se involucra la partición del espacio de estados continuo.

Partición del espacio de estados continuo

Para la supervisión de la dinámica continua mediante la teoría de control supervisorio, se hace uso de lo presentado en [186], incorporando los conceptos propuestos por An-tsaklis a la supervisión holónica.

El espacio de estados es particionado en un conjunto finito de regiones de operación $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n\}$, (ver Figura 5.5), las cuales están delimitadas por un conjunto de hipersuperficies o de funcionales suaves $\{h_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, i \in I\}$ definidos en el espacio de estados.

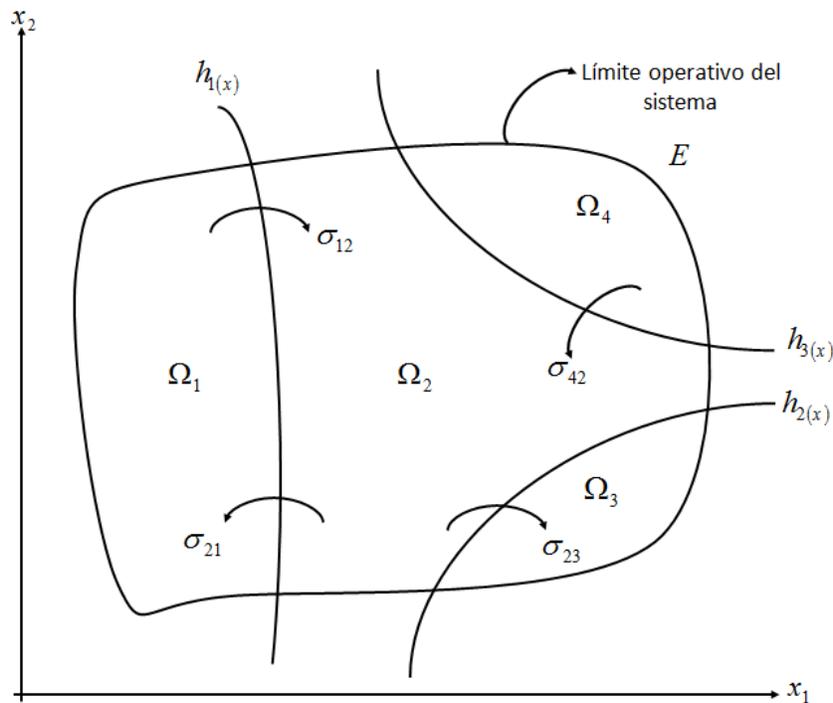


Figura 5.5: Partición del espacio de estados

Un criterio para determinar estas regiones es asociar cada región con cierto comportamiento del sistema, como lo clasifica el supervisor humano. Por ejemplo, según la demanda: “alta”, “media” o “baja”, o según la calidad del producto.

La partición se hace sobre un subconjunto E convexo, abierto y estricto del espacio de estados, cuyas fronteras son los límites operativos del sistema.

También puede hacerse una partición ortogonal como lo propone Lunze en [164].

Las regiones son conjuntos disjuntos, por lo que debe cumplirse que:

$$\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset, \quad i \neq j$$

Y además: $E = \bigcup_{i=1,n} \Omega_i$

Cada funcional debe satisfacer $\nabla_x h_i(\xi) \neq 0, \xi \in \mathcal{N}(h_i)$, lo que asegura que el espacio nulo del funcional $\mathcal{N}(h_i) = \{\xi \in R : h_i(\xi) = 0\}$ forma una hipersuperficie $n - 1$ separando el espacio de estados.

Generador de eventos o cuantizador

Un *cuantizador* que recibe variables de tiempo continuo, genera secuencias de símbolos, los cuales son los eventos no controlables de la planta continua. Estos eventos se determinan mediante el cruce de la variable de estado por las hipersuperficies que separan las regiones de operación.

Las condiciones para generar estos eventos son:

- En el cruce, se cumple que: $h_i(x(t)) = 0$.
- También se cumple que la derivada es distinta de cero: $\frac{d}{dt}h_i(x(t)) \neq 0$.

- Si $h_i(x(t)) = 0$ separa las regiones Ω_i , Ω_j y además $h(x(t)) < 0$ en $x_i \in \Omega_i$; si para algún $x \in \Omega_j$ y una acción u se verifica que $\nabla h(x) \cdot f(u, x) > 0$.
- En $h_i(x(t)) = 0$ se genera el evento σ_{ij} , indicando que el estado cruza en la dirección $\Omega_i \rightarrow \Omega_j$.
- Si $h_i(x(t)) > 0$ debe verificarse que $\nabla h(x) \cdot f(u, x) < 0$.

La Figura 5.5 ilustra la generación de eventos a partir del cruce de las hipersuperficies y en la Figura 5.18 se muestra el diagrama de bloques del *cuantizador* haciendo parte de la arquitectura de *supervisión*.

Redes de Petri con ecuaciones diferenciales

Definidas las regiones o modos de operación mediante la partición del espacio de estados y la generación de eventos por el cruce del estado a través de las hipersuperficies que separan esas regiones, se tienen los elementos para definir un formalismo basado en redes de Petri que permita obtener una abstracción discreta del sistema continuo. La evolución del modelo de eventos discretos en redes de Petri se presenta por el paso del estado continuo entre regiones de operación.

A cada lugar de la PN se le asocia una región de operación en la que el comportamiento de la planta controlada puede ser representado mediante una ecuación diferencial.

Definición 5.7 (Redes de Petri con ecuaciones diferenciales (DPN))

$$DPN = \langle P_h, T, F, X, \Omega, modo, Flow, \Sigma_h, Guard, init, M \rangle$$

Donde:

P_h , es un conjunto de lugares discretos que tienen asociados regiones de operación que se rigen por un conjunto de ecuaciones diferenciales.

T , es un conjunto de transiciones.

F , es un conjunto de arcos, tales que $F \subseteq (P_h \times T) \cup (T \times P_h)$.

$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, es un conjunto de variables de estado, $x \in \mathbb{R}^n$.

$\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m\}$, es un conjunto de regiones de operación.

modo: $P_h \rightarrow \Omega$, es una proyección que asocia cada lugar con una región de operación.

Flow: $\Omega \rightarrow F_i(X, \dot{X}) = 0$, es una asignación de un conjunto de ecuaciones diferenciales de la forma $\dot{x}(t) = f(x(t), g(x(t), x_{ref}))$ a cada región de operación.

$\Sigma_h = \{\sigma_{12}, \sigma_{21}, \dots, \sigma_{ij}\}$, es un conjunto de eventos no controlables de la planta continua, generados por el cruce entre regiones de operación.

Guard: $T \rightarrow \Sigma_h$, es la asignación de un evento a cada transición.

Init $\subseteq \Omega \times X$, son los valores iniciales de las variables continuas.

$M : P_h \rightarrow \{0, 1\}$, es el vector de marcaje que se establece de acuerdo con la permanencia del estado continuo en una región:

$$M(p_{hi}) = \begin{cases} 1 & \text{si } x(t) \text{ esta en } \Omega_i \text{ en el instante } t \\ 0 & \text{lo contrario} \end{cases}$$

La marca se mantiene en un estado cualitativo, mientras el sistema continuo se mantenga dentro de una región de operación.

Así mismo, la secuencia de disparos $M_0[\sigma]M$ de la *DPN*, permite establecer la trayectoria del estado continuo por las regiones [186].

Propiedades de una *DPN*

Las propiedades planteadas para los DES son ahora reformuladas para la representación discreta de la dinámica continua, ya que el comportamiento del modelo en PN está influenciado directamente por la evolución del estado continuo.

El cumplimiento de estas propiedades por parte del sistema híbrido, garantiza el desempeño apropiado para lograr el objetivo de producción establecido.

Las propiedades de *acotamiento*, *seguridad* y *vivacidad* se deben cumplir para la *DPN*, según lo planteado en la sección 2.3.2 y se expresan estrictamente en DES.

Según se estableció en la definición del marcaje, la *DPN* debe ser segura.

La propiedad de la *controlabilidad* se define igual a lo planteado en la sección 2.2.2 y se aplica para el autómata que se genera a partir del *árbol de alcanzabilidad* $R(DPN, M_0)$ para la síntesis del supervisor. Es importante anotar que esta definición se aplica en el espacio de estados discretos, basada en la teoría de lenguajes y difiere, pese a su similitud, de la definición de controlabilidad en el espacio de estados continuo.

Las propiedades de *alcanzabilidad* y *supervisabilidad* vinculan las dinámicas continuas y las dinámicas discretas y se explican a continuación.

Alcanzabilidad

La propiedad de la *alcanzabilidad* se analiza estrictamente sobre la dinámica discreta, sin embargo está relacionada directamente con la dinámica continua y aporta resultados sobre la trayectoria del estado continuo.

Sea la Figura 5.6 una *DPN* que representa la dinámica discreta de un sistema continuo.

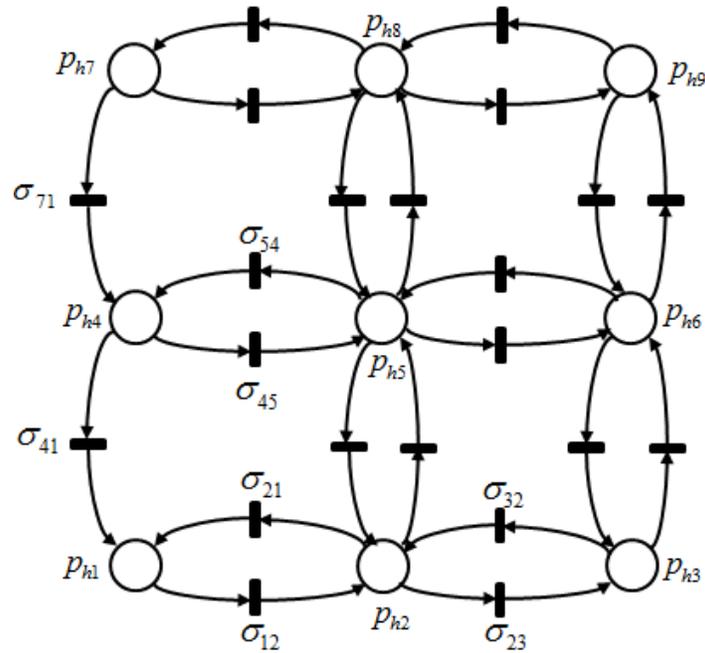


Figura 5.6: *DPN* de un sistema continuo

Según la definición de *alcanzabilidad*, un marcaje es alcanzable si existe una secuencia de eventos, tal que $M_0[\sigma]M$.

En la Figura 5.6, el marcaje $[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ es alcanzable desde el marcaje $[0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ mediante la secuencia de disparos:

$$\sigma_{nc} = \sigma_{45}\sigma_{52}\sigma_{21}$$

Esto indica que el sistema continuo se puede llevar desde la región Ω_4 hasta la región Ω_1 siguiendo la trayectoria:

$$\Omega_4 \rightarrow \Omega_5 \rightarrow \Omega_2 \rightarrow \Omega_1$$

Por la forma como se definió la generación de eventos mediante el cruce por las hipersuperficies, si existe un evento σ_{ij} que indica que el marcaje asociado al lugar p_{hj} es *alcanzable* desde el marcaje asociado al lugar p_{hi} , significa que la variable de estado puede ir de la región Ω_i a la región Ω_j .

Supervisabilidad

La propiedad de la *supervisabilidad* vincula directamente la dinámica discreta del supervisor con la dinámica continua de la planta y diferencia la acción del supervisor de las definiciones de controlabilidad, tanto en el sentido estricto de la controlabilidad en DES como en el sentido estricto de la controlabilidad en CVS. La propiedad también permite establecer que la controlabilidad en DES implica controlabilidad en CVS.

De esta forma, cuando se tiene un sistema continuo *supervisable*, se entiende que se habla de una estructura de control supervisado como la representada en la Figura 5.1.

Definición 5.8 (Sistema Supervisible)

Un sistema es supervisable si existe una secuencia de leyes de control $u(t)$ que actúan sobre la dinámica continua y comandadas por un supervisor discreto, tal que el sistema continuo es llevado desde un estado inicial $x_0(t)$ hasta un estado final $x_f(t)$ en un tiempo t finito.

La SCT provee un marco de referencia teórico que permite expresar de manera simple las funciones de supervisión: arranque, parada, cambio de leyes de control, cambio de puntos de operación, seguir secuencias de apagado bajo falla, ajustar el desempeño

ante operación degradada, no operar en regiones prohibidas, evitar que el estado continuo siga una trayectoria prohibida.

Cada una de estas funciones se expresa mediante las especificaciones de desempeño, las cuales se representan mediante autómatas o mediante redes de Petri.

Para el sistema modelado mediante la *DPN* de la Figura 5.6 se pueden plantear mediante autómatas, las especificaciones estáticas y dinámicas de las figuras 5.7(a) y 5.7(b), en las que se expresan las siguientes acciones de supervisión:

- El arranque: “conducir el sistema desde el estado inicial x_0 en la región Ω_1 hasta un estado de operación x_{op} perteneciente a la región Ω_5 aplicando la secuencia de leyes de control $u_1 u_2$ ” (Figura 5.7(a)).
- Estados y trayectorias prohibidas: “evitar la operación en las regiones Ω_6 y Ω_9 y evitar la trayectoria de la región Ω_2 a la región Ω_3 ” (Figura 5.7(b)).

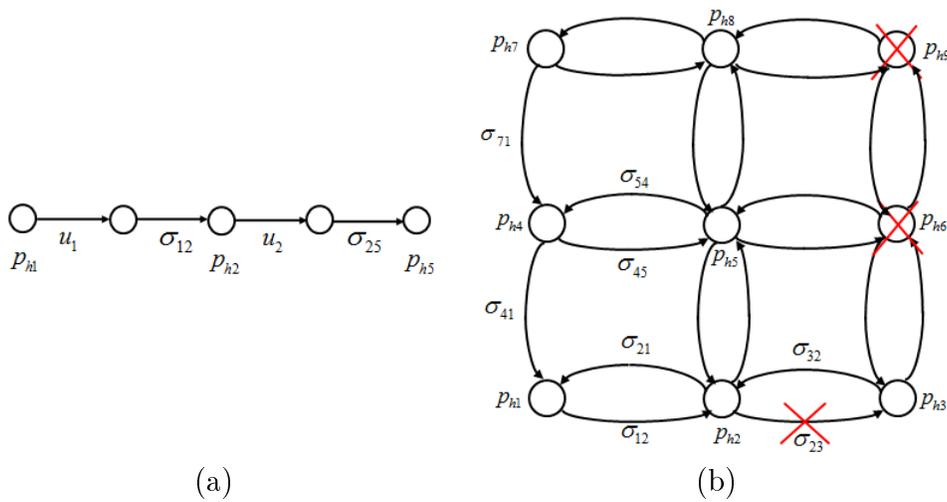


Figura 5.7: Acciones de Supervisión

Una vez se tiene una *DPN* que representa el comportamiento cualitativo de un sistema continuo y los autómatas de las especificaciones, se obtiene el árbol de alcanzabilidad y se sintetiza el supervisor, de acuerdo con lo planteado en la sección 2.3.3. La metodología se ilustra en el caso de estudio del capítulo 6.

5.2. La supervisión desde el paradigma holónico

La supervisión es una función fundamental para llevar los atributos holónicos a un sistema de producción. Esta importancia radica en que una característica clave del paradigma es la descentralización de la toma de decisiones. En la propuesta que se presenta, las decisiones que toma el holón son llevadas a cabo por el *supervisor*

Se presentan a continuación algunas consideraciones de esta propuesta que son fundamentales para relacionar los atributos y características holónicas con la *supervisión*.

5.2.1. Consideraciones de los atributos holónicos

Con respecto a la autonomía

- Para descentralizar la toma de decisiones se propone un esquema de supervisión descentralizado. Cada holón supervisa su dinámica y el cumplimiento de su objetivo de producción. Holones que se agrupan en una holarquía son supervisados por un *supervisor* de la holarquía. Holones y holarquías que se agrupan en una Unidad de Producción Holónica, son supervisados por el *supervisor* de esa Unidad de producción.
- El holón, mediante el *supervisor*, toma decisiones para responder a las perturbaciones sin requerir la intervención de niveles superiores de decisión. La supervisión se convierte en un elemento central de la autonomía del holón, tal como

lo establece la definición de este atributo, mediante el cuál, el holón controla, monitorea y supervisa su comportamiento.

- El intercambio de eventos controlables y no controlables entre los supervisores de las distintas instancias se puede medir. La longitud de la secuencia de eventos controlables que envía un supervisor de orden superior a un *supervisor* de orden inferior, mide las intervenciones del primer *supervisor* sobre el segundo.
- Un holón es más autónomo mientras menos eventos intercambie su *supervisor* con el *supervisor* de orden superior.
- El paradigma holónico contempla que la autonomía del holón no es completa y le impone límites a esa autonomía. Debe estar supeditado a una jerarquía que preserva reglas, restricciones y comportamientos globales. El esquema propuesto permite establecer ese equilibrio entre jerarquía y autonomía. Un holón es autónomo mientras no afecte la misión ni las restricciones operacionales de la holarquía a la que pertenece.

Con respecto a la proactividad

- Para anticiparse a situaciones que pongan en riesgo el cumplimiento de la misión, los sistemas de supervisión holónicos deben estar provistos de mecanismos que permitan detectar fallas incipientes y tomar decisiones que se anticipen a la ocurrencia definitiva de las fallas, que llevan a que el holón salga de operación y se presenten probables incumplimientos de la misión.
- Una vez se detectan estas condiciones, el sistema de supervisión activa mecanismos de tolerancia a fallas, que le permiten al sistema reconfigurarse para atender la nueva condición.
- Si el incumplimiento es inminente se activan los mecanismos de cooperación o

la renegociación de la misión. Los esquemas de diagnóstico predictivo de fallas que se incluyen en la proactividad, generan decisiones del supervisor, en las que el holón ajusta su desempeño para atender la misión, solicita cooperación o la aborta.

Con respecto a la reactividad

Un sistema reactivo se caracteriza por la habilidad que tiene de reaccionar a un estímulo, encontrando una solución admisible, en un tiempo apropiado, considerando la dinámica de su ambiente. Desde los sistemas de eventos discretos, un supervisor será reactivo si permite una solución admisible tras un evento no controlable, en un tiempo apropiado, mientras respeta las especificaciones fijadas por un nivel superior. Puede entonces afirmarse que un supervisor diseñado desde la teoría de control supervisorio es por naturaleza reactivo, en el que por cada evento no controlable, el supervisor genera un evento controlable, con el que se pretende que el sistema permanezca en la trayectoria deseada.

Con respecto a la cooperación

- Vista desde la supervisión, la cooperación incluye decisiones que se le asignan a los holones para que pueden cooperar entre ellos a instancias del supervisor de la unidad de producción holónica. Si dos o más holones pueden manejar entre ellos una perturbación mediante mecanismos de cooperación, la intervención del supervisor de orden superior no se requiere, con lo que se disminuyen también las intervenciones de este.
- La teoría de control supervisorio aporta métodos para sincronizar la cooperación entre holones. La cooperación se establece en los niveles de la holarquía y la unidad de producción holónica, en los que se deben disponer mecanismos para coordinar la cooperación entre varios holones y es ejecutada por el *supervisor* de

la holarquía si la cooperación es entre holones o por el *supervisor* de la unidad de producción holónica si la cooperación es entre holarquías.

5.2.2. Otras características clave del paradigma para la supervisión

Recursividad

Así como el paradigma holónico se construye a partir de unidades autosimilares, cada unidad está dotada de un supervisor que se construye también de manera recursiva, aplicando en cada nivel de profundidad, métodos de síntesis de SCT. Se tiene entonces un supervisor del holón, un supervisor de la holarquía, un supervisor de la UPH y de esa forma consecutivamente hasta el nivel más externo.

Generalización y especialización

El supervisor debe tener componentes generalizadas que se replican de manera idéntica en cada nivel de profundidad y componentes especializadas que dependen de las características de cada nivel y de las particularidades y dinámica del proceso.

El supervisor del holón básico, que supervisa directamente la dinámica del recurso productivo debe diseñarse teniendo en cuenta si esa dinámica es discreta, continua o híbrida. Así mismo, el supervisor de la holarquía o de la UPH ve las dinámicas discretas de los recursos y estados globales de estos, con las dinámicas continuas controladas para el caso de procesos continuos.

Sin sacrificar recursividad, la propuesta de supervisión deberá considerar los aspectos derivados de la especialización y conservar la estructura de diseño desde la SCT.

Reconfigurabilidad

Se entiende por reconfigurabilidad, la capacidad de un sistema de ajustar de manera dinámica, su estructura de producción y las leyes de control ante los cambios que ocurren para forzar modificaciones al plan de producción.

Por su naturaleza, el paradigma holónico posibilita ampliamente la reconfigurabilidad, al disponer de unidades autónomas que se agrupan transitoriamente en holarquías para realizar una misión o para atender perturbaciones. Esta característica exige sistemas de control y supervisión muy flexibles y adaptables, mediante esquemas dinámicos que identifican el estado actual de operación, evalúan el desempeño del control y seleccionan una configuración apropiada y las respectivas leyes de control y supervisión para esas configuraciones. De otro lado, la teoría de Control Tolerante a Fallas (FTC) establece que la forma de tener sistemas tolerantes consiste en dos pasos: el diagnóstico de fallas y el rediseño del sistema de control, que se adapte a la situación de falla, de forma tal que se satisfaga el objetivo del sistema global. En ese sentido, por la reconfigurabilidad del sistema de control, puede afirmarse que los sistemas de producción holónicos son sistemas tolerantes a fallas. Los dos pasos para tener sistemas tolerantes no son llevados a cabo por el control realimentado, sino por el supervisor, que prescribe la estructura de control y selecciona los algoritmos y parámetros para el control realimentado.

La reconfigurabilidad también se manifiesta de modo que por cada holarquía que se forma, se crea de manera dinámica un supervisor. La inteligencia para la reconfigurabilidad del sistema es provista por el supervisor en cada uno de los niveles de profundidad del esquema: holón, holarquía, UPH.

5.2.3. Comparación entre la supervisión convencional y la supervisión holónica

Con base en las características presentadas para el sistema de supervisión de un sistema de producción holónico y las características del enfoque convencional para la supervisión del proceso, se presenta en el Cuadro 5.1 una comparación entre ambos enfoques.

5.2.4. Arquitectura de supervisión bajo el enfoque holónico

La arquitectura propuesta está concebida con unos componentes generalizados que permiten la recursividad en la construcción del *supervisor* y unos componentes especializados que dependen de la dinámica propia del nivel de profundidad de la estructura holónica: holón básico, holarquía, UPH.

Para tomar las decisiones de supervisión generando *eventos controlables*, el *supervisor monitorea* eventos no controlables generados por dos autómatas que representan el estado del recurso y el estado de la misión.

Para establecer los estados de la misión, se establece una comparación entre el avance de la misma y el compromiso adquirido por el holón que está representado en la *agenda*.

El *supervisor* también consulta la *agenda* para generar los eventos controlables relacionados con el arranque, la parada y los cambios de puntos de operación.

Para establecer una nueva ley de control o una nueva configuración se dispone de un autómata G que representa el comportamiento de la planta. Sobre este autómata

El SUPERVISOR CONVENCIONAL	El SUPERVISOR HOLÓNICO
Concentra las decisiones de supervisión sobre el proceso, sin autonomía entregar autonomía a los recursos de producción.	Permite la autonomía a los recursos de producción representados como holones.
No es explícita la incorporación de funciones que se anticipen al incumplimiento de objetivos de producción.	Se anticipa a situaciones que pongan en riesgo el objetivo de producción.
No tiene previstos mecanismos de comunicación entre Unidades de Producción.	La construcción de holarquías se basa en los mecanismos de comunicación entre holones.
Es en general centralizado.	El supervisor holónico se distribuye entre los holones recurso y las holarquías, supervisando su estado y el estado de su misión. Mediante la composición de estos supervisores se construye el supervisor de la UP.
No considera mecanismos de cooperación.	Se basa en la cooperación entre holones y entre UP's.
Las decisiones de supervisión son tomadas fundamentalmente por humanos.	Minimiza la presencia del operador humano [158].
Dispone de funcionalidades para diagnóstico de fallas.	Involucra criterios de control tolerante a fallas.
Se centra en el monitoreo de las variables físicas.	Se centra en el monitoreo de la misión y en sus indicadores de desempeño asociados.
Las relaciones e interacciones entre los niveles de control son rígidas.	Las relaciones e interacciones entre los niveles de control son flexibles. (holarquías).
Estructuras de supervisión y control rígidas.	Es reconfigurable. Genera dinámicamente las estructuras de supervisión y control para cada condición operativa.
Es monolítico.	Es modular.

Cuadro 5.1: Comparación entre los enfoques de supervisión

se aplica la síntesis del supervisor según Ramadge y Wonham [66], para establecer una nueva trayectoria que lleve a un estado final de terminación satisfactoria, como respuesta a una perturbación. Para ello se aplica lo establecido en la sección 2.2.3.

El autómata G es un componente especializado y cambia según el nivel de profundidad del *supervisor* (holón, holarquía, Unidad de Producción). Para el caso del holón básico, que maneja directamente la dinámica continua del proceso, este autómata se

obtiene mediante discretización del espacio de estados continuo, como se explica en la sección 5.4.

Para el caso de una holarquía o la UPH, este autómata es el árbol de alcanzabilidad generado al ejecutar el modelo en PN, según se explicó en el capítulo 3.

Los eventos de falla, operación degradada y probable falla son generados por un diagnosticador de fallas. La Figura 5.8 muestra la arquitectura propuesta y en las secciones siguientes se explica cada uno de los componentes.

Las operaciones del *supervisor holónico*, según se establece en el modelo de la Figura 3.5, son:

- Iniciar el proceso.
- Terminar el proceso.
- Cambiar puntos de operación.
- Seleccionar y conmutar leyes de control.
- Detectar fallas.
- Decidir la salida a mantenimiento del recurso.
- Toma de decisiones para reprogramar la producción.
- Activar mecanismos de respuesta a fallas.
- Activar el esquema de respuesta a las perturbaciones.
- Reconfigurar el sistema.

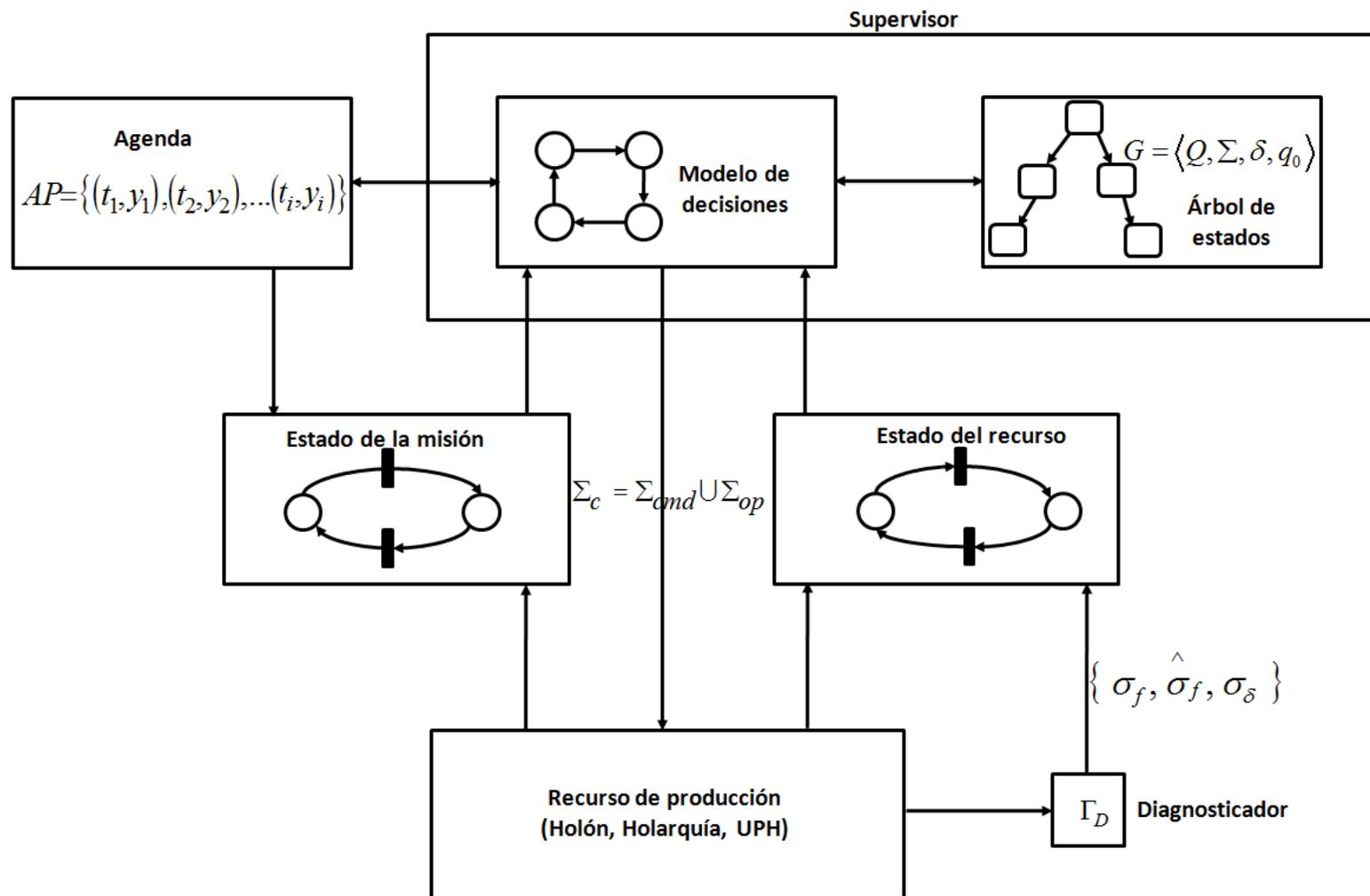


Figura 5.8: Arquitectura de supervisión

Las decisiones de *supervisión* relacionadas con la *reprogramación de la producción* y el esquema de respuesta a perturbaciones se presentaron en detalle en el capítulo 4.

El estado del recurso

En el nivel de decisión del holón, las dinámicas son de eventos discretos y los estados del holón que se deben observar en este nivel son también de naturaleza discreta. Por esta razón, el comportamiento se modela mediante PN. Para definir este modelo, con aplicación específica en sistemas de producción continuos, se tuvieron en cuenta los trabajos presentados en [45, 53, 105, 187–189].

Con base en las decisiones que debe tomar el holón, para garantizar su autonomía y su comportamiento holónico, se determinan los estados que deben ser observados. Estas decisiones están orientadas básicamente a responder a las perturbaciones que afectan la misión. Se definen los siguientes estados:

- Disponible: el holón se encuentra en óptimas condiciones de operación y no tiene misiones asignadas.
- En reserva: el holón no tiene misiones asignadas, pero ha adquirido el compromiso con una UPH de mantenerse en estado disponible.
- En arranque: el holón ha recibido una misión y se dispone a llegar a su punto de operación, para ello ejecuta los procedimientos de arranque, específicos para cada proceso.
- Operación normal: el holón tiene una misión asignada y la adelanta satisfactoriamente, sin problemas de desempeño.
- En secuencia de apagado: el *supervisor* ha generado un comando de apagado, generado por la finalización satisfactoria de la misión o por una situación de falla que ocasiona la parada temporal o definitiva del recurso.

- En operación degradada: se refiere a la condición “*fault*” definida por IEEE [172], en la que se establece que una falla causa un cambio en las características de un componente de forma tal que el modo de operación o el desempeño del componente se da de forma no deseada y lleva al recurso a operar por debajo de su desempeño [190].
- En falla: se refiere a la condición “*failure*” definida por IEEE, en la que se establece que el sistema no está habilitado para cumplir su función.
- En mantenimiento: la ocurrencia de una falla puede llevar el holón a mantenimiento. Generalmente esta decisión es tomada por el operador humano. El holón también se encuentra en este estado cuando se realizan las tareas de mantenimiento preventivo.

El modelo propuesto para representar la dinámica del recurso y establecer su estado se presenta en la Figura 5.9.

<i>Eventos</i>	
σ_{ss}	Fin de secuencia de Arranque
σ_p	Orden de Parada
σ_{sd}	Fin de Secuencia de Apagado
σ_δ	Operación en Modo degradado
σ_f	Falla
σ_μ	Salida a Mantenimiento
$\sigma_{f\mu}$	Fin Mantenimiento
σ_n	Operación Normal
σ_o	Inicio
σ_{et}	Fin Tarea
<i>Estados</i>	
q_d	Disponible
q_s	En Arranque
q_n	En Operación Normal
q_δ	En modo Degradado
q_f	En Falla
q_μ	En Mantenimiento
q_{sd}	En Secuencia de Apagado

Cuadro 5.2: Eventos y estados de la dinámica del recurso

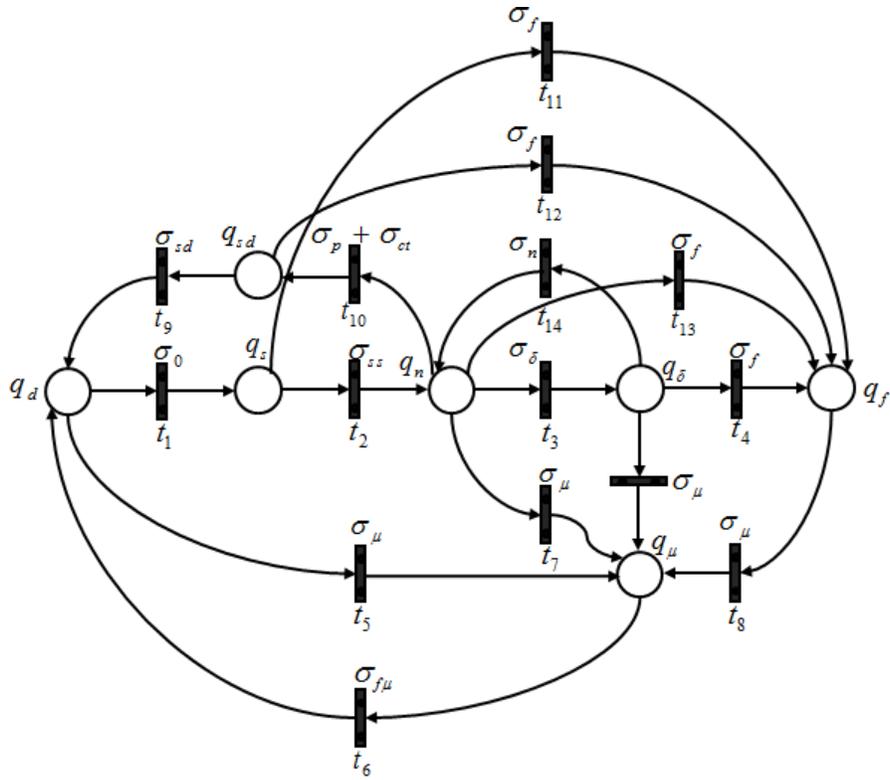


Figura 5.9: Estado del recurso

Este modelo es idéntico en cada nivel de toma de decisiones, sin embargo, la forma de obtenerlo es específica de cada nivel. En el nivel del proceso físico, el estado del holón se establece a partir de los estados observables, tomados directamente de los sensores.

El estado de la misión

El monitoreo del estado de la misión como parte fundamental de la supervisión del holón se ha propuesto en [48, 53, 54, 142, 191–193]. En procesos *batch* se proponen los estados de los elementos procedimentales de una receta [119].

Los compromisos adquiridos por el holón están expresados en su *agenda* y representan la misión del holón. El estado de la misión se construye a partir de la comparación entre la *agenda* y el avance real del objetivo de producción.

Los estados de la misión son:

- Comprometida: la misión ha sido contratada y está pendiente de su inicio.
- Avance normal: la misión avanza satisfactoriamente.
- Desviada: la misión presenta una variación porcentual que debe ser corregida tomando acciones de control.
- En riesgo: una pérdida de capacidad del holón pone en riesgo la misión para valores futuros comprometidos que están por encima de la capacidad.
- Abortada: estado ocasionado por una falla definitiva del recurso o una cancelación de la misión ordenada por un nivel superior.
- Incumplimiento: la desviación permanente en la misión o una condición de falla llevan al estado de incumplimiento.
- Renegociada : el holón no puede cumplir y solicita renegociación de la misión.

El modelo del estado de la misión se ilustra en la Figura 5.10.

Mediante un *generador* de eventos se comparan la *agenda* del holón y el avance real de la misión, las cuales son entradas al *generador*. Adicionalmente se ingresa también la capacidad actual del recurso, la que permite establecer el evento de probable incumplimiento cuando el recurso está en operación degradada.

El diagrama de bloques del generador de eventos de la misión se muestra en la Figura 5.11.

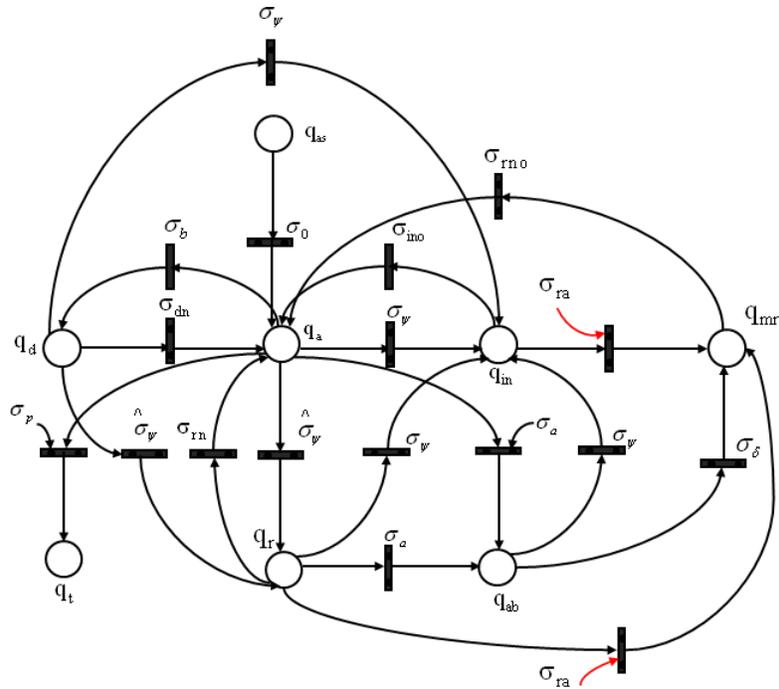


Figura 5.10: Estado de la misión

Estado	Descripción
q_a	En avance normal.
q_{as}	Asignada.
q_r	En Riesgo.
q_d	Desviada.
q_{in}	Incumplimiento.
q_{mr}	Renegociada.
q_t	Terminada.
q_{ab}	Abortada.
Evento	Descripción
σ_0	Inicio.
σ_{dn}	Desviada a normal.
σ_{ψ}	Incumplimiento.
$\hat{\sigma}_{\psi}$	Probable incumplimiento.
σ_{ra}	Renegociación autorizada.
σ_p	Finalizada.
σ_r	Renegociar.
σ_a	Abortar misión.
σ_{δ}	Operación degradada.
σ_{rn}	Riesgo a normal.
σ_{ino}	Incumplimiento a normal.
σ_{rno}	Renegociación a normal.
σ_b	Desvío

Cuadro 5.3: Notación estado de la misión

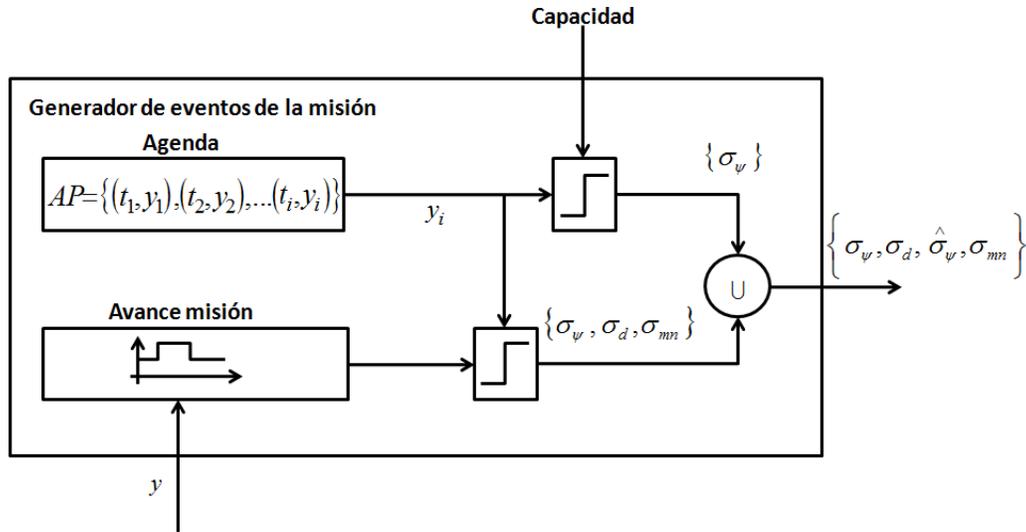


Figura 5.11: Generador de eventos de la misión

Los eventos que genera son:

σ_d desviada.

σ_{mn} avance normal.

σ_ψ incumplimiento.

$\hat{\sigma}_\psi$ probable incumplimiento.

De la *agenda* también se generan los comandos relacionados con la misión: arranque, parada, cambios de punto de operación, los cuales forman el conjunto de eventos controlables $\Sigma_{cmd} \subseteq \Sigma_c$.

$\Sigma_{cmd} = \{\sigma_o, \sigma_p, \sigma_i\}$, donde:

σ_o , es el comando de arranque del proceso.

σ_p , es el comando de parada.

σ_i , es el i -ésimo evento para cambio de punto de operación.

El conjunto de comandos se completa con los eventos controlables relacionados con las decisiones de reprogramación de la producción y el cambio de leyes de control, con lo que el conjunto completo de comandos del supervisor es:

$\Sigma_{cmd} = \{\sigma_o, \sigma_p, \sigma_i, \sigma_l, \sigma_r, \sigma_{ns}, \sigma_{sr}\}$, donde:

σ_l , cambio en la ley de control.

σ_r , activar mecanismo de renegociación.

σ_{sr} , solicitud renegociar misión.

σ_{ns} , nueva agenda.

En el diagrama temporal de la Figura 5.12 se ilustra la generación de los eventos de la misión.

En el instante t_0 se inicia la ejecución de la misión, para lo cual se genera el evento σ_0 . El estado de la misión evoluciona desde el estado “comprometida” hacia el estado “avance normal”. En t_1 la misión permanece en ese estado.

En los instantes t_2 , t_3 y t_4 se presentan cambios en la misión y se generan los respectivos eventos. La misión permanece en avance normal.

En t_5 se presenta una desviación en la misión, acompañada por una decisión en un instante posterior, que intenta compensar la desviación cambiando el punto de operación. Esta acción permite llevar la misión al estado de avance normal en el instante t_6 .

Más adelante, en t_7 se presenta una pérdida de capacidad que puede generar un incumplimiento en t_8 , lo que lleva la misión al estado de “riesgo”. Este incumplimiento finalmente se presenta y el holón debe abortar la misión porque no es capaz de cumplir o porque no es posible la cooperación.

El diagnosticador

El diagnóstico de fallas es una función trascendental para la supervisión de procesos desde el enfoque holónico. Para mejorar los tiempos de respuesta ante perturbaciones, debe dotarse al supervisor de mecanismos para la rápida detección de las fallas. La capacidad para el diagnóstico de fallas hace parte de la componente reactiva del holón, pero si se dota al diagnosticador de mecanismos de diagnóstico predictivo, también contribuye con el atributo de la proactividad.

En el nivel de proceso, en el que se tiene la dinámica continua, los procedimientos de detección consisten en la comparación entre el comportamiento actual del proceso y el comportamiento teórico dado por el modelo, mediante la generación de residuales, (ver Figura 5.13). Para tal fin, el diagnosticador recibe las variables de estado y señales binarias provenientes de sensores que detectan directamente fallas y entrega los eventos de falla y operación degradada, como se indica en la Figura 5.13. Si el diagnosticador dispone de funciones predictivas, entrega eventos de probable falla, las cuales son generadas mediante las reglas o modelos del diagnóstico.

En la Figura 5.13, el módulo de reglas o modelos de diagnóstico, recibe las señales de falla de sensores binarios, mediante las entradas i , los valores $r(t)$ de referencia, los valores de salida $u(t)$ y los residuales $\tilde{y}(t)$.

Con base en estas entradas y en los modelos de diagnóstico, el diagnosticador entrega el conjunto de eventos de falla $\{\sigma_f, \sigma_\delta, \hat{\sigma}_f\}$

De acuerdo con el conocimiento que se tenga y la calidad de los datos disponibles suministrados por el proceso bajo supervisión, los métodos para monitorear el comportamiento están basados en dos concepciones: basados en modelo y no-basados en modelo.

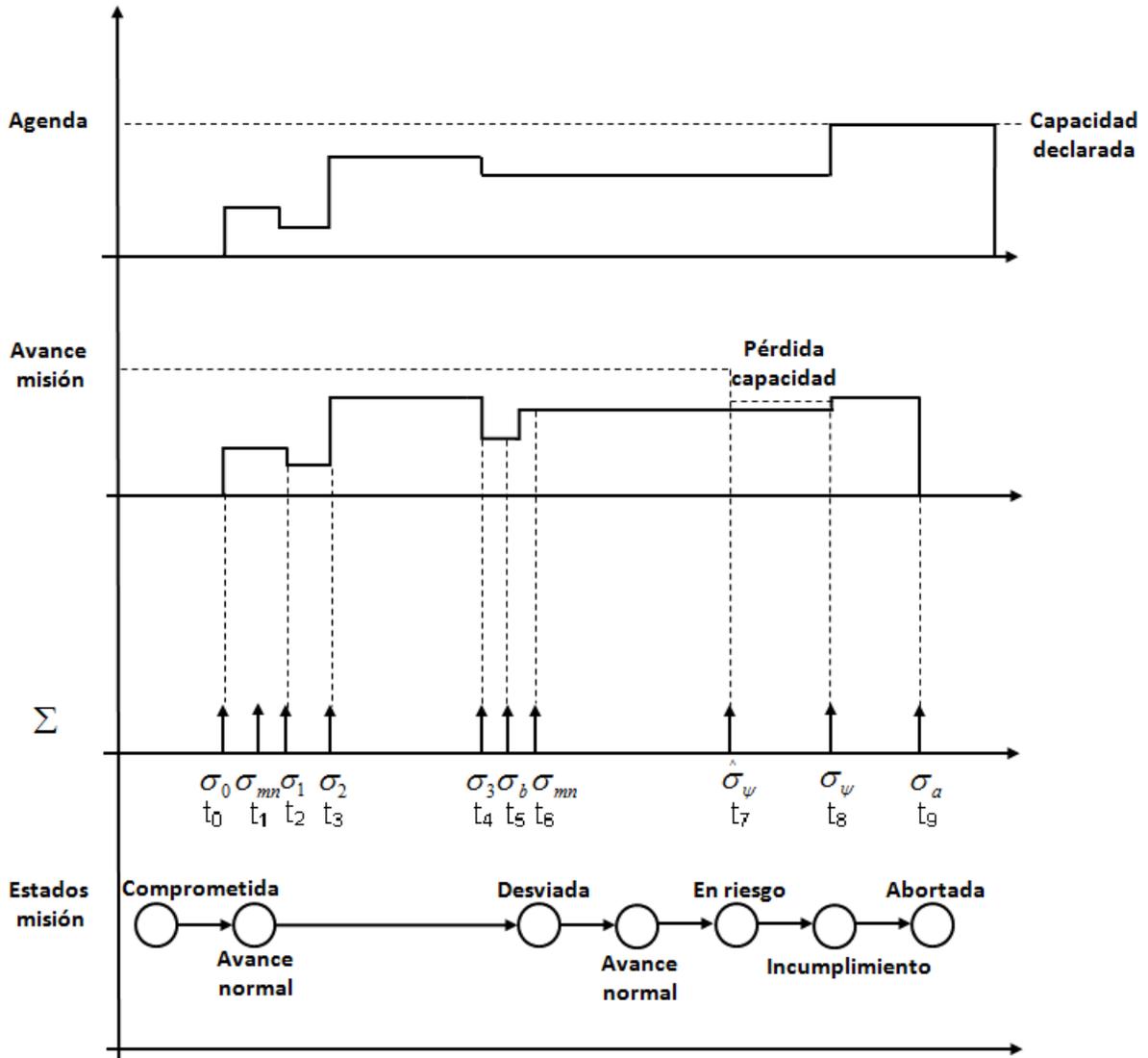


Figura 5.12: Secuencia de eventos de la misión

Los métodos basados en modelo se clasifican en dos: basados en modelos cuantitativos y basados en modelos cualitativos. Los métodos cualitativos incluyen análisis estructural y funcional (SADT), análisis de árbol de fallas, grafos causales temporales, Grafos Dirigidos Signados (SDG), modelos *Bond Graph* (BG) cualitativos, entre otros.

*

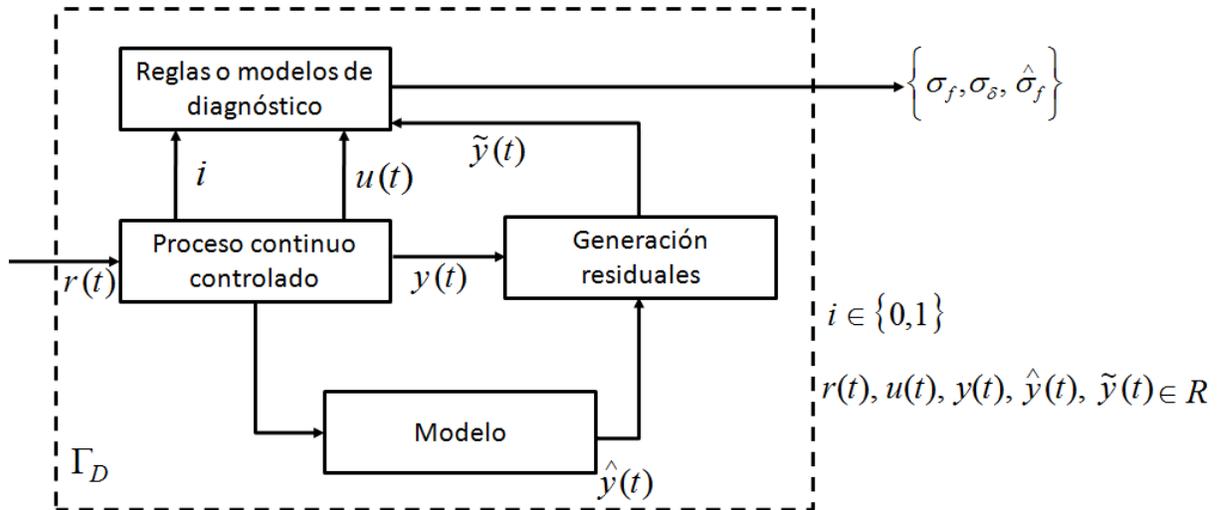


Figura 5.13: Diagrama de bloques diagnosticador

Dentro de los métodos cuantitativos se incluyen: diagnóstico basada en observadores, espacios de paridad y filtro de Kalman extendido.

Para el diagnóstico de fallas se siguen dos pasos: primero se encuentran las posibles inconsistencias entre el modelo del proceso y su comportamiento. Estas discrepancias se han denominado residuales (ver Figura 5.13) y son señales artificiales resultantes de la comparación. El segundo paso es el procedimiento de decisión, que permite localizar y aislar la falla y en lo posible, localizar su origen.

Otras técnicas hacen el modelamiento de la planta, usando *Hybrid Bond Graph*. Se desarrolla un observador híbrido que se usa para el seguimiento del comportamiento del sistema. Se usan dos métodos para detección de fallas: el primero, basado en modelos híbridos que usan el observador híbrido, técnicas de razonamiento cualitativo y estimación de parámetros en tiempo real. El segundo, es un modelo DES abstracto del sistema que muestra relaciones causales y temporales entre los modos de falla y las correspondientes observaciones abstractas.

El controlador del sistema continuo, modelado como una máquina de estados finitos extendida, es usado para generar eventos discretos que causan reconfiguraciones en los modelos BG basados en la energía de la planta.

Un observador híbrido estima los estados de las dinámicas continuas y detecta transiciones de modo. Sofisticados métodos de análisis y filtrado de señales enlazados con los observadores híbridos son utilizados para detectar desviaciones del comportamiento nominal y disparan los esquemas de despeje de fallas.

Existen técnicas estándar para construir modelos BG de sistemas basados en principios físicos. Las ecuaciones de estado pueden ser derivadas sistemáticamente desde la representación BG. Grafos temporales causales (modelos para diagnóstico cuantitativo), pueden ser producidos desde BG. Una versión extendida, HBG se usa para modelar posibles transiciones discretas en el comportamiento del sistema.

Según [86] los métodos de supervisión avanzada y diagnóstico de fallas deben satisfacer los siguientes requerimientos:

- Detección temprana de pequeñas fallas con comportamientos temporales abruptos o incipientes.
- Diagnóstico de fallas en actuadores, componentes del proceso o sensores.
- Detección de fallas en lazo cerrado.
- Supervisión del proceso en estados transitorios.

En los trabajos de Montmain J, Gentil, S [147], se aborda el problema del diagnóstico desde el razonamiento causal, que tiene que ver con el análisis del comportamiento del

sistema en términos de relaciones causa-efecto entre entidades, por ejemplo, variables y alarmas.

Una estructura causal es una descripción abstracta de la influencia que algunas variables tienen en otras. El comportamiento de cualquier dispositivo puede ser parcialmente descrito por un grafo causal, representando relaciones funcionales directas entre variables y conceptos más complejos, como síntomas o fallas. La transcripción de modelos de comportamiento mediante grafos causales directos, es una forma natural de conciliar los enfoques de la inteligencia artificial y la teoría de control. En el grafo, los nodos son las variables y los arcos representan las relaciones causales entre ellas. El principio implícito es que esta estructura suministra una herramienta conceptual para razonar sobre la forma como los comportamientos anormales se propagan en una planta.

La propuesta de control tolerante de Blanke [136,190] específicamente para el diagnóstico de fallas, propone una arquitectura conformada por un bloque de diagnóstico y un bloque de rediseño del controlador. El bloque de diagnóstico proporciona información sobre la existencia de fallas y sus características, usando mediciones de las entradas y las salidas y comprueba que estos datos sean consistentes con el modelo de la planta. El problema de diagnóstico debe ser resuelto bajo restricciones de tiempo real, mediante la explotación de la información incluida en el modelo dinámico y la evolución temporal de las señales. En el control tolerante, tanto la localización como la magnitud de la falla son importantes.

En [149] se introduce el análisis estructural como una herramienta útil para diseñar sistemas de diagnóstico, el cual tiene en cuenta las medidas disponibles y las fallas que se quieren diagnosticar. Se analizan las características estructurales del modelo

que son independientes del valor de los parámetros. Este análisis permite identificar aquellos componentes que se pueden monitorear, obtener relaciones de redundancia analítica que permitirán la detección de fallas e identificar posibles mecanismos de tolerancia.

El control tolerante a fallas combina técnicas de diagnóstico de fallas con control supervisorio, para lograr sistemas que de manera autónoma se ajustan ante la ocurrencia de fallas.

En el nivel de la holarquía o de la UPH, el estado de falla se establece mediante la composición de los estados de falla de los holones, como se muestra en el modelo de PN de la Figura 5.14.

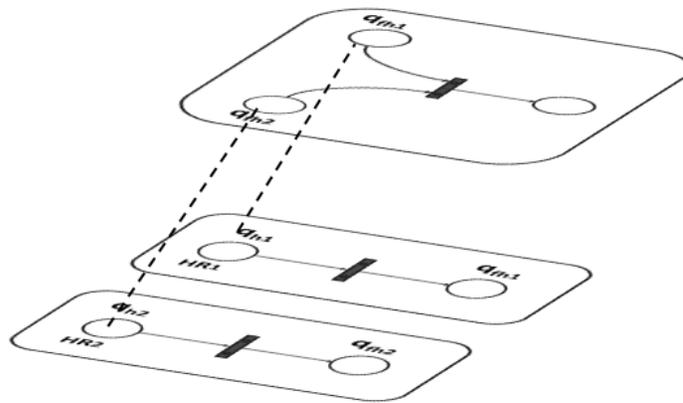


Figura 5.14: Modelo PN del estado de falla de una holarquía

El evento de operación degradada se genera mediante la comparación de la capacidad actual de la holarquía y un valor pre establecido, por debajo del cual se define la condición degradada de la holarquía.

5.2.5. Supervisión de la dinámica continua del holón básico

El límite de profundidad para descomponer una UPH en holones es el holón básico u holón atómico.

Para definir este holón, se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- El holón básico puede a su vez definirse como una UPH: entrega un producto y tiene autonomía en su estructura de control.
- Está en capacidad de negociar su misión.
- No se descompone en más holones.

En un proceso de producción continuo ese límite lo establece el recurso de producción que maneja la dinámica continua. Por ejemplo, en este tipo de procesos, el holón básico puede ser un reactor, una torre de destilación, una turbina, un generador, un compresor, una caldera pirotubular.

En el modelo de *supervisión* que se presenta, se propone que las dinámicas continuas sean manejadas por el holón básico. En este sentido, el holón básico se dota de la estructura de control para controlar las dinámicas continuas y de un *supervisor*, que supervisa su comportamiento, en un esquema de *control supervisado* como el presentado en la Figura 5.1, pero teniendo en cuenta que el esquema es descentralizado. En la Figura 5.15 se representa la estructura propuesta para el holón básico y en las figuras 5.16 y 5.17 se compara el modelo de *supervisión* holónico descentralizado con un modelo centralizado convencional.

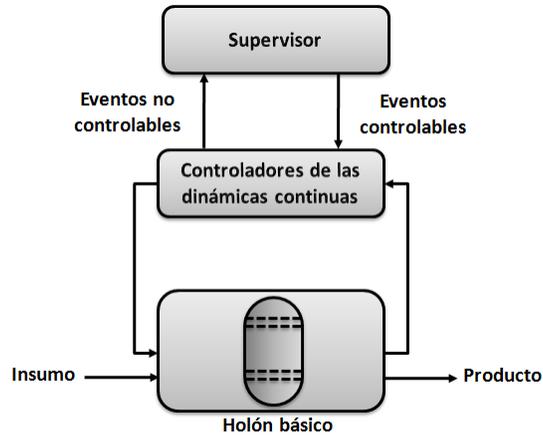


Figura 5.15: Propuesta de *supervisión* para un holón básico

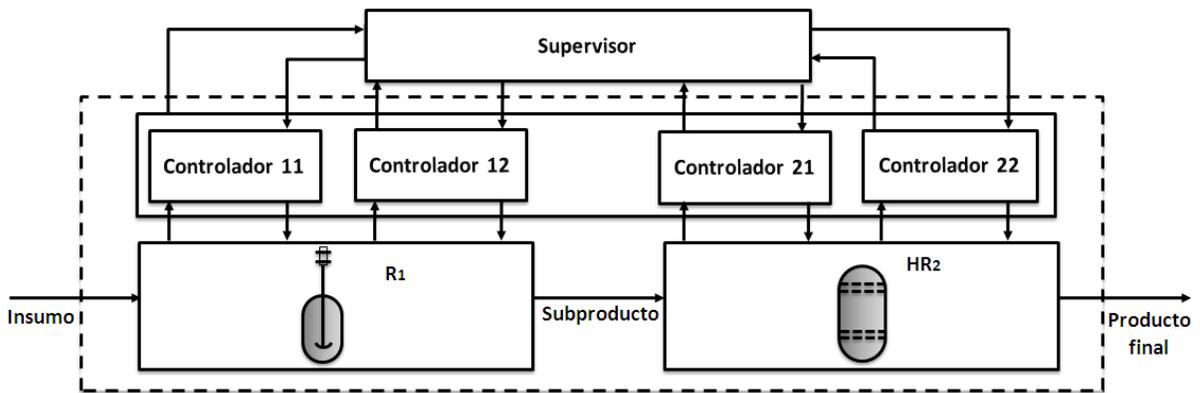


Figura 5.16: Esquema de *supervisión* centralizado

Si se parte de la estructura generalizada de *supervisión* presentada en la Figura 5.8, la propuesta especializada para el holón básico, considerando las dinámicas continuas se muestra en la Figura 5.18.

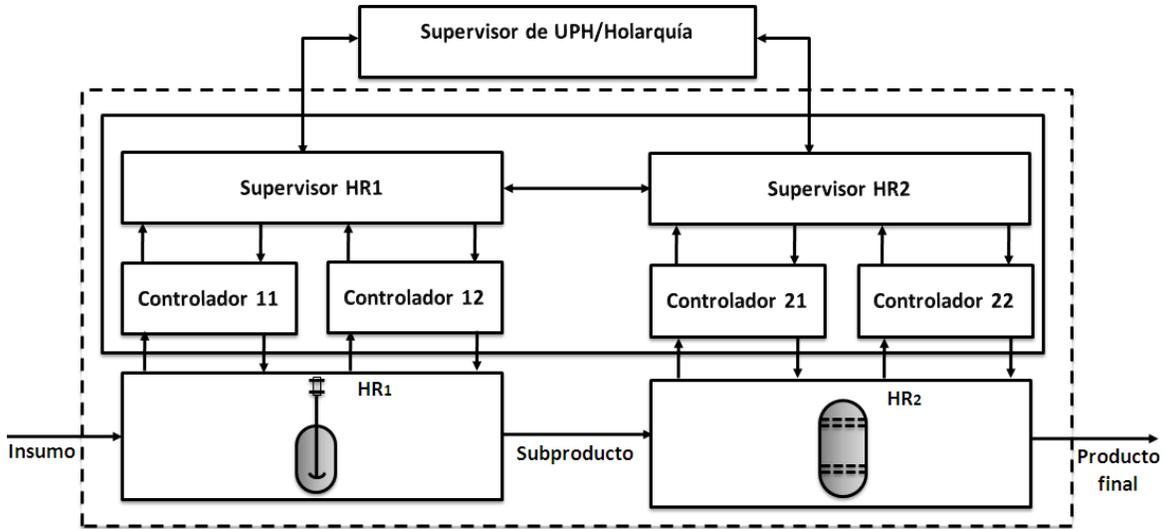


Figura 5.17: Esquema de *supervisión* distribuido

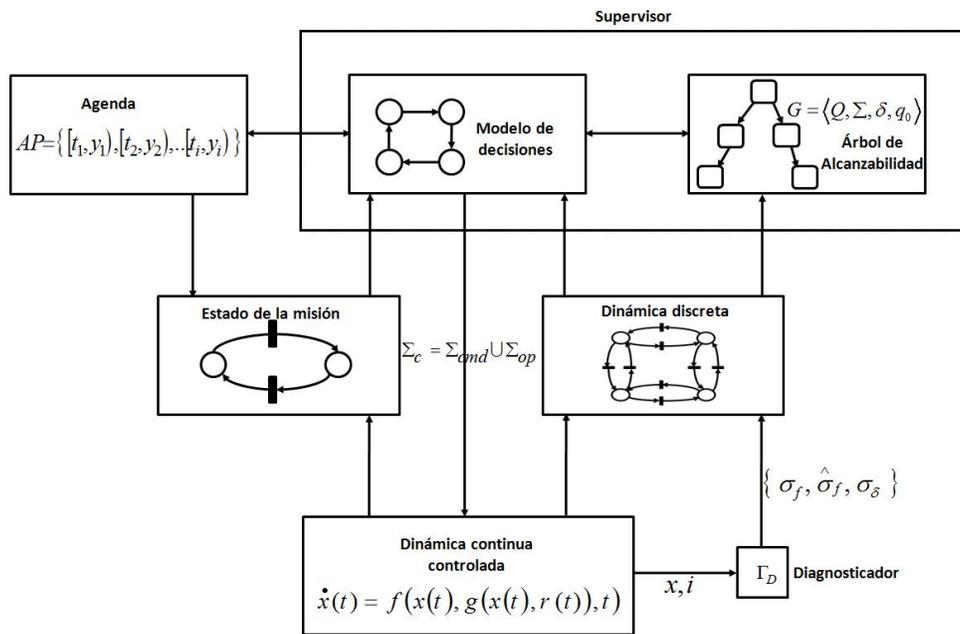


Figura 5.18: Estructura de *supervisión* para el holón básico

5.3. Métricas de los atributos holónicos desde la supervisión

La concepción de la propuesta presentada para la supervisión de sistemas holónicos, aporta el establecimiento de métricas para los atributos del paradigma. Estas métri-

cas se basan en las secuencias de eventos, tanto controlables como no controlables y en el espacio de estados discreto, como se explica a continuación.

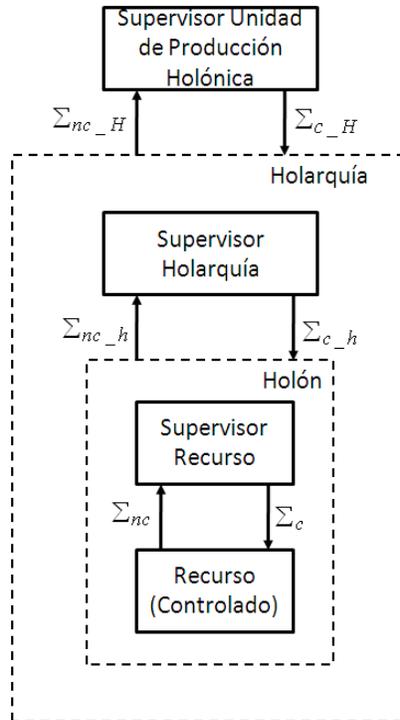


Figura 5.19: Propagación de eventos

Para la representación simbólica se tiene en cuenta la Figura 5.19, en la que se indica la propagación de eventos entre cada uno de los niveles de profundidad de la estructura holónica.

De acuerdo con la Figura 5.19 se tiene:

Σ_{nc_hi} , conjunto de eventos no controlables del holón i .

Σ_{c_hi} , conjunto de eventos controlables del holón i .

Σ_{nc_Hi} , conjunto de eventos no controlables de la Holarquía i .

Σ_{c_Hi} , conjunto de eventos controlables de la Holarquía i .

Σ_{nc_UPHi} , conjunto de eventos no controlables de la UPH i.

Σ_{c_UPHi} , conjunto de eventos controlables de la UPH i.

S_{nc_*} , secuencia de eventos no controlables (*=holón i, Holarquía i ó UPH i).

S_{c_*} , secuencia de eventos controlables (*=holón i, Holarquía i ó UPH i).

$|S_{nc_*}|$, longitud secuencia de eventos no controlables.

$|S_{c_*}|$, longitud secuencia de eventos controlables.

5.3.1. Métricas para la autonomía

Partiendo de la definición de autonomía presentada en la sección 1.2 y el análisis de los atributos de la sección 6.2.1, se presenta una definición para la autonomía, considerando conceptos de la teoría de control supervisorio expresados en este trabajo. Esta definición aporta igualmente métricas para determinar si un sistema tiene o no el atributo.

Sean dos sistemas como los mostrados en la Figura 5.20, subordinados a una entidad supervisora de nivel jerárquico superior. Cada sistema está relacionado con su supervisor mediante secuencias de eventos pertenecientes a los conjuntos Σ_{nc} y Σ_c .

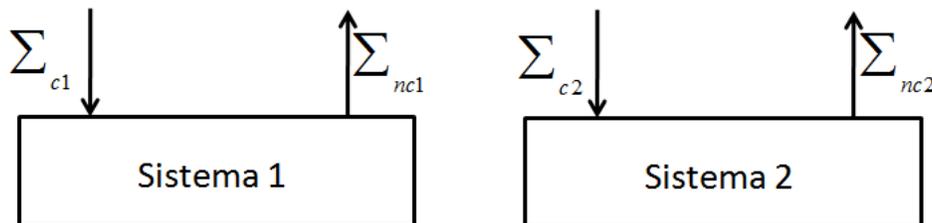


Figura 5.20: Sistemas supervisados

El intercambio de eventos entre un sistema y su supervisor es un indicador del grado de autonomía que tiene el sistema, siendo éste más autónomo en tanto menos eventos controlables y no controlables intercambie con su supervisor.

Si ante la presencia de una perturbación, el holón la resuelve sin propagar la falla hacia el supervisor de la holarquía y no presenta incumplimiento, significa que el holón hizo uso de la autonomía y resolvió la perturbación.

La métrica que refleja este comportamiento autónomo se puede expresar como sigue:

Sea t el instante de tiempo en el que se presenta una perturbación.

Si en t : $\sigma_\delta\sigma_f \neq \epsilon \wedge |S_{nc_hi}| = 0 \wedge \sigma_\delta\sigma_f\sigma_\psi = \sigma_\delta\sigma_f$

implica que el holón resolvió la falla de manera autónoma.

La autonomía entre dos sistemas se puede establecer mediante comparación, formulando la siguiente métrica:

Un sistema supervisado S_1 es más autónomo que un sistema supervisado S_2 , si:

$$|S_{nc1}| + |S_{c1}| < |S_{nc2}| + |S_{c2}|$$

De acuerdo con esta definición, se establece:

- La expresión $|S_{nci}| + |S_{ci}|$ reúne las intervenciones del supervisor sobre el sistema supervisado.
- En un sistema autónomo, los eventos tanto controlables como no controlables se confinan al interior del sistema, y son manejados por su estructura de control y supervisión interna.

- Un sistema es completamente autónomo si $|S_{nci}| + |S_{ci}| = 0$. Es decir, no tiene una estructura de supervisión que restrinja su comportamiento.
- En un esquema centralizado, todos los eventos no controlables que el sistema genera son llevados al supervisor. En un esquema holónico sólo se generan eventos no controlables hacia el supervisor superior, si el holón no está en capacidad de manejar la perturbación.
- Como resultado, en un esquema de supervisión bajo la concepción holónica se minimizan las intervenciones del supervisor de la UPH y comparado con el supervisor de una estructura centralizada, el número de intervenciones es menor.

5.3.2. Métrica para la cooperación

Dos holones cooperan si pertenecen a una holarquía o una UPH. Si uno de ellos no es capaz de atender una perturbación, acude a la holarquía para solicitar cooperación. En el esquema que se propone en este trabajo, la cooperación entre dos holones es coordinada por el supervisor de la holarquía o por el supervisor de la UPH y la cooperación entre holarquías es coordinada por el supervisor de la UPH.

Si ante la ocurrencia de una falla o un evento de operación degradada, el holón fallado no es capaz de atenderla, transmite un evento de falla al supervisor de la holarquía, el cual activa el mecanismo de respuesta a perturbaciones. Si el evento de falla no se propaga hacia la UPH y no se genera incumplimiento debido a esa falla, significa que la perturbación se resolvió internamente mediante cooperación.

Por la recursividad del esquema, aplica el razonamiento análogo para la cooperación entre holarquías, coordinada por el supervisor de la UPH, evitando que se propaguen los eventos de falla por fuera de la UPH.

Según lo expresado, la métrica para la cooperación se puede plantear así:

Sea t un instante de tiempo en el que se presenta una perturbación.

Si en t : $\sigma_\delta\sigma_f \neq \epsilon \wedge |S_{nc_hi}| \neq 0 \wedge |S_{nc_Hi}| = 0 \wedge \sigma_\delta\sigma_f\sigma_\psi = \sigma_\delta\sigma_f$

Implica que la falla no fue resuelta por el holón, pero fue resuelta por la holarquía mediante cooperación.

Se puede plantear una métrica alternativa para la cooperación, teniendo en cuenta los eventos de “activación del mecanismo de renegociación (σ_r)” y “reprogramar agendas (σ_{ns})”.

Si ante un evento de falla o de operación degradada se presenta la secuencia $S = \sigma_r\sigma_{ns}$ y la perturbación no se propaga por fuera del nivel de decisión que la atiende, implica que se resuelve mediante cooperación.

Es importante anotar que la cooperación incrementa la autonomía de la holarquía o de la UPH, debido a que reduce la propagación de eventos de falla y en consecuencia, reduce las intervenciones del supervisor de orden superior.

5.3.3. Métrica para la proactividad

El único comportamiento proactivo que se aborda en este trabajo es la generación de un evento por parte del holón que se adelanta a incumplimientos si se presenta una falla o una condición de operación degradada.

Si ante una falla o condición degradada que a futuro va a generar incumplimiento, el holón reacciona de manera anticipada y evita dicho incumplimiento, se concluye que el holón es proactivo.

La métrica se puede establecer como sigue, teniendo como base la notación y eventos que se muestran en la Figura 5.21.

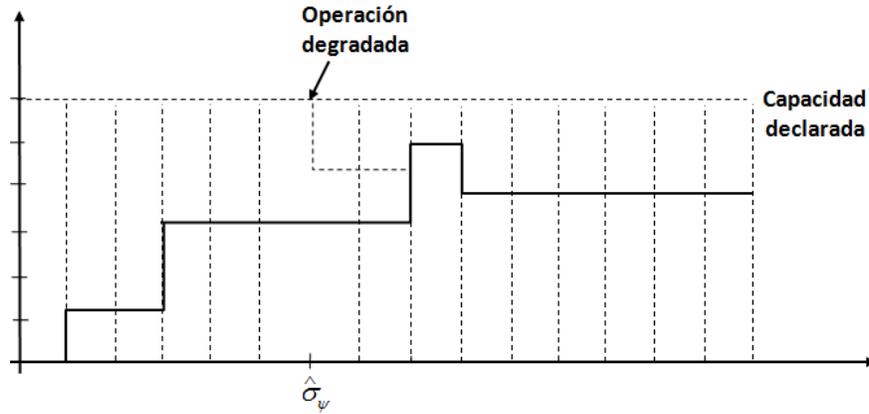


Figura 5.21: Evento de probable incumplimiento

Si en un instante de tiempo t : $\sigma_\delta \sigma_f \neq \epsilon$ y en $t_a > t, y_i < K_\delta$ con K_δ , capacidad degradada y si en $(t + \Delta t) < t_a, \Delta t \rightarrow 0$: $\hat{\sigma}_\psi \neq \epsilon$ y en t_a : $\sigma_\psi = \epsilon$

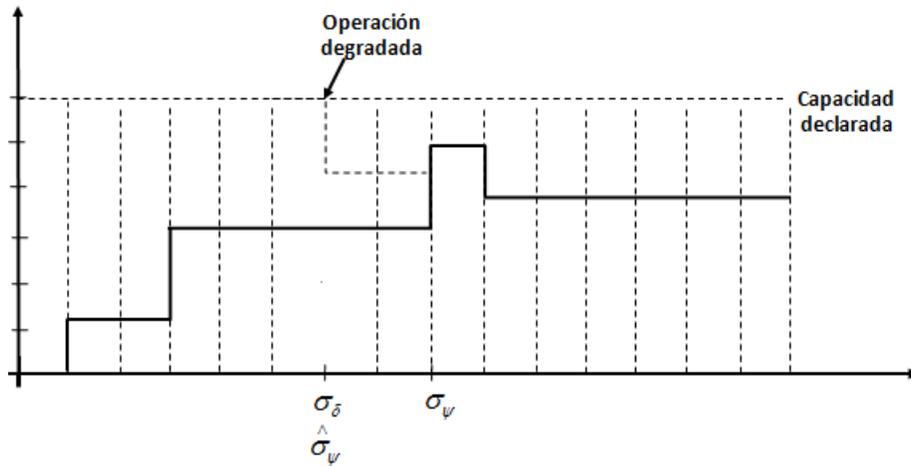
Implica que ante un probable incumplimiento, el holón actuó de manera proactiva y lo evitó.

Ante un evento de probable incumplimiento, el supervisor del holón responde generando un evento de solicitud de renegociación.

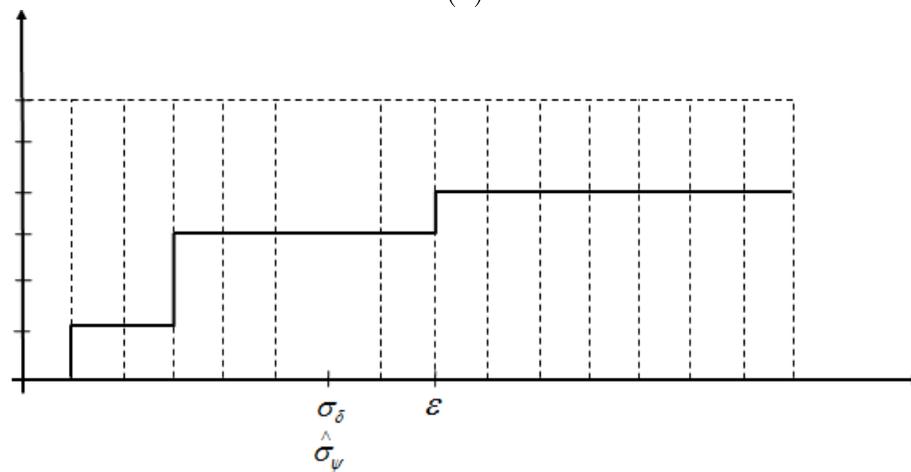
En la Figura 5.22(a) se muestra una situación de operación degradada con incumplimiento y en la Figura 5.22(b) con respuesta proactiva con cambios en la agenda del holón para evitar incumplimientos renegociando la misión anticipadamente.

5.3.4. Reactividad

Como se planteó en la sección 6.2.1, un supervisor diseñado desde la teoría de control supervisorio es por naturaleza reactivo. Por cada evento no controlable, el supervisor



(a)



(b)

Figura 5.22: Operación degradada

genera un evento controlable, con el que se pretende que el sistema permanezca en la trayectoria deseada.

Para verificar el atributo se establece entonces que:

Si en un instante t : S_{sup} es la secuencia de eventos del supervisor, $S_{sup} = abcde$ y $e \in \Sigma_{nc}$ y si en $t + \Delta t$: $S_{sup} = abcdef$, con $f \neq \epsilon$, $f \in \Sigma_c$, $\Delta t \rightarrow 0$

Implica que el supervisor genera un evento controlable por cada evento no controlable y en consecuencia, el sistema es reactivo.

Aportes en supervisión

Se ha presentado una propuesta para la supervisión de sistemas de producción continuos desde un enfoque holónico, con las siguientes características:

- El esquema es descentralizado. La toma de decisiones se descentraliza y se lleva hasta los holones básicos que forman una Unidad de producción. De esta forma se hace una contribución para mejorar los tiempos de respuesta, ya que el holón no requiere autorizaciones de entidades de orden superior para manejar las perturbaciones que está en condiciones de atender, tal como lo establece el paradigma holónico.
- Para cumplir con criterios globales de comportamiento y respetar restricciones operacionales que afectan a otros holones, se considera una componente jerárquica en la supervisión, también establecida por el paradigma. Las decisiones de un holón que afectan a otros miembros de una holarquía, son supervisadas por el supervisor de la holarquía. De manera análoga, las decisiones de holarquías que afectan a la Unidad de producción son tomadas por el supervisor de la UPH. El supervisor de las holarquías y de la Unidad de producción se construyen de manera recursiva, a partir de la estructura básica propuesta.
- Como aporte, la propuesta incorpora en la supervisión el concepto de *agenda*, como elemento central de la autonomía del holón. El holón toma decisiones según el estado de su misión representada en la *agenda*. Para establecer el estado de la *agenda*, se plantea la construcción de un generador de eventos a partir de la evolución dinámica de la misión.
- La propuesta hace aportes incorporando los atributos holónicos a la supervisión. El modelo incrementa la autonomía del holón, permite la cooperación entre

holones y holarquías e incluye comportamiento proactivo. La reactividad es una característica propia de la supervisión, por lo tanto no se considera un aporte de la propuesta.

- En cuanto al atributo de la proactividad, se aporta la definición del *evento de probable incumplimiento*, el cual le permite al holón anticiparse a la ocurrencia de situaciones que ponen en riesgo la misión y toma las decisiones de *supervisión* necesarias para evitar que eso ocurra.
- El modelo para supervisión integra formalismos existentes para la supervisión de sistemas continuos, especialmente la teoría de sistemas híbridos y la supervisión de la dinámica continua desde la teoría de control supervisorio, a partir de la discretización del espacio de estados continuo y haciendo uso del árbol de alcanzabilidad.
- El modelo de supervisión presenta una estructura formal basada en redes de Petri y la teoría de autómatas que facilitan la construcción algorítmica de supervisores y puede servir de base para la generación automática de los mismos. Esta concepción es fundamental para facilitar la reconfigurabilidad de las estructuras de control, como característica clave del paradigma.
- Dada la importancia de las funcionalidades de diagnóstico de fallas para establecer el estado del holón como recurso de producción, el modelo de supervisión propuesto permite incorporar desarrollos que permitan mejorar esa funcionalidad tales como el diagnóstico predictivo, el control tolerante a fallas o diversas técnicas empleadas para el diagnóstico.
- Se presenta una propuesta de métricas de los atributos holónicos, que se obtienen a partir del intercambio de eventos entre supervisores y fundamentadas en la teoría de control supervisorio. Futuros desarrollos sobre la base de las métricas

propuestas pueden permitir el establecimiento de valores de cada uno de los atributos que tiene el holón. Más que permitir la verificación de los atributos holónicos y determinar si un sistema es holónico o no lo es, las métricas podrían emplearse para incrementar los valores de cada uno de los atributos. Desde el paradigma holónico, es deseable el incremento de la autonomía del holón hasta sus límites permitidos, y el incremento de su proactividad, reactividad y capacidades de cooperación.

Conclusiones

- La *supervisión* representa una función fundamental en la que recaen muchas de las características y atributos de un sistema holónico. La descentralización de la toma de decisiones y el comportamiento autónomo, cooperativo, proactivo y reactivo, se ven claramente modelados y representados en la supervisión.
- La teoría de control supervisorio, la teoría de lenguajes y las redes de Petri, brindan una base teórica unificada y apropiada para representar los comportamientos y las decisiones holónicas, relacionadas con la *Supervisión*. La representación de la dinámica continua en el espacio de estados discreto, la síntesis del supervisor, el estado del holón y de la misión, el análisis del espacio de estados, el análisis de propiedades de desempeño, son aportes de estas teorías que contribuyen a formalizar los conceptos filosóficos del paradigma.

Capítulo 6

Caso de estudio

Introducción

La propuesta presentada en los capítulos 3, 4 y 5 muestra un procedimiento para la *planificación, programación, reprogramación y supervisión de la producción*, basada en el paradigma holónico y en la Teoría de Control Supervisorio. Los resultados obtenidos definen un procedimiento riguroso que puede ser utilizado en línea por la velocidad de los cálculos.

En este capítulo se muestra la aplicación de la propuesta en un caso industrial real complejo, como lo es una central térmica de generación de energía. Se demuestra la facilidad del uso de los conceptos planteados, así como la calidad de las respuestas obtenidas. En la selección del proceso se tuvo en cuenta que fuera posible aplicar conceptos holónicos como la negociación de la misión y la formación de holarquías.

Una vez se describe el proceso, se explican los criterios de definición de los holones y de las unidades de producción y se explican los modelos elaborados para cada una de las funciones de producción.

Para la realización de pruebas y experimentos que permitan comprobar los conceptos y modelos propuestos, se ha elaborado un aplicativo de software, el cual se explica en detalle en la sección 6.5.

El aplicativo está basado en los conceptos presentados en este trabajo y fue elaborado desde el enfoque holónico.

Los experimentos realizados tienen por finalidad demostrar que la arquitectura propuesta es *holónica*, estableciendo el cumplimiento de los atributos que caracterizan el paradigma. Estos atributos holónicos fueron probados mediante las métricas establecidas en el capítulo 5 y se muestran los resultados de esta evaluación en la sección 6.6.

El caso de estudio fue apoyado por trabajos de grado de estudiantes de ingeniería eléctrica e ingeniería de control de la Universidad Nacional de Colombia, referenciados en [194–198].

6.1. Descripción del proceso. Central térmica de ciclo combinado

Una central térmica de ciclo combinado es un proceso termodinámico que tiene como fin la producción de energía eléctrica a través de dos ciclos diferentes.

El primero es un ciclo abierto de gas que tiene como entradas aire y combustible. El segundo es un ciclo cerrado de vapor de agua que toma los gases producto del primer ciclo y mediante una caldera de recuperación de calor (HRSG) pasa agua de líquido saturado a vapor sobrecalentado.

Este arreglo termodinámico se hace debido a que en la generación a gas se desperdicia el 65% de energía provocando un costo muy elevado por cada Kilovatio - hora (KWh). La energía desperdiciada en el ciclo de gas es aprovechada en el ciclo de vapor disminuyendo costos y optimizando la eficiencia del sistema.

La turbina a gas es un motor de combustión interna, que cuenta con una cámara de combustión que debe ser alimentada por un combustible (diesel o gas) y aire comprimido. Esta combustión genera gases con la potencia suficiente para hacer girar una turbina que está acoplada a un generador sincrónico. El ciclo se muestra en la Figura 6.1 [194].

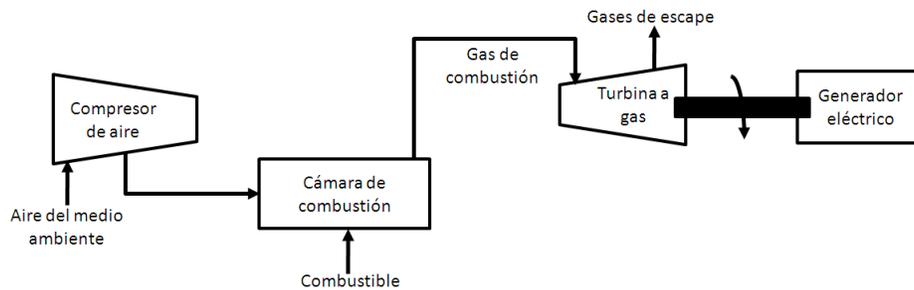


Figura 6.1: Ciclo de la turbina de gas, tomado de [194]

La turbina a vapor es un motor de combustión externa, que funciona con base en vapor de agua generado por la caldera de recuperación. Se genera vapor con la potencia suficiente para hacer girar una turbina a vapor que está acoplada a un generador. A la salida de la turbina se pasa el vapor por un condensador para recirculación, estableciendo así un ciclo para el agua, como se muestra en la Figura 6.2.

El acople entre los dos sistemas se da utilizando los gases calientes que elimina la turbina de gas para producir vapor sin combustible adicional. Los gases calientes son descargados a una caldera de recuperación de calor, en la que se realiza la generación

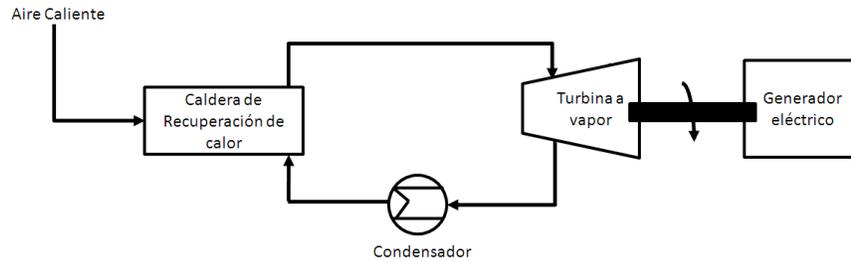


Figura 6.2: Ciclo de la turbina de vapor, tomado de [194]

de vapor. El arreglo del ciclo combinado permite obtener un 50 % adicional de potencia eléctrica y un rendimiento de conversión del 60 %.

La configuración básica de una central de ciclo combinado se muestra en la Figura 6.3.

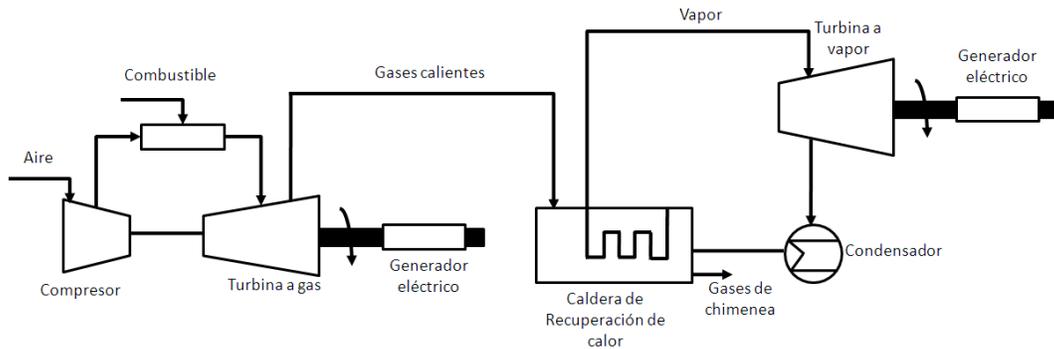


Figura 6.3: Central de ciclo combinado, tomado de [194]

Las unidades funcionales del ciclo combinado son: el compresor, el quemador, la turbina de potencia, la unidad recuperadora de calor, la turbina de vapor, el condensador, la planta de tratamiento de agua y la torre de enfriamiento.

Para el caso de estudio que se ilustra, se ha seleccionado una configuración 4×2 (cuatro turbinas de gas por dos turbinas de vapor) como la que se muestra en la Figura 6.4.

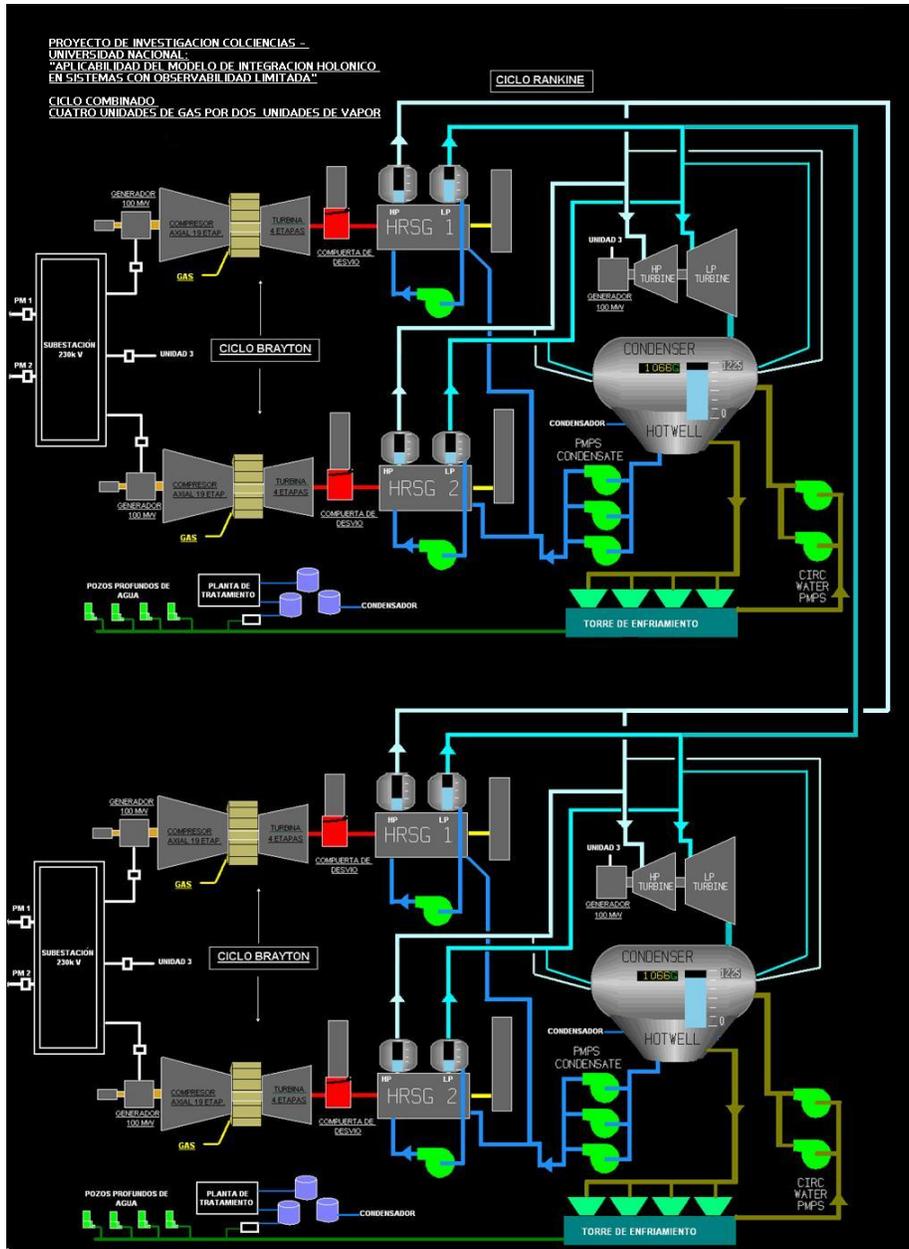


Figura 6.4: Central térmica en configuración 4x2

La disposición y conexión de las unidades se ilustra en la configuración 2×1 de la Figura 6.5.

Las especificaciones nominales de las Turbinas de Gas (TG) y las Turbinas de Vapor (TV) se muestran en el cuadro 6.1.

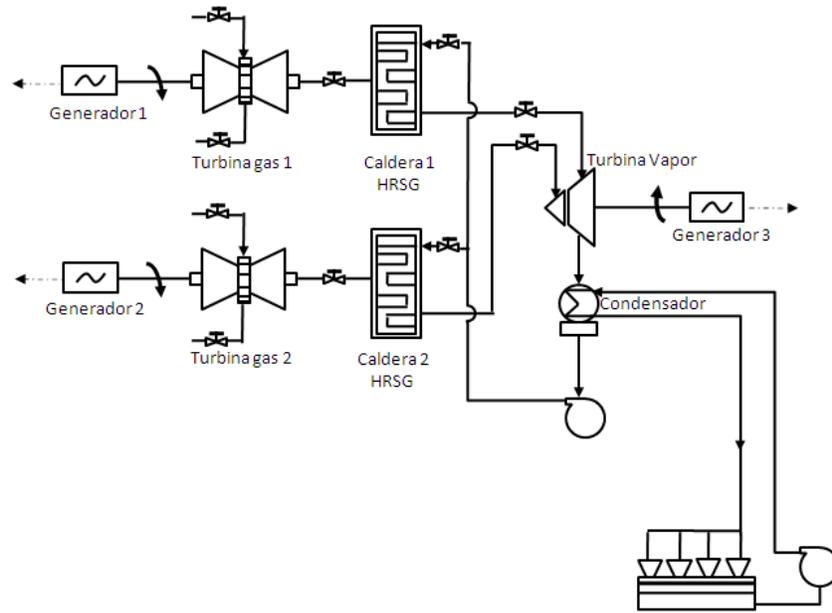


Figura 6.5: Diagrama de conexiones. Central térmica de ciclo combinado en una configuración de 2×1

	TG	TV	
		Alta presión	Baja presión
Potencia (MW)	100	100	
Potencia mínima (MW)	15	10	
Velocidad (rpm)	3600	3600	
Flujo de aire (cfm)	625000	---	
Presión (psi)	14.7	1294	170
Presión de Gas (psi)	360	---	
Temperatura del agua ($^{\circ}C$)	---	530	295

Cuadro 6.1: Eventos y estados de la dinámica del recurso

6.2. Definición de holones

La UPH es la central térmica de ciclo combinado. Esta UPH recibe como insumos gas, aire y agua, entregando como producto energía eléctrica. Para definir los holones se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- Un holón es a su vez una UPH, es decir, elabora un producto a partir de unos insumos.
- Se puede dotar de la estructura de control para manejar de manera autónoma su comportamiento.
- Está en condiciones de negociar su misión de acuerdo con su capacidad y disponibilidad.
- Puede cooperar con otros holones.
- Puede participar en holarquías.

De acuerdo con estos criterios se seleccionan los holones que se describen en el cuadro 6.2. La UPH está dotada de otros recursos de servicio, como la subestación de energía y la planta de tratamiento de agua.

En la Figura 6.6 se muestra la representación gráfica de la definición de holones y en la Figura 6.7 se hace una representación simplificada de los holones y de la UPH.

6.3. Modelo para *planificación, programación y reprogramación de la producción*

Para la construcción del modelo PN global de la UPH, se sigue el método propuesto en la sección 4.1.2. En el modelo del producto se tienen las operaciones *generar con gas* y *generar con vapor*. Los productos son energía eléctrica y vapor. La Figura 6.8 expresa el modelo del producto de una central térmica de ciclo combinado, y muestra tanto el grafo como la red de Petri, tal como se propone en el capítulo 4. En el modelo es claro que la precedencia para generar energía a partir de vapor, es generar a partir de gas.

Holón	Descripción	Competencia	Insumos	Productos	Unidades de medida de la misión
TG 	Produce energía eléctrica como producto principal y aire caliente como subproducto. Los insumos requeridos son gas, y aire. Hacen parte de este holón, el compresor, la cámara de combustión, la turbina, la caldera de recuperación y el generador.	Generar energía a partir de gas.	Gas. Aire.	Energía eléctrica. Aire caliente.	Potencia eléctrica (MW).
TV 	Produce energía eléctrica a partir de vapor sobrecalentado. Hacen parte de este holón, la turbina de vapor, el condensador, la torre de enfriamiento y el generador.	Generar energía a partir de vapor.	Vapor.	Energía eléctrica.	Potencia eléctrica (MW).

Cuadro 6.2: Definición de holones

Seguendo el grafo del producto, se nota que para realizar la operación 1 se requiere aire y gas. Esas precedencias se representan en la red de Petri como lugares de entrada a la transición t_1 . Al dispararse la transición se obtienen los productos “energía” y “calor”. De esta orma se continúa con la construcción del modelo del producto.

Para integrar el modelo del producto con el recurso, se recurre a la composición mediante fusión de lugares, como se explicó en la sección 4.1.2. Para la operación 1, se

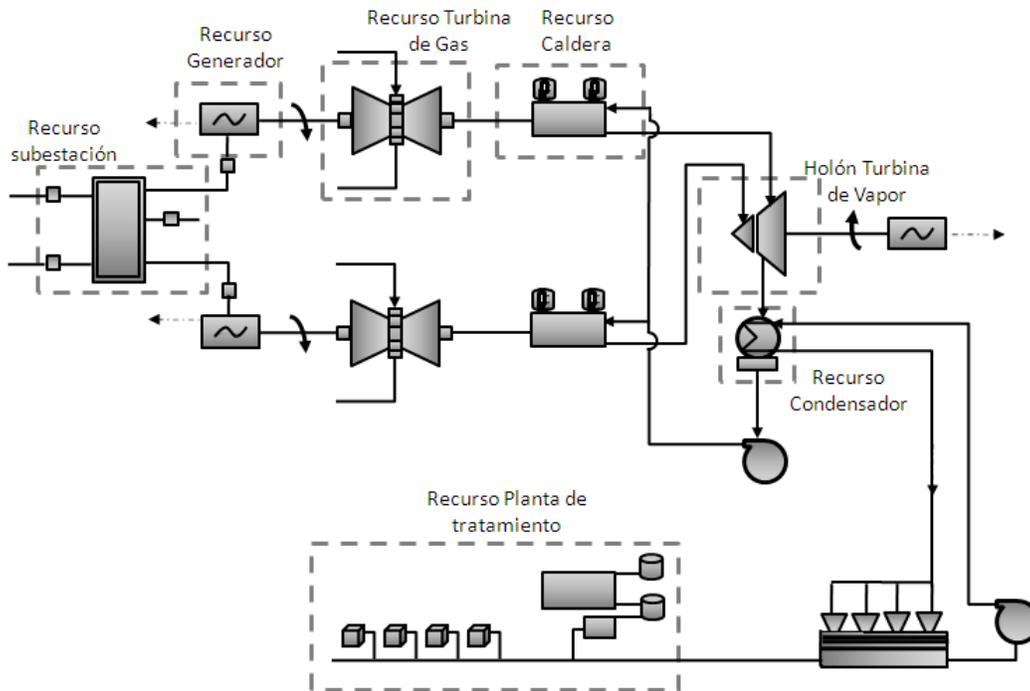


Figura 6.6: Definición de holones y recursos en una central térmica

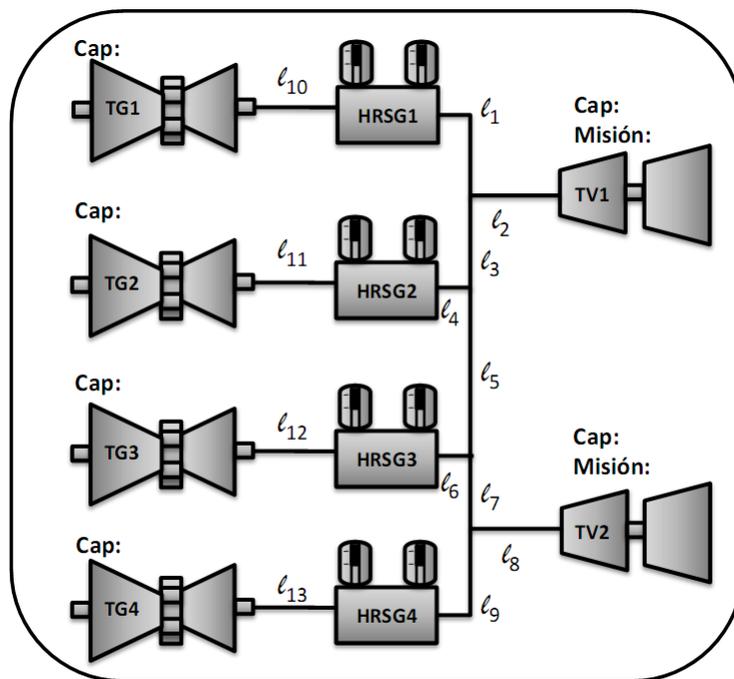
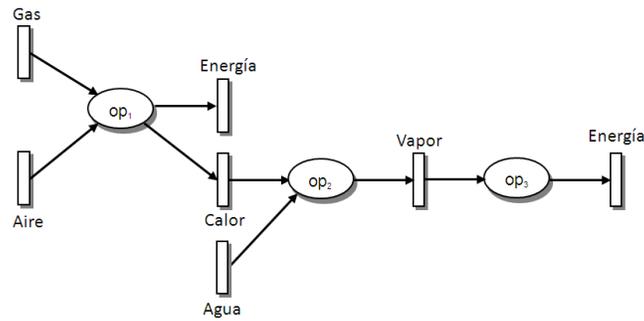


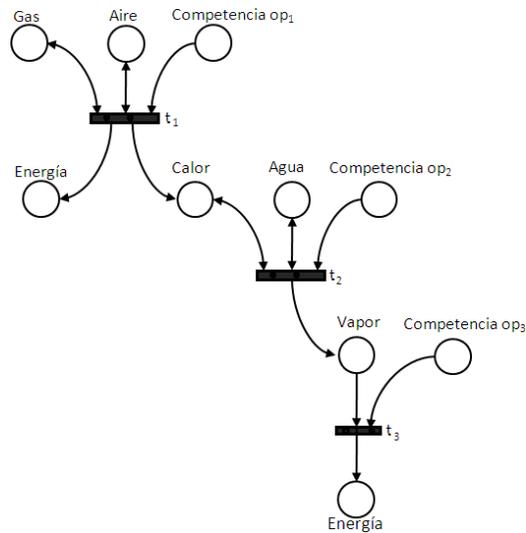
Figura 6.7: Representación simplificada de la UPH Central térmica de ciclo combinado

hace la composición del modelo con los recursos que tienen la competencia de realizar esa operación.

Una vez se tiene la composición entre producto y recurso, se hace la conexión entre los recursos. Para el caso de estudio, se hace la conexión entre las turbinas de gas y las calderas y entre las calderas y las turbinas de vapor.



(a) P-Graph



(b) PN

Figura 6.8: Modelo del producto.

Los recursos están conectados en bifurcación asíncrona/unión asíncrona. Las conexiones entre los recursos se establecen en el cuadro 6.3.

Por ejemplo, la línea $\ell_1\ell_2$ (ver Figura 6.7) conecta la caldera 1 (HRSG1) con la turbina de vapor 1 (TV1), como se indica en los primeros elementos del Cuadro 6.3.

Línea	Recursos conectados	Línea	Recursos conectados
$\ell_1\ell_2$	c(HRSG1, TV1)	$\ell_1\ell_2\ell_3\ell_5\ell_7\ell_8$	c(HRSG1, TV1 +TV2)
ℓ_{10}	c(TG1, HRSG1)	$\ell_1\ell_3\ell_5\ell_7\ell_8$	c(HRSG1, TV2)
$\ell_1\ell_2\ell_3\ell_4$	c(HRSG1+HRSG2, TV1)	$\ell_1\ell_2\ell_3\ell_4\ell_5\ell_7\ell_8$	c(HRSG1+HRSG2, TV1+TV2)
$\ell_1\ell_2\ell_3\ell_4\ell_5\ell_6$	c(HRSG1+HRSG2 +HRSG3, TV1)	$\ell_1\ell_2\ell_3\ell_4\ell_5\ell_6\ell_7\ell_8$	c(HRSG1+HRSG2 +HRSG3, TV1+TV2)
$\ell_1\ell_2\ell_3\ell_4\ell_5\ell_6\ell_7\ell_9$	c(HRSG1+HRSG2 +HRSG3+HRSG4, TV1)	$\ell_1\ell_2\ell_3\ell_4\ell_5\ell_6\ell_7\ell_8\ell_9$	c(HRSG1+HRSG2 +HRSG3+HRSG4 , TV1+TV2)
ℓ_{11}	c(TG2, HRSG2)	ℓ_{12}	c(TG3, HRSG3)
ℓ_{13}	c(TG4, HRSG4)		

Cuadro 6.3: Conexiones entre los recursos

Las restricciones operacionales se establecen por los equilibrios de presión de vapor en las tuberías. Por ejemplo, no es posible establecer una conexión entre el holón TG1 y el holón TV2, si el holón TG4 está conectado con el holón TV1, debido a que no es posible realizar ese cruce de presiones. En ese caso, para conservar un equilibrio de presiones, estarían conectados los holones TG1 y TG2 con TV1 y TV2.

El modelo en PN debe expresar el conjunto de todas las restricciones físicas y permitir solo las que sean posibles.

La herramienta seleccionada para modelar y simular es el CPNTools [115], (www.cpntools.org).

El modelo global para la central 4×2 se presenta en el Anexo 1, en archivos de extensión .cpn y .pdf.

Para obtener el espacio de estados completo de la central térmica, se establece un marcaje inicial con todos los holones, recursos y conexiones disponibles. El análisis de propiedades elaborado en CPNTools que se adjunta entrega los siguientes resultados. El modelo PN de la central térmica de ciclo combinado es:

- Acotado.
- Seguro.
- Vivo.
- Todos los estados de terminación satisfactoria del producto son alcanzables.

El total de posibles configuraciones para el arreglo 4×2 es de 188 (ver archivo “configuraciones.xls” en Anexo 3).

Para la presentación de ofertas, el formato es el siguiente:

$$Bid(holon_i) = \{disp, capacidad(MW), costo(USD/MW - H), confiabilidad(\%)\}$$

Teniendo en cuenta las conexiones y las reglas presentadas en la sección 4.1.3, las posibles holarquías que se forman en la central térmica son las que se ilustran en las figuras 6.9 (a), (b), (c), (d), (e), (f).

Para la *programación de la producción* se tienen en cuenta las siguientes restricciones operacionales, que deben ser expresadas en el árbol de alcanzabilidad (ver cuadro 6.4).

En la sección 5.6 se presentan resultados experimentales de la *planificación y programación de la producción*.

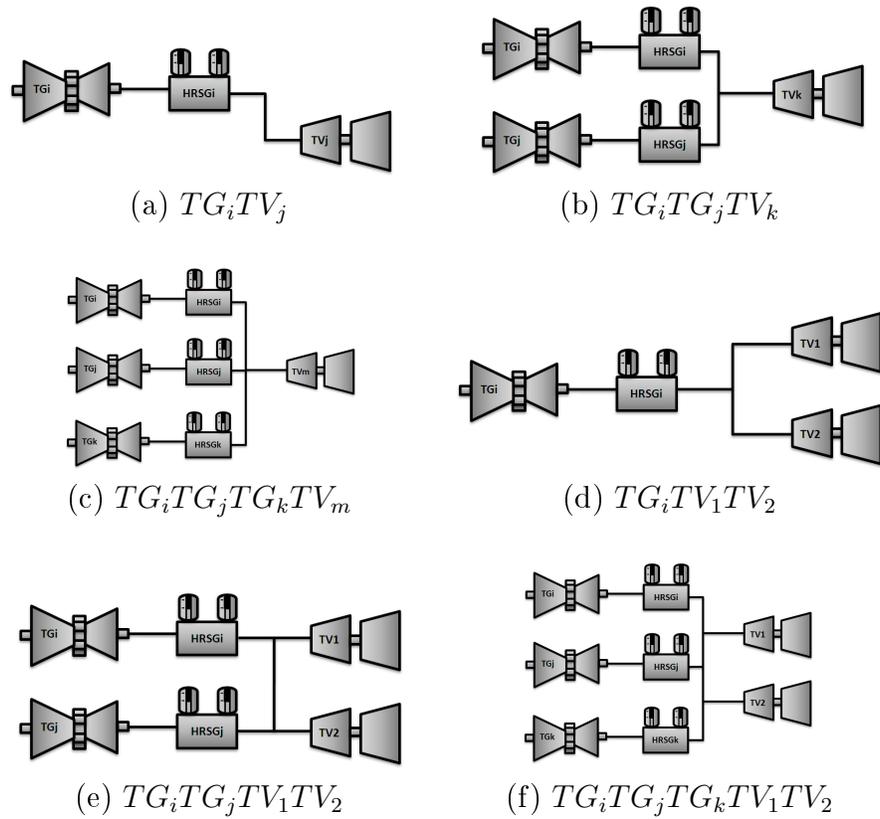


Figura 6.9: Posibles holarquías

Parámetro	Descripción	Valor
$t_{arranque_gas}$	Tiempo de arranque de las turbinas de gas, para empezar a generar energía.	30 min
$t_{arranque_vapor}$	Tiempo de arranque de las turbinas de vapor, para empezar a generar energía después de recibir vapor.	90 min
$\Delta mision TG_{max}/\Delta t$	Rampa máxima de subida o bajada para las TG	7MW/min
$\Delta mision TG_{min}/\Delta t$	Rampa mínima de subida o bajada para las TG	3MW/min
$\Delta mision TV/\Delta t$	Rampa de subida o bajada para las TV	5MW/min
$mision_gas_{min}$	Carga mínima de las TG	15MW
$mision_vapor_{min}$	Carga mínima de las TV	10MW

Cuadro 6.4: Restricciones operacionales

6.4. Supervisión

Para ilustrar los conceptos planteados en el capítulo 5 para la *supervisión* bajo el paradigma holónico, se presenta el esquema de *supervisión* de la turbina de gas de la central térmica de ciclo combinado.

Inicialmente se hace el análisis termodinámico para plantear el comportamiento de la dinámica continua. La selección del modelo, el análisis termodinámico y las especificaciones para la supervisión se apoyan en el trabajo de [195]. Luego se definen los holones y se establece la configuración de la central térmica como una Unidad de Producción Holónica.

Establecido el modelo de la dinámica continua, se realiza la proyección discreta para obtener la red de Petri a partir de la cual se sintetiza el supervisor. En el caso de estudio, el sistema de supervisión se integra con el sistema de reprogramación de la producción para realizar las pruebas de desempeño.

6.4.1. Modelo de la dinámica continua

Un ciclo de potencia simple para una turbina de gas emplea equipos separados para los diversos procesos del ciclo. Al inicio, el aire se comprime en forma adiabática en un compresor rotatorio axial o en uno centrífugo. Al final de este proceso el aire entra a una cámara de combustión donde se inyecta y quema combustible de forma isobárica. Los productos de la combustión se expanden luego en una turbina hasta alcanzar la presión ambiente de los alrededores. Un ciclo compuesto por esos tres pasos recibe el nombre de ciclo abierto [199] (Ver Figura 6.1).

Para el análisis de la turbina de vapor se usa el denominado ciclo Brayton, que emplea el principio de un aire idealizado [199]. En este ciclo los procesos de compresión y expansión son isoentrópicos, y el proceso real de la combustión se sustituye por un proceso de adición de calor. En la Figura 6.10 se muestran los diagramas T-s y P-v [200] del ciclo ideal en el cual se puede ver que los procesos 1-2 y 3-4 son isoentrópicos, luego el balance de energía en estado estacionario está dado por:

$$\dot{Q} + \dot{W} = \sum_{salida} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_e m_e - \sum_{entrada} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)_i m_i$$

Donde:

\dot{Q} , es el flujo de calor del sistema.

\dot{W} , es el flujo de trabajo.

h , es la entalpía.

V , es la velocidad lineal.

g , es la fuerza de gravedad.

z , es la altura de la entrada y la salida.

\dot{m} , es el flujo de masa.

Como se trata de estado estacionario:

$$\sum_{entrada} \dot{m}_e = \sum_{salida} \dot{m}_i$$

Con lo que se llega a:

$$\dot{Q} + \dot{W} = \left[(h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] \dot{m}$$

Si la turbina se ubica horizontalmente, la altura de la entrada y la salida son iguales. Además, según [199], la energía cinética se puede despreciar porque en este caso la velocidad no es muy alta. Como se trata de un proceso isoentrópico se puede decir que $\dot{Q} = 0$. Teniendo en cuenta estas consideraciones y pasando las variables de la ecuación anterior a por unidad de masa se llega a la expresión del trabajo que realiza el compresor (1-2) y la turbina (3-4).

$$w_{compresor} = h_2 - h_1 \quad w_{turbina} = h_4 - h_3$$

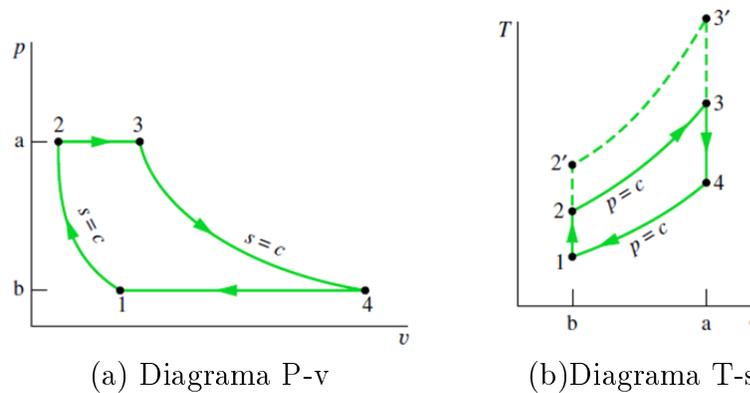


Figura 6.10: Diagramas del ciclo Brayton de aire estándar

Como se ve en la Figura 6.10, entre los puntos 2-3 y 4-1 los procesos son isobáricos, por lo que la ecuación del balance de energía queda así:

$$q = \Delta h + \Delta EC$$

Donde:

q , es el flujo de calor.

Δh , es el cambio en la Entalpía.

ΔEC , es el cambio en la Energía cinética.

Despreciando la energía cinética, las expresiones para el calor, tanto en la cámara de combustión como en la salida (en este caso el medio ambiente), están dadas por:

$$q_{entrada} = h_3 - h_2 \quad q_{salida} = h_4 - h_1$$

Finalmente, atendiendo al principio de Carnot la eficiencia de un ciclo ideal está dada por:

$$\eta_{brayton} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

Para los modelos dinámicos de una turbina de gas se tienen en cuenta los modelos presentados por el “Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies” del IEEE [201].

El modelo está dividido en dos partes, la primera se refiere al control de las dinámicas continuas (temperatura, flujo de combustible y flujo de aire) y la segunda parte se refiere a la representación de las propiedades térmicas de la turbina. El modelo es de velocidad constante con capacidad de modelar las guías de las aspas de entrada de aire (IGV), con lo que se puede variar el flujo de aire. Los modelos se muestran en las figuras 6.11 y 6.12.

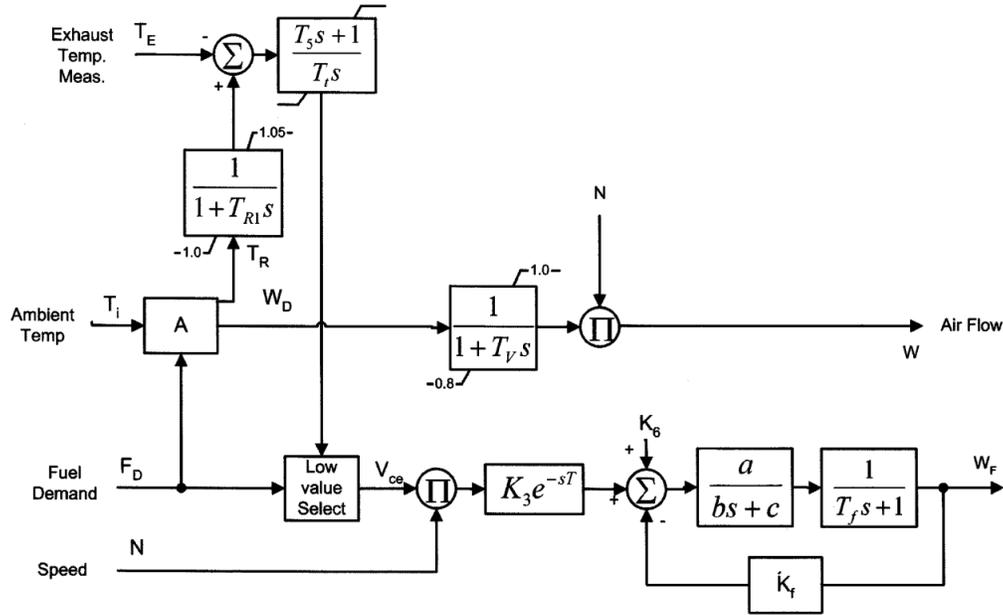


Figura 6.11: Modelo IEEE. Sistema de control, tomado de [201].

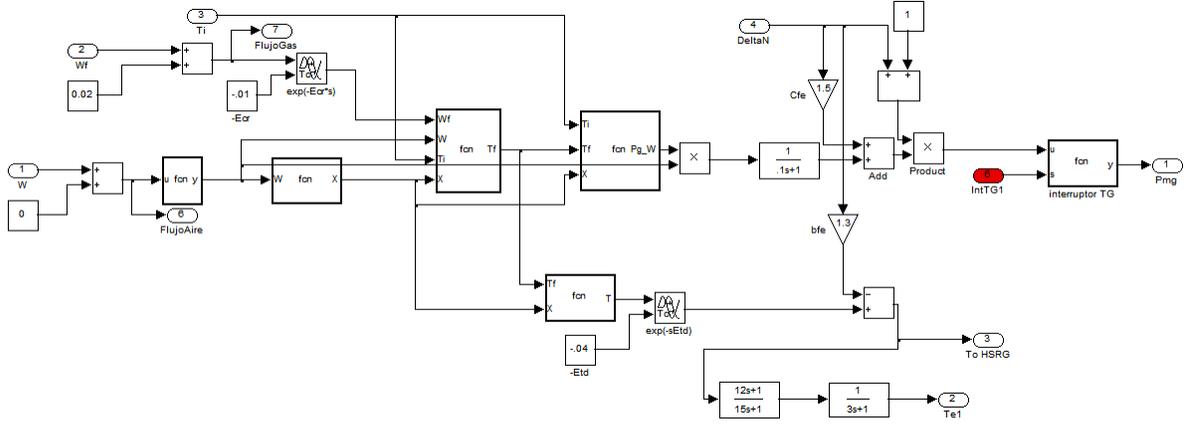


Figura 6.13: Modelo de la turbina de gas en Simulink.

Para la obtención del modelo reducido, las entradas ΔN y T_i se dejan como constantes del sistema y se fusiona una cantidad de valores constantes, para al final dejar sólo dos entradas y dos salidas como variables del sistema. El modelo queda de la siguiente manera:

$$X_1(s) = \left(k_{11}u_{11}(s) - k_{12}u_1^{(1-B)}(s) + k_{13}u_1^{(1+B)}(s) + k_{14}u_2(s) - k_{15}u_2(s)u_1^{-B}(s) \right) \left(\frac{k_{16}}{0,1s+1} \right)$$

$$X_2(s) = k_{23} \left(k_{21} + k_{22} \frac{u_2(s)}{u_1^{B+1}(s)} \right) \left(\frac{12s+1}{45s^2+18s+1} \right)$$

Donde las variables $u_1(s)$ y $u_2(s)$ corresponden a las entradas en el dominio de Laplace descritas en el cuadro 6.5; y las variables $X_1(s)$ y $X_2(s)$ corresponden a las variables en el dominio de Laplace de los estados x_1 y x_2 presentados en el mismo cuadro.

La señal típica que el supervisor utiliza para realizar los cruces entre regiones es el escalón. Por esta razón se presentan resultados de la comparación que se hizo entre ambos modelos con diferentes entradas.

Se puso a prueba la efectividad del modelo reducido aplicando pasos de carga: primero de 0 a 0.25, luego a 0.75 y por último a 1pu (ambas entradas al tiempo).

Para el estado x_1 , el porcentaje de ajuste fue de 99.87%. Para el estado x_2 fue de 99.34%.

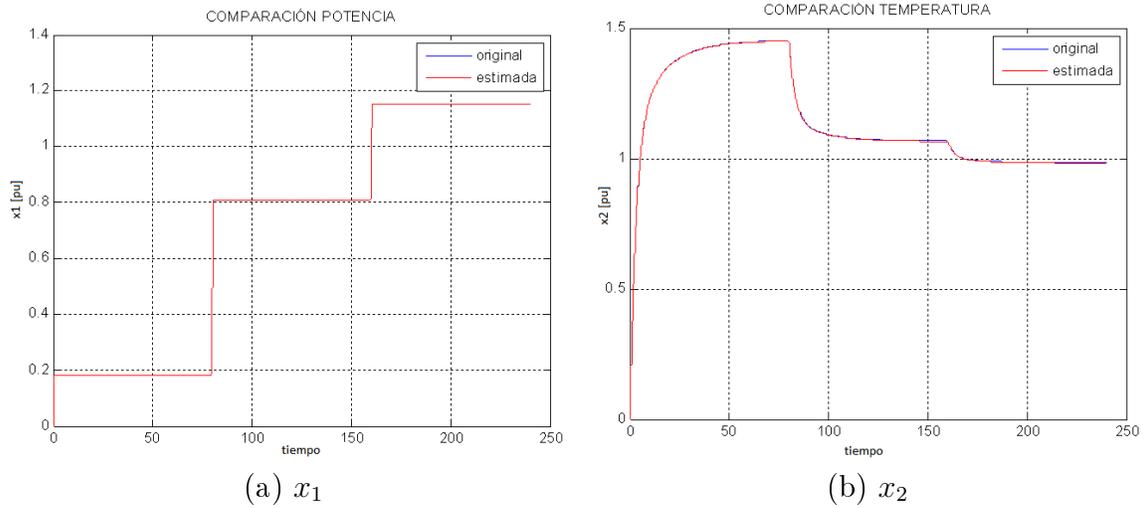


Figura 6.14: Comparación de respuestas entre modelo reducido y modelo IEEE

Para realizar los cálculos de los cruces entre regiones de operación, se realizaron los siguientes cambios de variable, con el objetivo de pasar a espacio de estados las ecuaciones en Laplace del modelo reducido:

$$U_1 = k_{11}u_1 - k_{12}u_1^{(1-B)}(s) + k_{13}u_1^{(1+B)}(s) + k_{14}u_2(s) - k_{15}u_2(s)u_1^{-B}(s)$$

$$U_2 = k_{21} + k_{22}\frac{u_2(s)}{u_1^{(B+1)}(s)}$$

De esta manera, las ecuaciones en espacio de estados quedan:

$$\dot{x}_1 = -10x_1 + \frac{59897}{5076}U_1$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{21} \\ \dot{x}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{19}{60} & 1 \\ \frac{1}{240} & -\frac{1}{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{21} \\ x_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{899}{2895} \\ 0 \end{bmatrix} U_2$$

$$x_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{21} \\ x_{22} \end{bmatrix}$$

Símbolo	Variables	Nombre
Variables de estado		
x_1	P_{mg}	Potencia demandada.
x_2	T_e	Temperatura de escape.
Variables de entrada		
u_1	W	Flujo de aire de entrada.
u_2	W_f	Flujo de combustible de entrada.
Variables de salida		
y_1	P_{mg}	Potencia demandada.

Cuadro 6.5: Variables continuas del modelo reducido

Los valores máximos del modelo, los parámetros, las condiciones de falla y operación degradada, se presentan en los cuadros 6.6, 6.7, 6.8, para lo cual se sigue lo propuesto en [176] para la especificación del sistema de supervisión.

Símbolo	Descripción	Valor
x_{2max}	Temperatura máxima de escape.	$x_2 = 1,15pu$
x_{1min}	Potencia mínima demandada.	$x_1 = 0,05pu$
$\Delta^+ x_{1min}$	Mínima tasa de cambio de potencia cuando se está en aumento de la potencia.	$0,03pu$
$\Delta^+ x_{1max}$	Máxima tasa de cambio de potencia cuando se está en aumento de la potencia.	$0,07pu$
$\Delta^- x_{1min}$	Mínima tasa de cambio de potencia cuando se está en disminución de la potencia.	$-0,03pu$
$\Delta^- x_{1max}$	Máxima tasa de cambio de potencia cuando se está en disminución de la potencia.	$-0,1pu$
T_i	Temperatura ambiente, constante.	$0,02pu$

Cuadro 6.6: Parámetros del proceso para el modelo reducido

Símbolo	Descripción	Prioridad	Causa
		C/A/M/B	
h_1	Temperatura de escape alta.	M	$\sigma_{delta_1} = [x_2 > 1,15pu]$
h_2	Flujo de aire alto.	M	$\sigma_{\delta_2} = [u_1 > 1,1u_{1p}]$
h_3	Flujo de aire bajo.	M	$\sigma_{\delta_3} = [u_1 < 0,9u_{1p}]$
h_4	Flujo de combustible alto.	M	$\sigma_{delta_4} = [u_2 > 1pu]$
h_5	Flujo de combustible bajo.	A	$\sigma_{f_1} = [u_2 < 0,9u_{2p}]$
h_6	Sobreflujo de combustible.	A	$\sigma_{f_2} = [u_2 > 1,1u_{2p}]$
h_7	Sobreflujo de aire.	A	$\sigma_{f_3} = [u_{1p} > u_{2p}]$
h_8	Eficiencia baja.	M	$\sigma_{\delta_5} = [0,85 < x_1/u_2]$

C: Crítica, A: Alta, M: Media, B: Baja.

Cuadro 6.7: Alarmas del modelo reducido

OPERACIÓN DEGRADADA		FALLA	
Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
h_1	Temperatura de escape alta.	h_5	Flujo de combustible bajo.
h_2	Flujo de aire alto.	h_6	Sobreflujo de combustible.
h_3	Flujo de aire bajo.	h_7	Sobreflujo de aire.
h_4	Flujo de combustible alto.		

INDICADORES DE DESEMPEÑO		
Símbolo	Indicador	Descripción
λ_1	x_1/u_1	Combustión.
λ_2	x_1/u_2	Eficiencia.

Cuadro 6.8: Condiciones de operación degradada, falla e indicadores de desempeño

6.4.2. Proyección de la dinámica continua

Para establecer las regiones de operación, obtener la proyección discreta de la dinámica continua y sintetizar el supervisor, se utiliza la ecuación en espacio de estados de \dot{x}_1 y el sistema en espacio de estados $[\dot{x}_{21} \ \dot{x}_{22}]^T$ para aplicar el siguiente criterio y así determinar las acciones de control que permitan el cruce de la región Ω_n a la región Ω_{n+1} :

$$\{U_1, U_2\}/\{x_1, x_2\} \in \Omega_{n+1} \wedge \{U_1, U_2\} \text{ cumplan : } \begin{cases} \nabla h(x) \cdot f(x, U) < 0 & \text{si } h(x) > 0 \\ \nabla h(x) \cdot f(x, U) > 0 & \text{si } h(x) < 0 \end{cases}$$

El criterio presentado arriba es el mismo que se propone en [186] para el cruce de regiones con entradas u de naturaleza discreta. Se adiciona una restricción inicial para garantizar que la región destino sea la deseada cuando se utilizan entradas continuas como es el caso. La restricción es que las entradas U_1 y U_2 sean tales que los estados x_1 y x_2 pertenezcan a la región destino.

Para determinar las regiones de operación se divide el espacio de estados del modelo teniendo en cuenta los cuadros 6.7 y 6.8.

Para realizar el cruce entre regiones: $\Omega_{00} \rightarrow \Omega_{10}$, se utiliza la ecuación mostrada arriba para encontrar las acciones de control que permiten realizar dicho cruce.

La hipersuperficie que separa las regiones es:

$$h_{0010}(x) = x_2 - 0,5$$

Esta ecuación es cero para $x_2 = 0,5$ y se cumple que $\forall x_2 \in \Omega_{00}, h_{0010}(x) < 0$ por tanto, para realizar el cruce, se deben encontrar:

$$\{U_1, U_2\}/\{x_1, x_2\} \in \Omega_{10} \wedge \nabla h_{0010}(x) \cdot f(x, U) > 0$$

Se soluciona primero la segunda parte de la expresión y se obtiene como resultado el siguiente sistema de ecuaciones:

$$-\frac{19}{60}x_2 - x_{21} + \frac{12}{45}k_3U_2 > 0$$

$$\frac{1}{240}x_2 - \frac{1}{12}x_{21} > 0$$

Con $k_3 = \frac{899}{2895}$, una constante del modelo reducido.

Solucionando el sistema, la acción de control que se debe aplicar es:

$$U_2 > 0,5623$$

Pero se debe recordar que $U_2 = f(u_1, u_2)$ la cual es no lineal e insoluble (se tienen dos incógnitas que corresponden a u_1 y u_2 y sólo una ecuación correspondiente a U_2). Encontrar una solución analítica resulta imposible y por esta razón se soluciona por métodos numéricos imponiendo la restricción a los valores de u_1 y u_2 tales que sea un valor real entre 0 y 1.

Para este caso específico, la solución se encuentra y es:

$$u_1 = 0,41 \quad u_2 = 0,25$$

Que corresponden a $U_2 = 0,6662$.

Para realizar el cruce entre $\Omega_{01} \rightarrow \Omega_{02}$ se sigue el mismo procedimiento.

La hipersuperficie que los separa es:

$$h_{0102}(x) = x_1 - 1$$

$h_{0102}(x) = 0$ para $x_1 = 1$ y se comprueba que $\forall x_1 \in \Omega_{01}, h_{0102}(x) < 0$, así, para realizar el cruce se debe cumplir primero que $\nabla h_{0102}(x)(x, U) > 0$:

$$\nabla h_{0102}(x) \cdot f(x, U) > 0 \Leftrightarrow -10x_1 + 10k_6U_1 > 0$$

Con $k_6 = \frac{59897}{5076}$.

Solucionando la ecuación anterior y evaluando en $x_1 = 1$. Se tiene que la acción de control que permite el cruce es $U_1 > 0,8475$.

Se busca por métodos numéricos una solución para la ecuación de $U_1(u_1, u_2)$ y se llega a la conclusión que no existe $\{u_1, u_2\}$ que cumplan con la expresión:

$$\{u_1, u_2\}/\{x_1, x_2\} \in \Omega_{02} \wedge U_1 > 0,8475$$

La cual corresponde a la primera parte de la expresión ilustrada arriba para realizar los cruces.

En el cuadro 6.10 se resumen las hipersuperficies que separan cada región de operación y las acciones de control respectivas que permiten realizar cada cruce entre regiones de operación adyacentes según la Figura 6.15 y el cuadro 6.9.

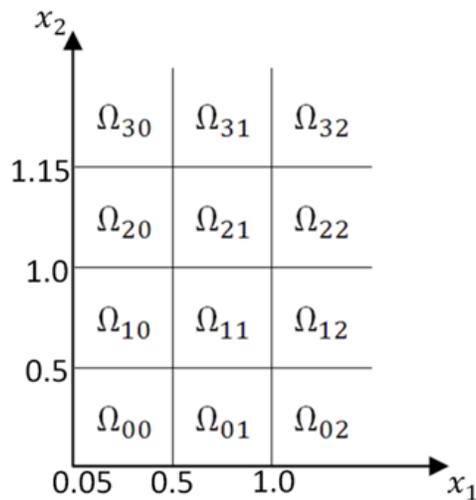


Figura 6.15: Regiones de Operación

Símbolo	Descripción	Región
Ω_{00}	Demanda baja y temperatura baja	$(0,05 < x_1 < 0,5) \wedge (0 < x_2 < 0,5)$
Ω_{10}	Demanda baja y temperatura normal	$(0,05 < x_1 < 0,5) \wedge (0,5 < x_2 < 1)$
Ω_{20}	Demanda baja y sobret temperatura	$(0,05 < x_1 < 0,5) \wedge (1 < x_2 < 1,15)$
Ω_{30}	Estado de falla	$(0,05 < x_1 < 0,5) \wedge (1,15 < x_2 < 1,5)$
Ω_{01}	Demanda alta y temperatura baja	$(0,5 < x_1 < 1) \wedge (0 < x_2 < 0,5)$
Ω_{11}	Demanda alta y temperatura normal	$(0,5 < x_1 < 1) \wedge (0,5 < x_2 < 1)$
Ω_{21}	Demanda alta y sobret temperatura	$(0,5 < x_1 < 1) \wedge (1 < x_2 < 1,15)$
Ω_{31}	Estado de falla	$(0,5 < x_1 < 1) \wedge (1,15 < x_2 < 1,5)$
Ω_{02}	Estado de falla	$(1 < x_1) \wedge (0 < x_2 < 0,5)$
Ω_{12}	Estado de falla	$(1 < x_1) \wedge (0,5 < x_2 < 1)$
Ω_{22}	Estado de falla	$(1 < x_1) \wedge (1 < x_2 < 1,15)$
Ω_{32}	Estado de falla	$(1 < x_1) \wedge (1,15 < x_2 < 1,5)$

Cuadro 6.9: Regiones de operación del espacio de estados

Una vez definidos todos los cruces, se establece la red de Petri que representa la proyección discreta de la dinámica continua excluyendo aquellas regiones no alcanzables y los cruces que no son posibles (ver Figura 6.16).

6.4.3. Síntesis del *supervisor*

Las especificaciones expresan el comportamiento deseado del sistema y las restricciones operacionales que se le imponen al mismo. Estas se presentan desde los sistemas de eventos discretos para aplicar la síntesis del supervisor mediante la teoría de control supervisorio y para ello deben indicarse estados y trayectorias permitidas y prohibidas.

La PN obtenida como imagen discreta se convierte a un autómata finito mediante el árbol de alcance, para hacer uso de la metodología de síntesis, basada en SCT.

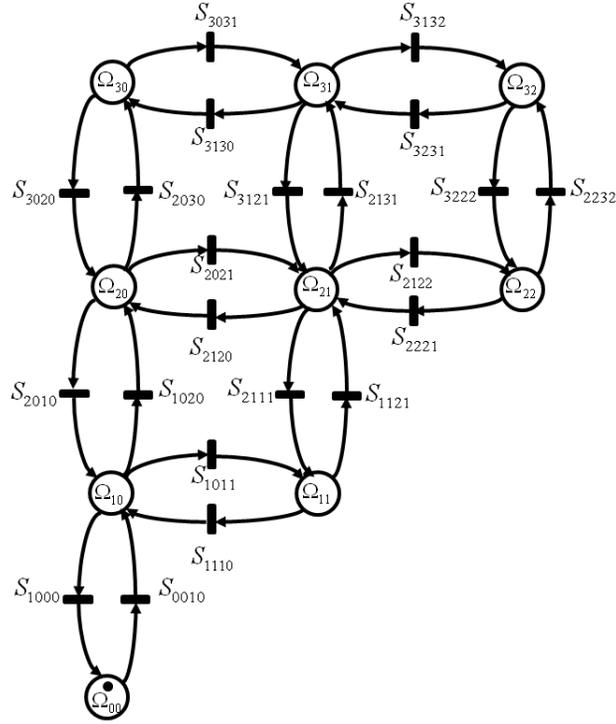


Figura 6.16: Proyección discreta de la dinámica continua

Para la síntesis, la planta es el autómata que se muestra en la Figura 6.17, correspondiente a la PN de la Turbogas.

Se ilustra el diseño del supervisor para el arranque de la turbina, iniciando en la región Ω_{00} y llegando finalmente a la región Ω_{21} .

La especificación se ilustra en la Figura 6.18 y la Figura 6.19 muestra el supervisor resultante de la composición entre la planta y la especificación, mediante la aplicación del algoritmo de síntesis.

En un segundo ejemplo (ver figuras 6.20 y 6.21), se ilustra un cambio en la región de operación. Para este caso, el marcaje inicial de la red de Petri cambia, y por tanto el estado inicial del autómata de la planta también cambia. El cambio en región de

operación que se muestra a continuación es el cambio $\Omega_{21} \rightarrow \Omega_{10}$. Como se ve en la figura, el estado inicial es R_{21} . El estado final es R_{10} , que representa la región Ω_{10} .

Cruce	HIPERSUPERFICIE QUE LAS SEPARA		ACCIONES DE CONTROL PARA LOS CRUCES	
	Símbolo	Hipersuperficie	Símbolo	Acción de control
00 → 01	$h_{0001}(x)$	$x_1 - 0,5$	U_{0001}	$U_1 > 0,4237$
00 → 10	$h_{0010}(x)$	$x_2 - 0,5$	U_{0010}	$U_2 > 0,5623$
10 → 00	$h_{1000}(x)$	$x_2 - 0,5$	U_{1000}	$U_2 < 0,5924$
10 → 20	$h_{1020}(x)$	$x_2 - 1$	U_{1020}	$U_2 > 1,1892$
10 → 11	$h_{1011}(x)$	$x_1 - 0,5$	U_{1011}	$U_1 > 0,4237$
01 → 00	$h_{0100}(x)$	$x_1 - 0,5$	U_{0100}	$U_1 < 0,4237$
01 → 11	$h_{0111}(x)$	$x_2 - 0,5$	U_{0111}	$U_2 > 0,5884$
01 → 02	$h_{0102}(x)$	$x_1 - 1$	U_{0102}	$U_1 > 0,8475$
02 → 01	$h_{0201}(x)$	$x_1 - 1$	U_{0201}	$U_1 < 0,8475$
02 → 12	$h_{0212}(x)$	$x_2 - 0,5$	U_{0212}	$U_2 > 0,5884$
11 → 10	$h_{1110}(x)$	$x_1 - 0,5$	U_{1110}	$U_1 < 0,4237$
11 → 01	$h_{1101}(x)$	$x_2 - 0,5$	U_{1101}	$U_2 > 0,6131$
11 → 21	$h_{1121}(x)$	$x_2 - 1$	U_{1121}	$U_2 > 1,1731$
11 → 12	$h_{1112}(x)$	$x_1 - 1$	U_{1112}	$U_1 > 0,8475$
12 → 11	$h_{1211}(x)$	$x_1 - 1$	U_{1211}	$U_1 < 0,8475$
12 → 22	$h_{1222}(x)$	$x_2 - 1$	U_{1222}	$U_2 > 1,1731$
12 → 02	$h_{1202}(x)$	$x_2 - 0,5$	U_{1202}	$U_2 < 0,6131$
20 → 10	$h_{2010}(x)$	$x_2 - 1$	U_{2010}	$U_2 < 1,1099$
20 → 30	$h_{2030}(x)$	$x_2 - 1,15$	U_{2030}	$U_2 > 1,3574$
20 → 21	$h_{2021}(x)$	$x_1 - 0,5$	U_{2021}	$U_1 > 0,4237$
21 → 20	$h_{2120}(x)$	$x_1 - 0,5$	U_{2120}	$U_1 < 0,4237$
21 → 11	$h_{2111}(x)$	$x_2 - 1$	U_{2111}	$U_2 < 1,1892$
21 → 22	$h_{2122}(x)$	$x_1 - 1$	U_{2122}	$U_1 > 0,8475$
21 → 31	$h_{2131}(x)$	$x_2 - 1,15$	U_{2131}	$U_2 > 1,3574$
22 → 21	$h_{2221}(x)$	$x_1 - 1$	U_{2221}	$U_1 < 0,8475$
22 → 12	$h_{2212}(x)$	$x_2 - 1$	U_{2212}	$U_2 < 1,1892$
22 → 32	$h_{2232}(x)$	$x_2 - 1,15$	U_{2232}	$U_2 > 1,3574$
30 → 20	$h_{3020}(x)$	$x_2 - 1,15$	U_{3020}	$U_2 < 1,3583$
30 → 31	$h_{3031}(x)$	$x_1 - 0,5$	U_{3031}	$U_1 > 0,4237$
31 → 30	$h_{3130}(x)$	$x_1 - 0,5$	U_{3130}	$U_1 < 0,4237$
31 → 21	$h_{3121}(x)$	$x_2 - 1,15$	U_{3121}	$U_2 < 1,3583$
31 → 32	$h_{3132}(x)$	$x_1 - 1$	U_{3132}	$U_1 > 0,8475$
32 → 31	$h_{3231}(x)$	$x_1 - 1$	U_{3231}	$U_1 < 0,8475$
32 → 22	$h_{3222}(x)$	$x_2 - 1,15$	U_{3222}	$U_2 < 1,3583$

Cuadro 6.10: Hipersuperficies y acciones de control para las Regiones de Operación

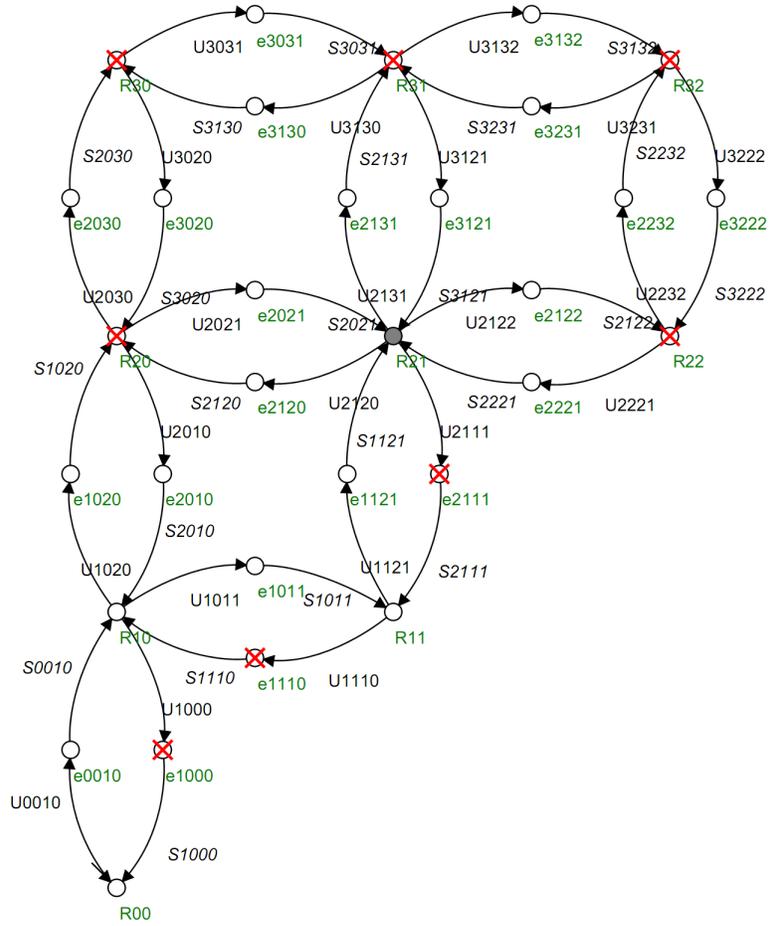


Figura 6.18: Autómata de la especificación para el arranque.

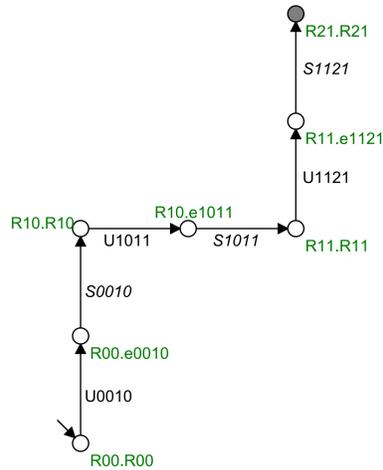


Figura 6.19: Autómata del *supervisor* para el arranque.

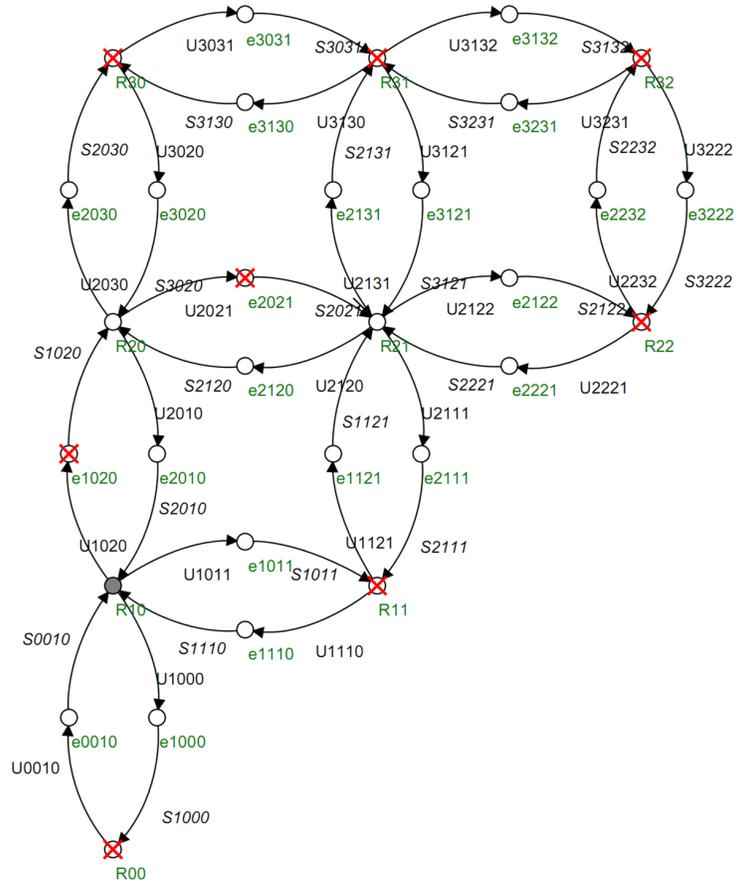


Figura 6.20: Autómata especificación cambio de región de operación

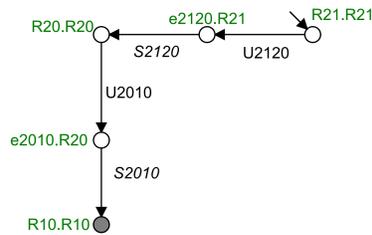


Figura 6.21: Autómata del *supervisor* para el cambio de región de operación

6.5. Descripción del aplicativo desarrollado para el caso de estudio

Para la demostración de las características y propiedades holónicas mencionadas a lo largo de este trabajo, se desarrolló un prototipo de software denominado “TERMO-

LOCHA”, basado en la central térmica de la Figura 6.7. El término “LOCHA” viene de la expresión “Low Cost Holonic Architecture” y se refiere a la arquitectura holónica propuesta como resultado de esta investigación.

Algunas consideraciones para el caso de estudio son:

- Cada una de las turbinas, sea de gas o de vapor es considerada un holón.
- Existen nueve tramos de tuberías que representan las conexiones entre las calderas y las turbinas de vapor, las cuales pueden ser habilitadas y deshabilitadas para una determinada misión, según su condición operativa (ver Figura 6.22).
- La capacidad máxima de generación de una turbina de vapor está dada por la mitad de la suma de las capacidades de las turbinas de gas que la alimentan.
- Como consecuencia de las restricciones temporales en los arranques de las turbinas de gas y las turbinas de vapor, expresadas en el cuadro 6.4, en los dos primeros períodos de programación de la misión sólo se tienen en cuenta las turbinas de gas.
- Cada turbina de gas tiene asociado un costo de arranque que fue configurado globalmente en USD 5.000.

Algunas características técnicas del aplicativo son las siguientes:

- Lenguaje de programación: *JAVA*.
- Plataforma de desarrollo: *Java Development Kit*.

- Se utiliza la librería “dom4j” para leer los archivos de CPNTools y la librería “apache poi” para leer las misiones de EXCEL.
- El código es *OpenSource*.

En la Figura 6.22 se aprecia la vista principal del software, en la que se destacan los siguientes componentes:

- Arquitectura de la UP.
- Programación de la producción.
- Supervisión.

Además, cuenta con una consola que informa los diferentes eventos que ocurren en la central.

Por defecto, el sistema inicia en la pantalla de “Arquitectura de la UP”. En esta pantalla se realiza la configuración inicial de los holones, los recursos y las conexiones, estableciendo su disponibilidad o no disponibilidad. A partir de esta configuración se define el marcaje inicial para la negociación de las misiones. La Figura 6.23 muestra un estado inicial, en el que los tramos 4 y 8 no están disponibles. Igualmente, la caldera HRSG1 y la turbina TG3 están falladas.

El conocimiento de cada *holón* o *Ingeniería del holón*, se edita haciendo uso del botón “Edición de recursos” (Ver Figura 6.24).



Figura 6.22: Vista principal de TERMOLOCHA



Figura 6.23: Configuración de estados de los recursos.

Se define el nombre del holón, su competencia (tipo), el costo (USD/MW), el costo del arranque (USD), la confiabilidad (%), la capacidad ofertada (MW) y la capacidad mínima (MW).



Figura 6.24: Edición de parámetros de un recurso

Mediante la edición de los recursos se facilita la modificación de los distintos valores que intervienen en la elaboración de las propuestas para la negociación.

Una vez establecido el estado de la UPH y los valores para la presentación de ofertas, se puede proceder a la planificación y programación de la producción, iniciando el proceso de negociación en la pestaña “Programación” como se muestra en la Figura 6.25.

Se dispone de cuatro botones para adelantar este proceso:

- “Cargar misiones de Excel”: permite importar el archivo de la misión, elaborado en formato .xls y expresado en períodos de una hora y valores de la misión en MW.
- “Programar”: permite iniciar el algoritmo de negociación ejecutando internamente el protocolo de contratos y evaluando las distintas condiciones de cada holón para finalmente entregar una distribución óptima de la misión.

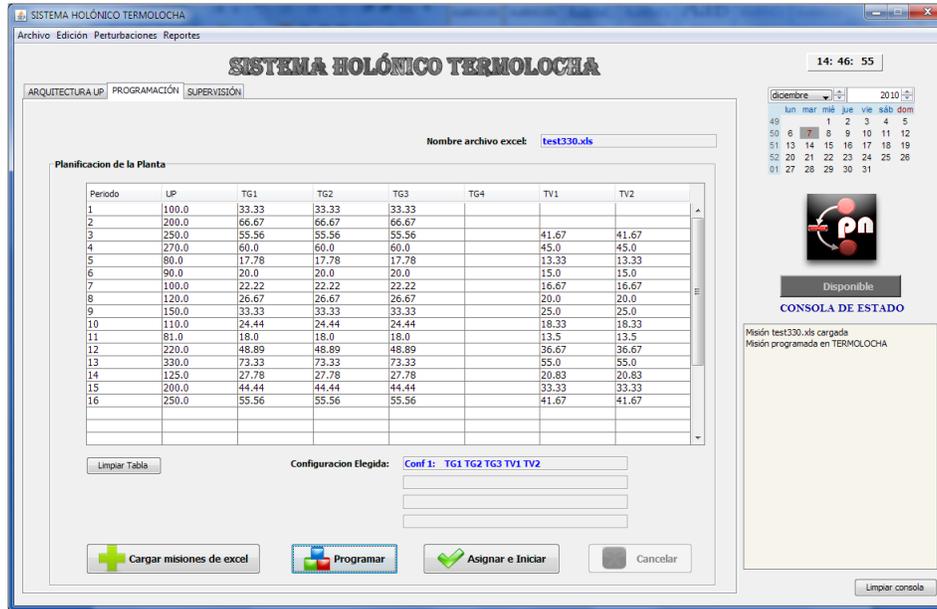


Figura 6.25: Pestaña para programación de la producción

- “Asignar e iniciar”: las configuraciones seleccionadas para realizar la misión aparecen en el cuadro “Configuración elegida” y los valores para cada holón que entrega la negociación se presentan en un cuadro en la que se muestra para cada uno de ellos y para cada período, el valor asignado. Si el usuario está de acuerdo con la distribución, asigna y da la orden de inicio.
- “Cancelar”: permite abortar el proceso de negociación.

Finalmente, en la pestaña “Supervisión” se encuentra la información relevante del proceso en ejecución tanto de la unidad de producción, las holarquías formadas y los recursos individuales. En la Figura 6.26 se observa cómo esta pestaña está conformada por tres paneles principales. El primero es el recurso, donde se muestran los parámetros asociados y el estado del recurso físico, donde además se cuenta con la posibilidad de navegar entre los elementos pasando por holarquías hasta llegar a los holones individuales. El segundo panel se refiere a la información de cada misión

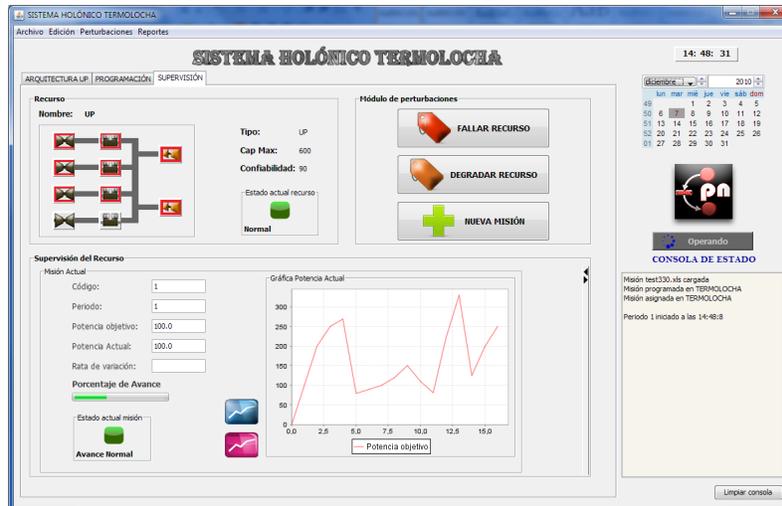


Figura 6.26: Pestaña para la Supervisión

asignada a un determinado recurso, mostrando el estado de la misión actual, el porcentaje de avance y la gráfica de potencia generada para todos los periodos asignados.

En el último panel, se encuentra el módulo de perturbaciones que permite ingresar tres tipos de eventos: fallar recurso, degradar recurso y nueva misión. Cualquiera de estos tres eventos desencadena la ejecución del algoritmo de renegociación que realiza una nueva asignación para responder al cambio ocasionado por la perturbación y asegura que se cumpla con el objetivo negociado por la central térmica.

Para la primera opción “Fallar recurso”, mostrada en la Figura 6.27, se puede elegir entre holones o recursos no inteligentes (calderas o tuberías). Para la segunda opción, “Degradar recurso”, sólo se tiene la posibilidad de degradar la capacidad de los recursos inteligentes (holones), como se indica en la en la Figura 6.28. En la tercera opción se puede agregar una nueva misión al proceso actual de la central (Figura 6.29), determinando si una cantidad en MW es para un solo periodo o para los periodos faltantes. Esta opción facilita el proceso de cooperación, al poder recibir misiones de otros holones, holarquías o unidades de producción en falla.

Luego de elegir una de las tres opciones, el algoritmo de reprogramación realizará una nueva configuración y distribución en los recursos donde se actualizará el cuadro de la pestaña de programación. En caso de que la capacidad total no sea suficiente para suplir la demanda con cualquiera de los eventos ingresados, el software da la opción de renegociar la misión, es decir, de trabajar con la capacidad permitida en ese momento y el usuario deberá elegir si opera bajo esa modalidad o no.



Figura 6.27: Ventana para fallar recursos.



Figura 6.28: Ventana para degradar recursos

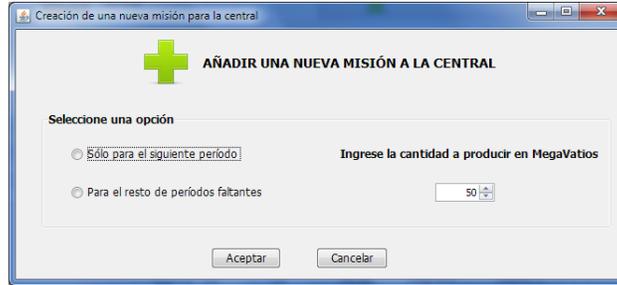


Figura 6.29: Ventana para añadir una nueva misión a la central.

6.6. Descripción fase experimental, ejemplo *reprogramación de la producción* y presentación de resultados

Con el objetivo de comprobar experimentalmente los resultados e impactos de la arquitectura propuesta, se diseñaron una serie de experimentos con diferentes datos tanto reales como ficticios, de despacho de centrales térmicas para períodos de 24 horas.

Según la investigación llevada a cabo y la base formal empleada, la arquitectura desarrollada realiza la programación de la producción para una central térmica de generación de energía. Así mismo, ante la presencia de perturbaciones está en la capacidad de atenderlas y generar un nuevo programa de producción, dando lugar a una reducción considerable en el tiempo de atención a fallas.

Es importante aclarar que el fin no es evaluar la optimización de los planes y programas de producción, sino comprobar y evaluar el cumplimiento de los atributos propios de una arquitectura holónica como la propuesta. Se busca minimizar el tiempo de respuesta ante perturbaciones, considerando que en los ambientes de producción en tiempo real los planes y programas de producción son ejecutados inevitablemente

entre varios tipos de eventos inesperados. Las perturbaciones pueden comprometer el éxito y culminación del programa de producción.

Hipótesis principal

La arquitectura Low Cost Holonic Architecture (LOCHA) es holónica.

Procedimiento a seguir

Con el fin de comprobar la hipótesis principal planteada anteriormente, se definirá un procedimiento a seguir, el cual está diseñado para verificar a través de diferentes casos experimentales que la arquitectura LOCHA cumple con cada una de las métricas establecidas para verificar los atributos holónicos, según se especificó en el Capítulo 5. Con ese propósito se define la siguiente metodología experimental, la cual se valida posteriormente en la sección 6.7.6 a partir de la definición de diferentes hipótesis para cada uno de los atributos y la validación experimental de dichas hipótesis:

Metodología experimental

1. Definir misiones en un período de 24 horas para cada experimento.
2. Programar la producción y formar las holarquías.
3. Generar fallas o degradar la capacidad de los recursos. Reprogramar la producción.
4. Registrar los eventos.

Se ilustra en detalle el Experimento No.1. De los experimentos restantes se presentan los resultados en el capítulo de anexos.

Experimento 1

6.6.1. Asignación de misiones en un período de 24 horas

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Misión (MW)	0	0	0	0	90	90	100	150	150	250	250	450
Periodo	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Misión (MW)	450	450	450	450	450	350	350	350	350	200	200	0

Cuadro 6.11: Misiones-Periodo de 24 horas

6.6.2. Programación de la producción y formación de holarquías

Información Ingeniería de los holones

Holón	Costo (USD/MW)	Capacidad Mínima (MW)	Capacidad Máxima (MW)	Confiabilidad (%)
Turbo Gas 1 (TG1)	1000	100	15	80
Turbo Gas 2 (TG2)	1100	100	15	80
Turbo Gas 3 (TG3)	1200	100	15	90
Turbo Gas 4 (TG4)	1300	100	15	70
Turbo Vapor 1 (TV1)	400	100	10	90
turbo Vapor 2 (TV2)	500	100	10	80

Cuadro 6.12: Datos de Ingeniería de los holones

Condiciones iniciales (Estado inicial de los recursos)

Holón/Recurso	Estado
TG1	1
TG2	1
TG3	1
TG4	1
TV1	1
TV2	1
HRSG1	1
HRSG2	1
HRSG3	1
HRSG4	1

Cuadro 6.13: Estado inicial de los recursos

Estado inicial de las condiciones:

- T5 no disponible. Todas las demás conexiones disponibles.

A partir de éste estado y de las ofertas recibidas, se define el marcaje inicial. El aplicativo TermoLocha entrega el programa de producción que se muestra en el cuadro 6.14.

Holarquías

- H1: TG3+TG4+TV2.
- H2: TG1+TG2+TV1.

Periodo	UP	TG1	TG2	TG3	TG4	TV1	TV2
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	90,00	25,00	25,00	20,00	20,00	0,00	0,00
6	90,00	25,00	25,00	20,00	20,00	0,00	0,00
7	100,00	20,00	20,00	15,00	15,00	20,00	13,33
8	150,00	36,67	36,67	15,00	15,00	36,67	13,33
9	150,00	36,67	36,67	15,00	15,00	36,67	13,33
10	250,00	70,00	70,00	15,00	15,00	70,00	13,33
11	250,00	70,00	70,00	15,00	15,00	70,00	13,33
12	450,00	100,00	100,00	50,00	50,00	100,00	50,00
13	450,00	100,00	100,00	50,00	50,00	100,00	50,00
14	450,00	100,00	100,00	50,00	50,00	100,00	50,00
15	450,00	100,00	100,00	50,00	50,00	100,00	50,00
16	450,00	100,00	100,00	50,00	50,00	100,00	50,00
17	450,00	100,00	100,00	50,00	50,00	100,00	50,00
18	350,00	100,00	100,00	16,67	16,67	100,00	16,67
19	350,00	100,00	100,00	16,67	16,67	100,00	16,67
20	350,00	100,00	100,00	16,67	16,67	100,00	16,67
21	350,00	100,00	100,00	16,67	16,67	100,00	16,67
22	200,00	53,33	53,33	15,00	15,00	53,33	13,33
23	200,00	53,33	53,33	15,00	15,00	53,33	13,33
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Cuadro 6.14: Programación de la producción

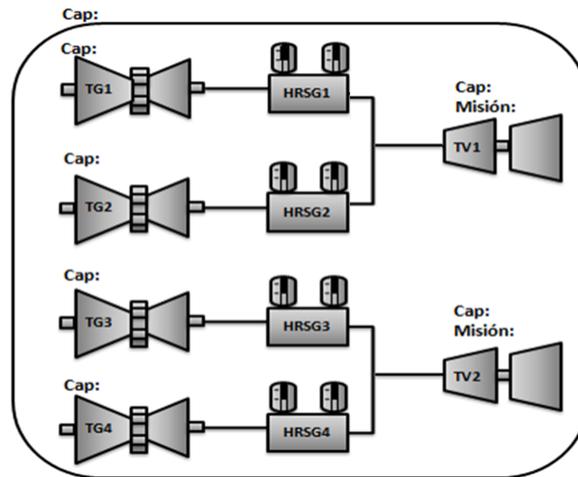


Figura 6.30: Formación de holarquías

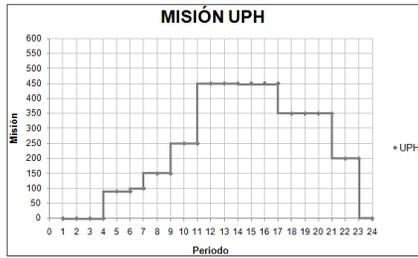
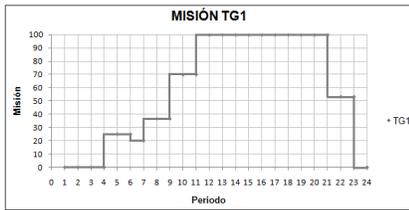
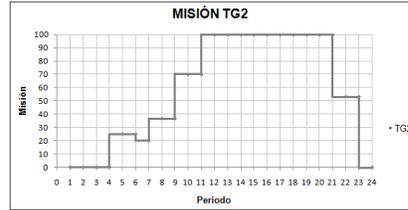


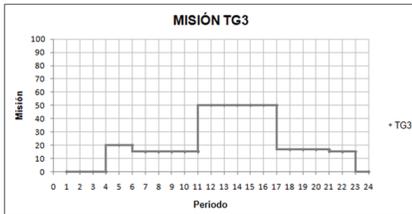
Figura 6.31: Misión UPH



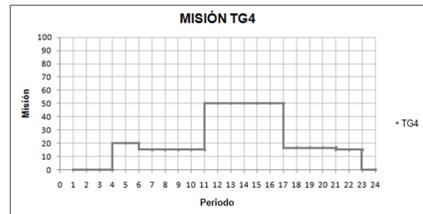
(a) Misión TG1



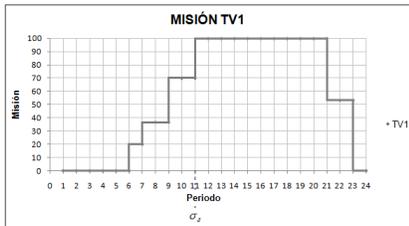
(b) Misión TG2



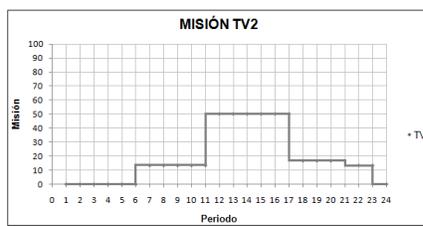
(c) Misión TG3



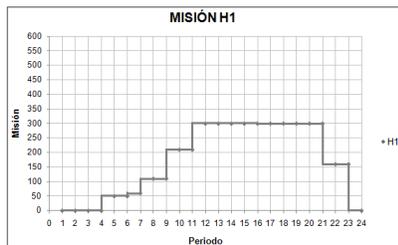
(d) Misión TG4



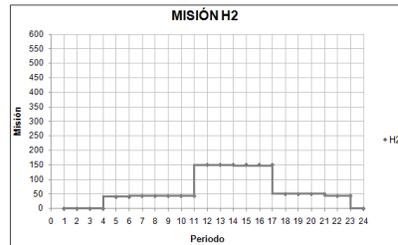
(e) Misión TV1



(f) Misión TV2



(g) Misión H1



(h) Misión H2

Figura 6.32: Misión Holones y Holarquías

6.6.3. Generación de fallas o degradación de la capacidad de los recursos. Reprogramación de la producción

Perturbación 1

Recurso fallado: TV1

Tipo de falla: operación degradada a 80 MW (durante 10 min).

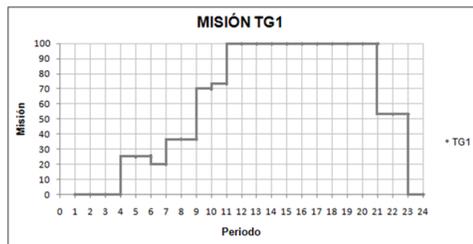
Período: 11

El aplicativo reprograma la producción para esta condición de falla, como se indica en el cuadro 6.15.

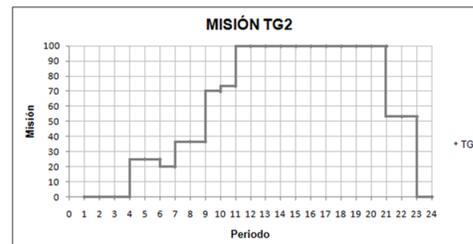
Periodo	UP	TG1	TG2	TG3	TG4	TV1	TV2
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	90,00	25,00	25,00	20,00	20,00	0,00	0,00
6	90,00	25,00	25,00	20,00	20,00	0,00	0,00
7	100,00	20,00	20,00	15,00	15,00	20,00	13,33
8	150,00	36,67	36,67	15,00	15,00	36,67	13,33
9	150,00	36,67	36,67	15,00	15,00	36,67	13,33
10	250,00	70,00	70,00	15,00	15,00	70,00	13,33
11	250,00	73,50	73,50	15,00	15,00	63,00	13,33
12	450,00	100,00	100,00	62,33	62,33	63,00	62,33
13	450,00	100,00	100,00	62,33	62,33	63,00	62,33
14	450,00	100,00	100,00	62,33	62,33	63,00	62,33
15	450,00	100,00	100,00	62,33	62,33	63,00	62,33
16	450,00	100,00	100,00	62,33	62,33	63,00	62,33
17	450,00	100,00	100,00	62,33	62,33	63,00	62,33
18	350,00	100,00	100,00	29,00	29,00	63,00	29,00
19	350,00	100,00	100,00	29,00	29,00	63,00	29,00
20	350,00	100,00	100,00	29,00	29,00	63,00	29,00
21	350,00	100,00	100,00	29,00	29,00	63,00	29,00
22	200,00	53,33	53,33	15,00	15,00	53,33	13,33
23	200,00	53,33	53,33	15,00	15,00	53,33	13,33
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Cuadro 6.15: Reprogramación de la producción I

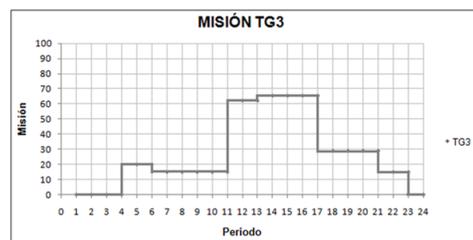
En la sección 6.4.1 se definieron las condiciones de operación degradada y las acciones de control correspondientes. Según esto se asumirá que el holón sólo permanecerá en dicho estado por 10 minutos.



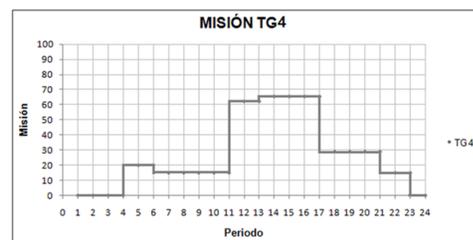
(a) Misión TG1 - nueva agenda



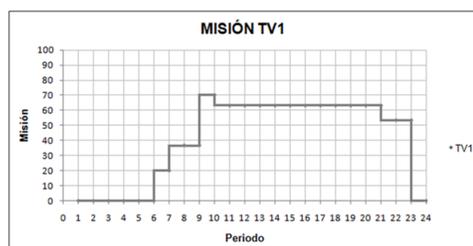
(b) Misión TG2 - nueva agenda



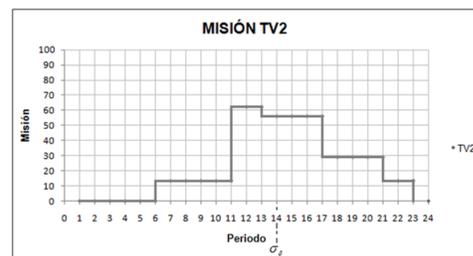
(c) Misión TG3 - nueva agenda



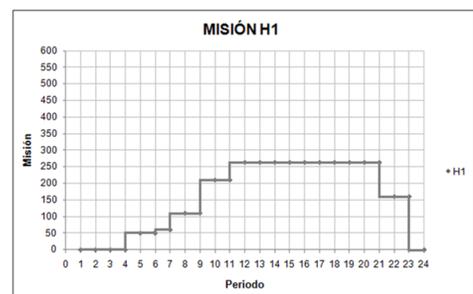
(d) Misión TG4 - nueva agenda



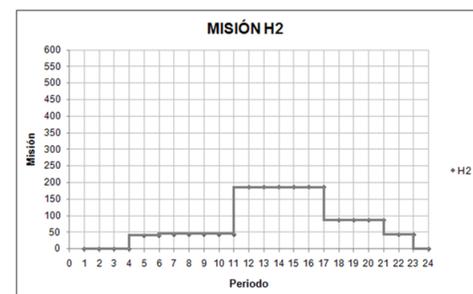
(e) Misión TV1 - nueva agenda



(f) Misión TV2 - nueva agenda



(g) Misión H1 - nueva agenda



(h) Misión H2 - nueva agenda

Figura 6.33: Misiones Holones y Holarquías (Nueva Agenda)

Perturbación 2

Recurso fallado: TV2

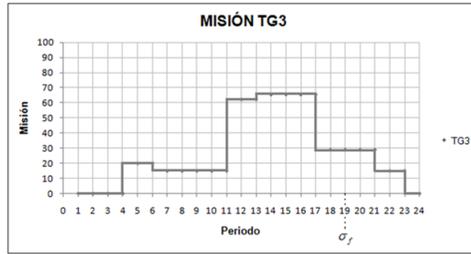
Tipo de falla: operación degradada a 60 MW (durante 10 minutos del mismo período)

Periodo: 14

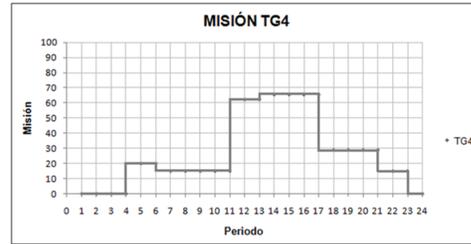
Nuevo programa de producción: Cuadro 6.16

Periodo	UP	TG1	TG2	TG3	TG4	TV1	TV2
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	90,00	25,00	25,00	20,00	20,00	0,00	0,00
6	90,00	25,00	25,00	20,00	20,00	0,00	0,00
7	100,00	20,00	20,00	15,00	15,00	20,00	13,33
8	150,00	36,67	36,67	15,00	15,00	36,67	13,33
9	150,00	36,67	36,67	15,00	15,00	36,67	13,33
10	250,00	70,00	70,00	15,00	15,00	70,00	13,33
11	250,00	73,50	73,50	15,00	15,00	63,00	13,33
12	450,00	100,00	100,0	62,33	62,33	63,00	62,33
13	450,00	100,00	100,00	62,33	62,33	63,00	62,33
14	450,00	100,00	100,00	65,58	65,58	63,00	56,09
15	450,00	100,00	100,00	65,58	65,58	63,00	56,09
16	450,00	100,00	100,00	65,58	65,58	63,00	56,09
17	450,00	100,00	100,00	65,58	65,58	63,00	56,09
18	350,00	100,00	100,00	29,00	29,00	63,00	29,00
19	350,00	100,00	100,00	29,00	29,00	63,00	29,00
20	350,00	100,00	100,00	29,00	29,00	63,00	29,00
21	350,00	100,00	100,00	29,00	29,00	63,00	29,00
22	200,00	53,33	53,33	15,00	15,00	53,33	13,33
23	200,00	53,33	53,33	15,00	15,00	53,33	13,33
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

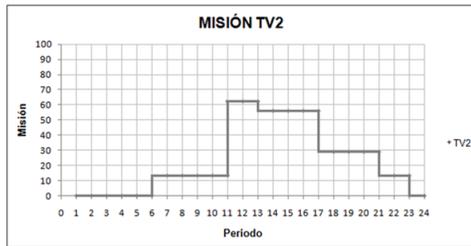
Cuadro 6.16: Reprogramación de la producción II



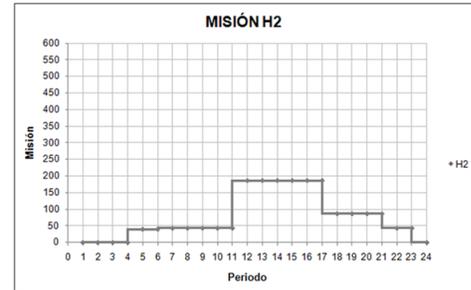
(a) Misión TG3 - nueva agenda



(b) Misión TG4 - nueva agenda



(c) Misión TV2 - nueva agenda



(d) Misión H2 - nueva agenda

Figura 6.34: Misiones Holones y Holarquías (Nueva Agenda II)

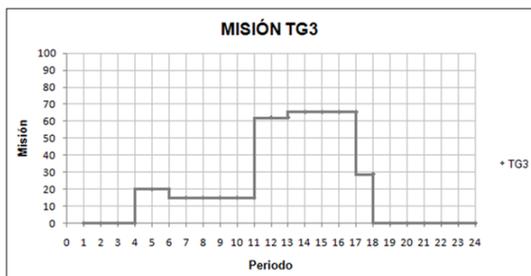
Perturbación 3

Recurso fallado: TG3

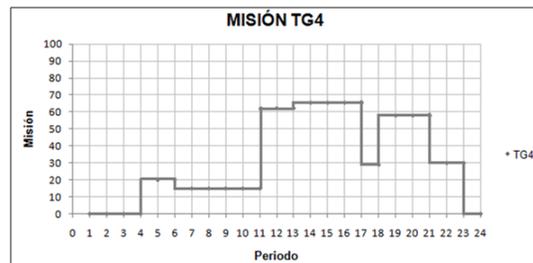
Tipo de falla: Salida definitiva del recurso - ingreso a mantenimiento.

Periodo: 19

Nuevo programa de producción: Cuadro 6.17.



(a) Misión TG3 - nueva agenda



(b) Misión TG4 - nueva agenda

Figura 6.35: Misiones Holones y Holarquías (Nueva Agenda III)

Periodo	UP	TG1	TG2	TG3	TG4	TV1	TV2
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	90,00	25,00	25,00	20,00	20,00	0,00	0,00
6	90,00	25,00	25,00	20,00	20,00	0,00	0,00
7	100,00	20,00	20,00	15,00	15,00	20,00	13,33
8	150,00	36,67	36,67	15,00	15,00	36,67	13,33
9	150,00	36,67	36,67	15,00	15,00	36,67	13,33
10	250,00	70,00	70,00	15,00	15,00	70,00	13,33
11	250,00	73,50	73,50	15,00	15,00	63,00	13,33
12	450,00	100,00	100,00	62,33	62,33	63,00	62,33
13	450,00	100,00	100,00	62,33	62,33	63,00	62,33
14	450,00	100,00	100,00	65,58	65,58	63,00	56,09
15	450,00	100,00	100,00	65,58	65,58	63,00	56,09
16	450,00	100,00	100,00	65,58	65,58	63,00	56,09
17	450,00	100,00	100,00	65,58	65,58	63,00	56,09
18	350,00	100,00	100,00	29,00	29,00	63,00	29,00
19	350,00	100,00	100,00	0,00	58,00	63,00	29,00
20	350,00	100,00	100,00	0,00	58,00	63,00	29,00
21	350,00	100,00	100,00	0,00	58,00	63,00	29,00
22	200,00	53,33	53,33	0,00	30,00	53,33	13,33
23	200,00	53,33	53,33	0,00	30,00	53,33	13,33
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Cuadro 6.17: Reprogramación de la producción III

6.6.4. Registro de eventos del experimento 1

En el cuadro 6.18 se muestra el resumen de los experimentos realizados. Sobre los resultados de estos experimentos se definen las métricas para evaluar los atributos holónicos y probar las hipótesis. El cuadro completo de los eventos registrados en los experimentos se presenta en el Anexo 2.

6.6.5. Reprogramación de la producción

Para ilustrar la propuesta para la reprogramación de la producción y el esquema de respuesta a las perturbaciones, se detallan los resultados del experimento No. 2, relacionados con la reprogramación.

La central se encuentra operando con la configuración que se muestra en la Figura 6.36

Experimento	No. Falla	Período	Recurso fallado	Tipo falla
2	1	4	TG3	σ_d
	2	10	TG4	σ_f
	3	17	TV1	σ_f
3	1	5	TG2	σ_δ
	2	12	T3	σ_f
	3	21	TG4	σ_f
4	1	7	TG4	σ_f
	2	10	TV1	σ_δ
	3	14	TG1	σ_d
	4	19	HRS2	σ_f
5	1	3	HRS2	σ_f
	2	10	TG3	σ_δ
	3	15	TV2	σ_f
6	1	4	TV2	σ_d
	2	9	TV1	σ_f
	3	14	T3	σ_f
	4	20	TG4	σ_d

Cuadro 6.18: Resumen - Experimentos realizados

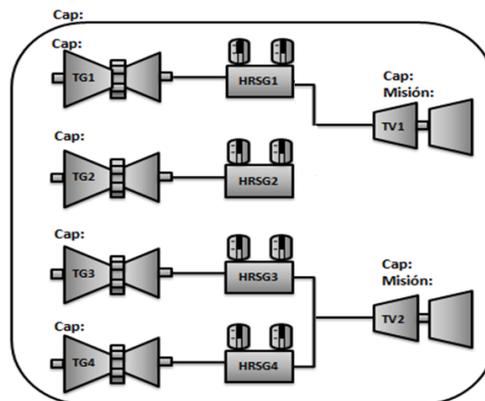


Figura 6.36: Configuración de la central

El modelo en PN de la UPH, en el cual las holarquías son definidas como recursos se presenta en la Figura 6.37. El árbol de alcanzabilidad generado a partir del modelo en PN se muestra en la Figura 6.38.

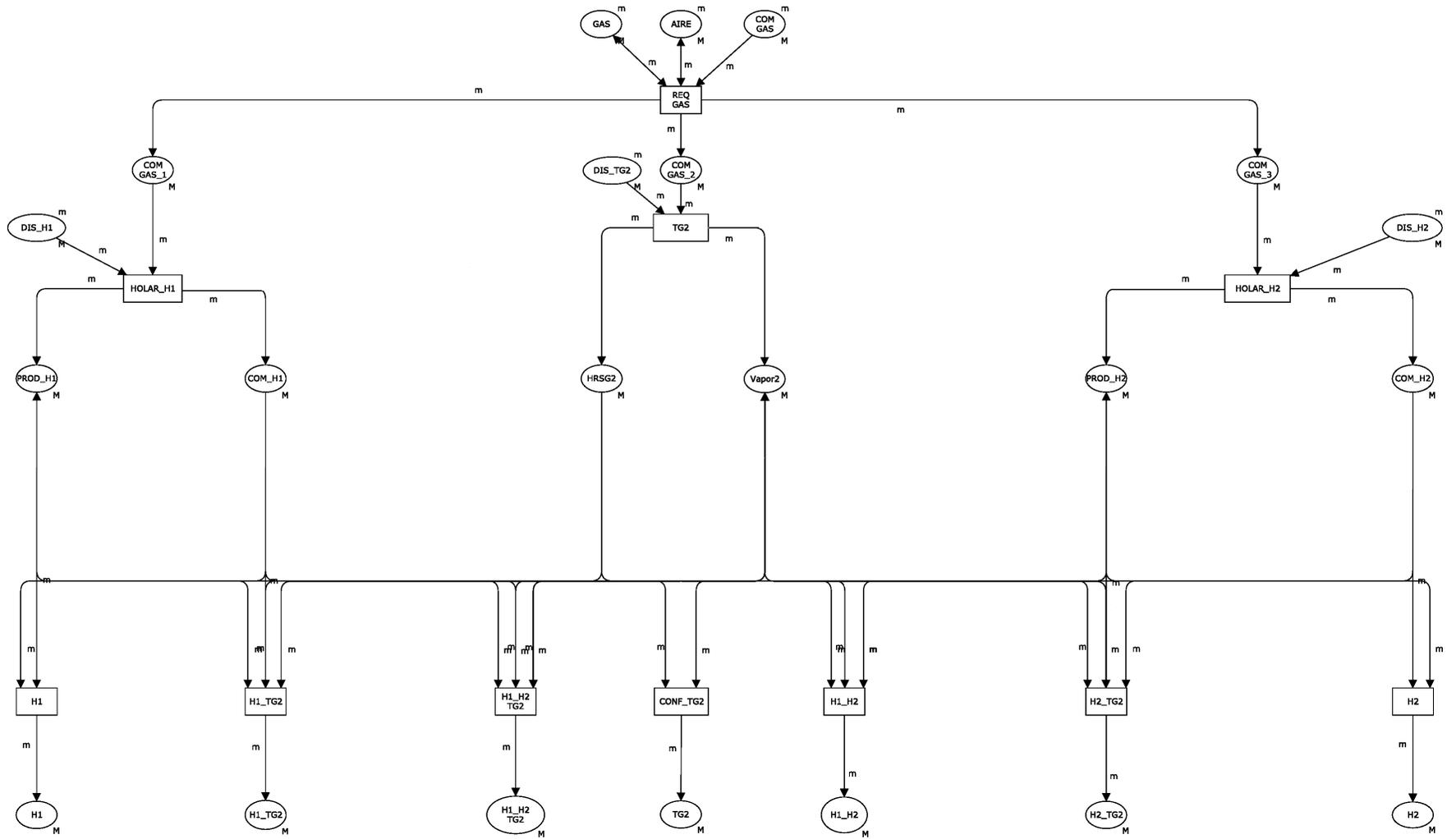


Figura 6.37: Modelo PN de la UPH

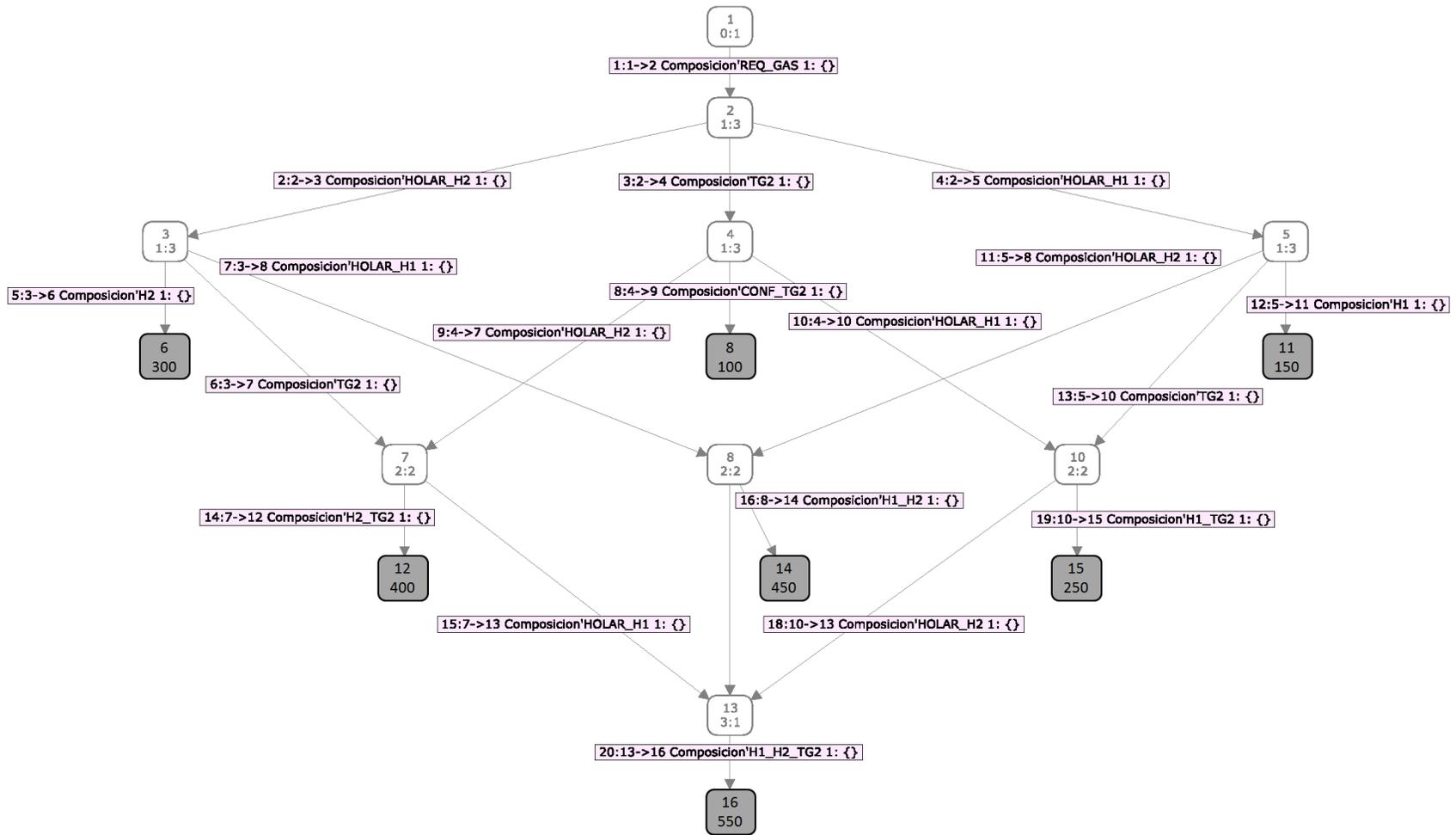


Figura 6.38: Árbol de alcanzabilidad. UPH con holarquías

Descripción del experimento

En el período 10 se presenta una falla permanente en la TG4. En cumplimiento de lo establecido en el esquema de respuesta a las perturbaciones, la holarquía intenta resolver la falla. Para ello se utiliza la PN de la Figura 6.39 y el árbol de alcanzabilidad de la Figura 6.40. La holarquía debe reconfigurarse para atender una misión de 300 MW en los períodos 18, 19, 20, 21.

En la Figura 6.39 se indican los estados y trayectorias prohibidas debido a la falla de TG4 y así mismo, las capacidades de los nodos que conducen a estados de operación permitidos. Es claro que el nodo 22 tiene una capacidad de 150 MW, lo que implica que la holarquía no puede atender la perturbación y propaga el evento a la UPH. En el proceso de renegociación intervienen la holarquía fallada y los demás holones y holarquías, por tanto, el árbol que se genera para ese proceso es el que se observa en la Figura 6.41.

La holarquía fallada presenta como oferta su máxima capacidad disponible, que para el caso equivale a 150 MW (Ver Figura 6.41). La UPH debe reconfigurarse para atender la misión máxima de 460 MW en el período 21.

Como se observa en la Figura 6.41, solo el nodo 16 es de terminación satisfactoria, sin embargo su capacidad es de 400 MW y no sería posible cumplir la misión en el período 21.

Debido a la recursividad del esquema de respuesta a las perturbaciones, la UPH propaga el evento de probable incumplimiento hacia la UPH mayor que la contiene y solicita renegociar la misión.

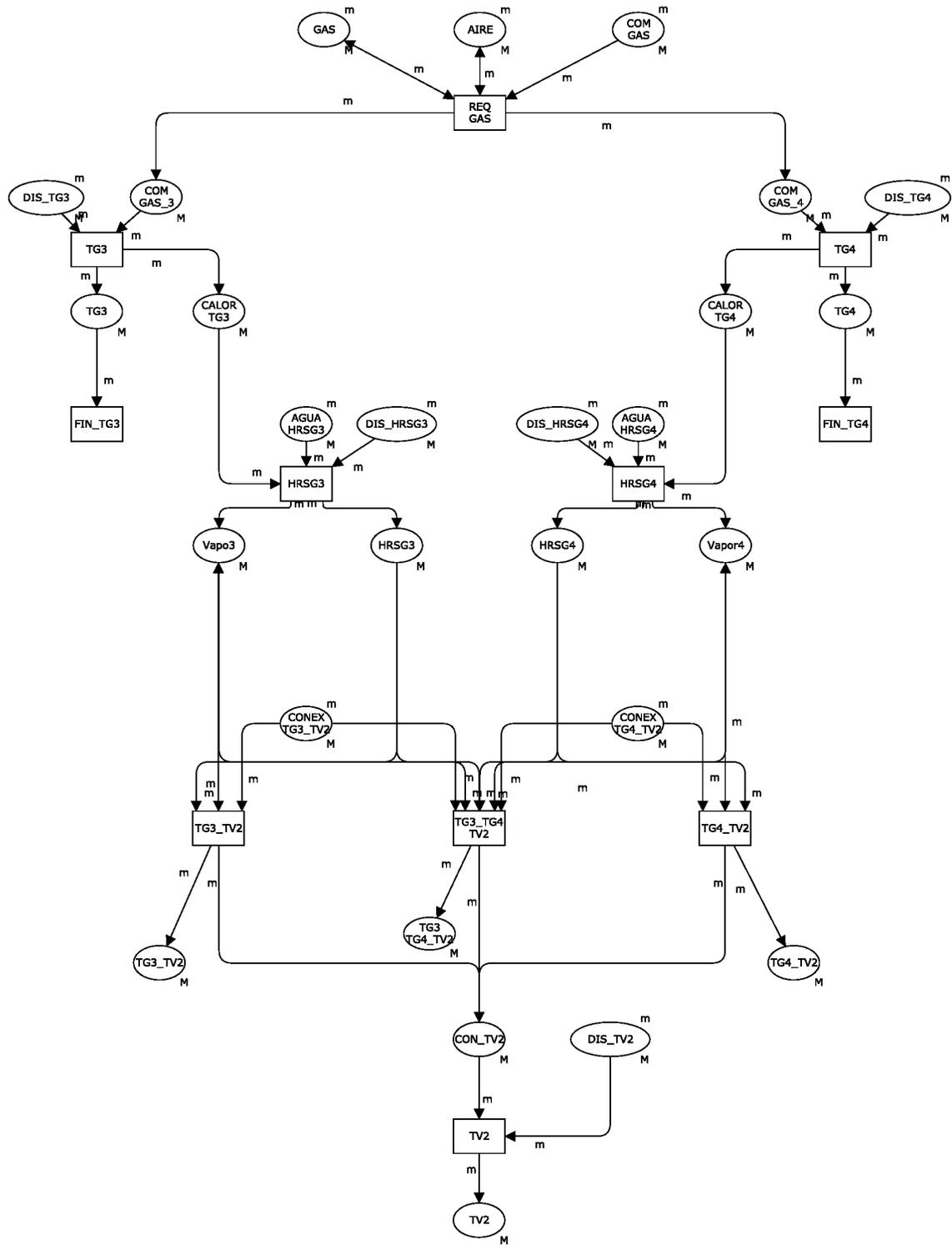


Figura 6.39: Modelo PN de la holarquía H2

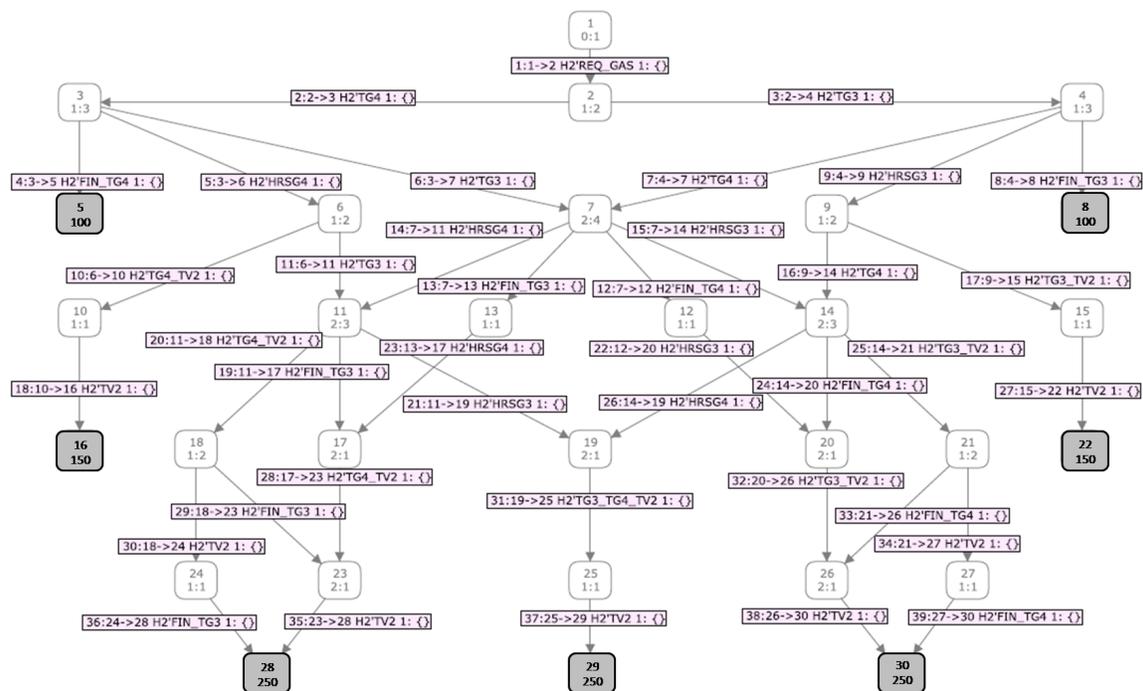


Figura 6.40: Árbol de alcanzabilidad de H2

Asumiendo que la UPH recibe una nueva reprogramación de su agenda con un valor máximo de 400 MW, se aplica el protocolo de negociación y los criterios de optimización para distribuir las misiones al interior de la UPH. La reprogramación de la producción obtenida es la que se muestra en el Cuadro 6.19 y con ella la holarquía y la UPH atienden la falla.

El tiempo de procesamiento empleado por el aplicativo para calcular el nuevo programa de producción fue de 87 ms.

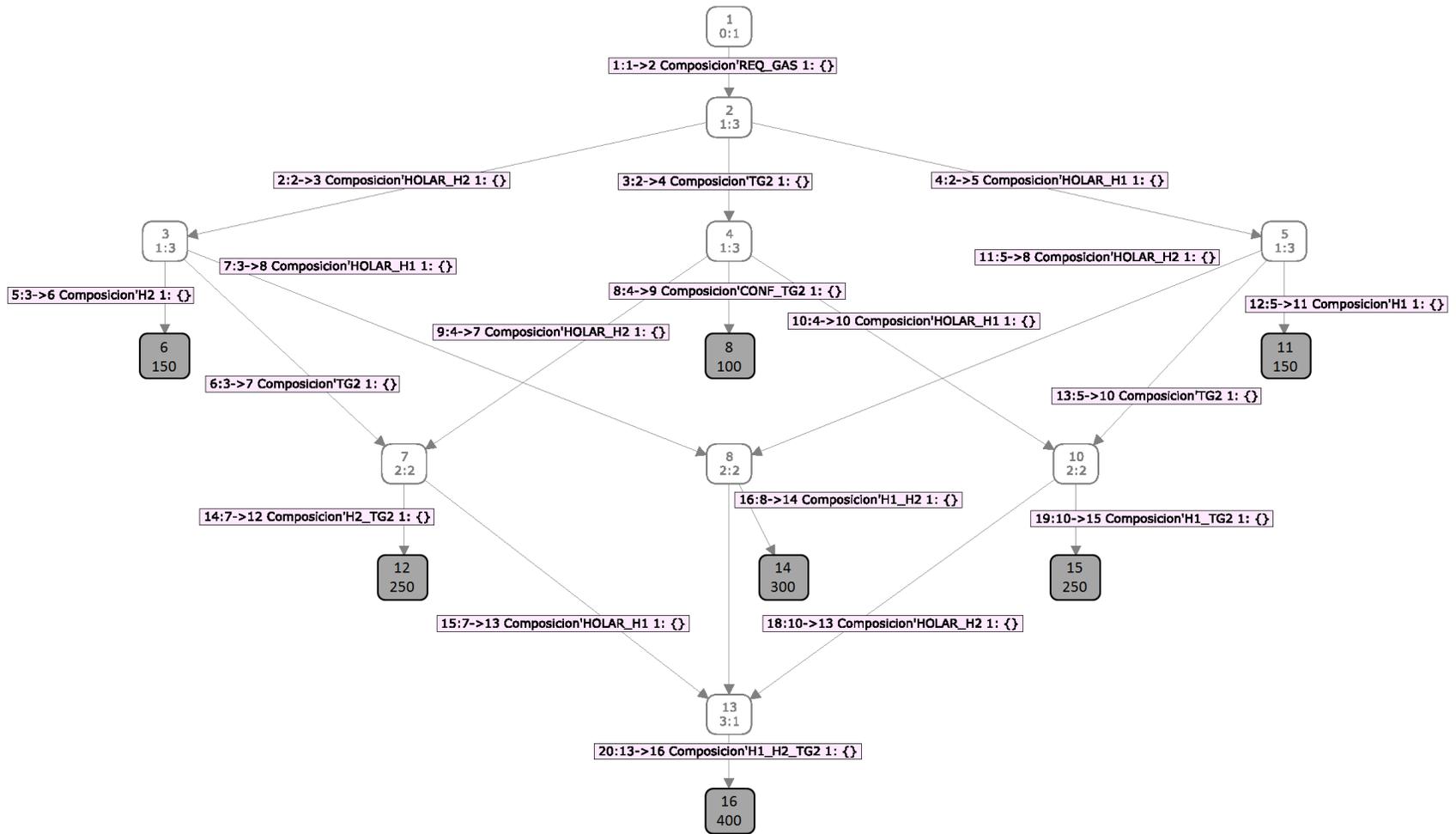


Figura 6.41: Nuevo árbol de la UPH después de la falla

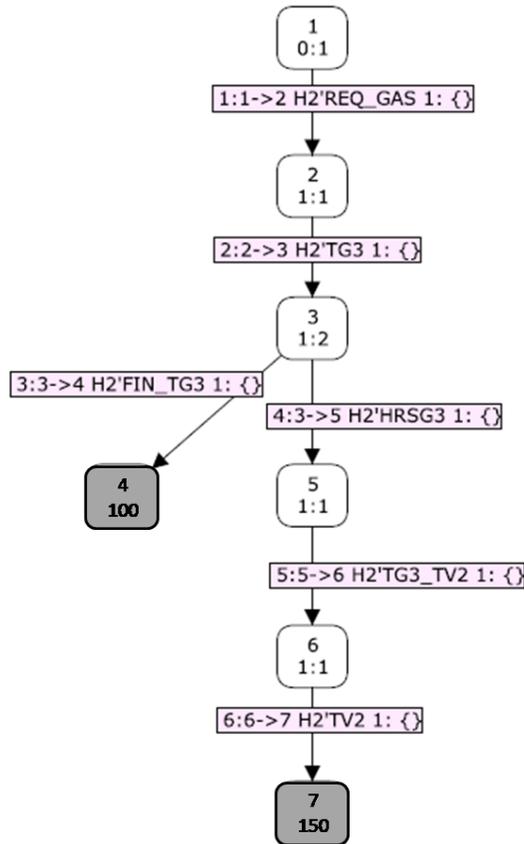


Figura 6.42: Nuevo árbol de H2 con capacidades después de la falla

6.6.6. Validación de la hipótesis

Atributo Autonomía - Métrica 1

Hipótesis nula: El número medio de intervenciones del supervisor centralizado es igual que el número medio de intervenciones del supervisor de la UPH.

Hipótesis alternativa: El número medio de intervenciones del supervisor centralizado es mayor que el número medio de intervenciones del supervisor de la UPH.

Variable a medir: Número de intervenciones (suma de eventos controlables y no controlables).

Donde:

S_c y S_{nc} : son las secuencias de eventos controlables y no controlables y $|S_c|$ y $|S_{nc}|$, sus respectivas longitudes.

ne : es el número de experimentos.

Así, según la hipótesis planteada se tiene:

$$\frac{|S_{c_s1}| + |S_{nc_s1}|}{ne} = \frac{|S_{c_s2}| + |S_{nc_s2}|}{ne}$$

Determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre los dos enfoques de supervisión utilizados:

Periodo	UP	TG1	TG2	TG3	TG4	TV1	TV2
1	312,00	97,00	15,00	100,00	100,00	0,00	0,00
2	312,00	97,00	15,00	100,00	100,00	0,00	0,00
3	312,00	20,00	15,00	89,00	89,00	10,00	89,00
4	312,00	20,00	15,00	85,00	85,00	10,00	85,00
5	312,00	20,00	15,00	93,00	93,00	10,00	93,00
6	312,00	20,00	15,00	89,00	89,00	10,00	89,00
7	312,00	20,00	15,00	89,00	89,00	10,00	89,00
8	312,00	20,00	15,00	89,00	89,00	10,00	89,00
9	312,00	20,00	15,00	89,00	89,00	10,00	89,00
10	312,00	98,00	15,00	100,00	0,00	49,00	50,00
11	312,00	98,00	15,00	100,00	0,00	49,00	50,00
12	312,00	98,00	15,00	100,00	0,00	49,00	50,00
13	312,00	98,00	15,00	100,00	0,00	49,00	50,00
14	312,00	98,00	15,00	100,00	0,00	49,00	50,00
15	312,00	98,00	15,00	100,00	0,00	49,00	50,00
16	312,00	98,00	15,00	100,00	0,00	49,00	50,00
17	312,00	98,00	15,00	100,00	0,00	49,00	50,00
18	360,00	100,00	60,00	100,00	0,00	50,00	50,00
19	400,00	100,00	100,00	100,00	0,00	50,00	50,00
20	380,00	100,00	80,00	100,00	0,00	50,00	50,00
21	400,00	100	100,00	100,00	0,00	50,00	50,00
22	335,00	100,00	35,00	100,00	0,00	50,00	50,00
23	312,00	98,00	15,00	100,00	0,00	49,00	50,00
24	312,00	98,00	15,00,	100,00	0,00	49,00	50,00

Cuadro 6.19: Reprogramación de la producción - Nueva agenda UPH

Experimento	S1 (Sistema centralizado)			S2 (UPH)		
	S_c	S_{nc}	TOTAL	S_c	S_{nc}	TOTAL
1	49	6	55	4	2	6
2	41	7	48	10	6	16
3	65	5	70	6	4	10
4	50	7	57	8	4	12
5	38	7	45	7	5	12
6	49	7	56	2	0	2
$ S_{c_s1} + S_{nc_s1} $			331	$ S_{c_s2} + S_{nc_s2} $		58
$\frac{ S_{c_s1} + S_{nc_s1} }{ne}$			55,17	$\frac{ S_{c_s2} + S_{nc_s2} }{ne}$		9,67

Cuadro 6.20: Registro de eventos - Autonomía - Métrica 1

Número de intervenciones centralizado media: $(|S_{c_s1}| + |S_{nc_s1}|) / ne = 55,17$.

Número de intervenciones holónico media: $(|S_{c_s2}| + |S_{nc_s2}|) / ne = 9,67$.

Nivel de significancia: $\alpha = 0,05$

Asumiendo que las varianzas de ambos tratamientos son iguales y desconocidas, una prueba estadística apropiada es el uso del estadístico t_0 . Este estadístico se calcula de la siguiente forma:

$$t_0 = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \text{ con } S_p^2 = \frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}$$

La prueba estadística consiste en lo siguiente: $t_0 > t_t$ se rechaza la hipótesis nula. Con $t_t = t_{\alpha, v}$ y $v = n_1 + n_2 - 2 = 10$

Así se tiene lo siguiente:

$$S_p = 7,09$$

$$t_0 = 11,12$$

$$t_{0,05, 10} = 1,81246$$

Es claro que: $11,12 > 1,81246$ por lo que se rechaza la hipótesis nula, y se afirma con una confianza del 95 % que el número medio de intervenciones del sistema S_1 es mayor que el número medio de intervenciones del sistema S_2 .

Lo anterior permite concluir que en el enfoque holónico, la autonomía del sistema medida desde el número de intervenciones del supervisor de orden superior es mucho mayor, comparado con un enfoque jerárquico-centralizado, comprobando que el paradigma holónico distribuye la supervisión y por tanto se afirma que el sistema cuya arquitectura es holónica (S_2) maneja un grado superior de autonomía que el sistema cuya arquitectura es centralizada (S_1).

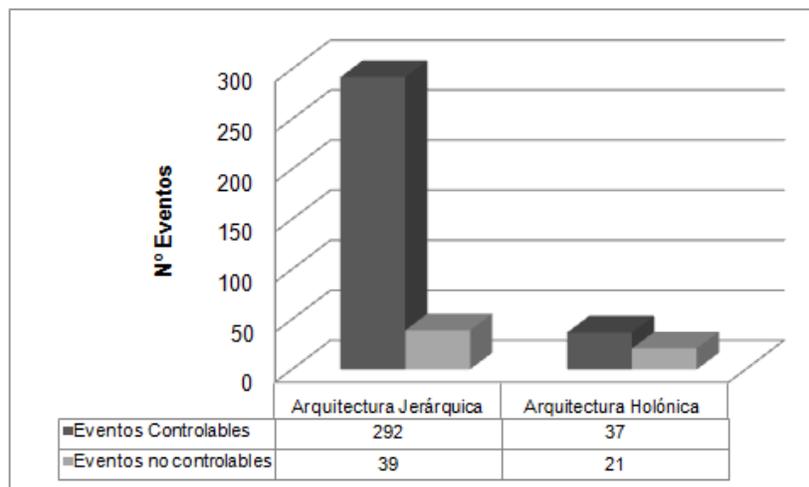


Figura 6.43: Número de eventos registrados para cada una de las arquitecturas estudiadas

Atributo Autonomía - Métrica 2

Hipótesis nula: El número medio de eventos no controlables de un nivel inferior es igual que el número medio de eventos no controlables propagados hacia el supervisor del nivel inmediatamente superior.

Hipótesis alternativa: El número medio de eventos no controlables de un nivel inferior es mayor que el número medio de eventos no controlables propagados hacia el supervisor del nivel inmediatamente superior.

Variable a medir: Número de eventos no controlables.

En el Cuadro 6.21 se presentan los eventos no controlables en cada uno de los niveles de decisión holónica. En la columna *observaciones* se establece el atributo mediante el cual se resuelve la perturbación y el respectivo nivel de decisión.

Para el conteo de eventos, se define la siguiente notación:

Sea:

S : una secuencia de eventos.

np_i : número de perturbaciones en el nivel i .

np_{ij} : número de perturbaciones que escalan del nivel i al nivel j (siendo $j=i+1$).

$n(\sigma, S)$: el número de ocurrencias del evento σ en la secuencia S .

Así, para la hipótesis planteada y según los diferentes niveles de profundidad de la estructura se tiene:

Sea i el nivel de profundidad en la arquitectura holónica planteadas con $i = 1, 2, 3, 4$.

Siendo $i = 1$ el nivel holón.

$$\frac{|S_{nc_i}|}{np_{12}} > \frac{|S_{nc_j}|}{np_{12}}$$

Se puede afirmar entonces que un sistema holónico bajo la arquitectura propuesta es más autónomo en la medida que las perturbaciones se resuelven en el nivel de la estructura donde se generan.

Aplicando el procedimiento anterior se debe determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre niveles de supervisión (holón, holarquía, Unidad de producción holónica) en cuanto al grado de autonomía manejado.

Bajo la siguiente consideración se realiza la validación estadística:

Consideración 1: Para el nivel 1 de la arquitectura (holón), la autonomía está sujeta a restricciones físicas y operacionales, por lo que la autonomía a este nivel se presenta ocasionalmente, y por lo general en aquellos casos donde el holón no pertenece a una holarquía o para determinadas configuraciones.

Por lo tanto la prueba comparativa se realizará entre el nivel 2 y 3 de la estructura así:

$$\frac{|S_{nc_2}|}{np_{12}} > \frac{|S_{nc_3}|}{np_{12}}$$

Con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$ y por tanto una confianza del 95 %, aplicando una prueba estadística a partir del estadístico t_0 se tiene:

Experimento	Periodo	S_{nc}	S_{nc_h}	S_{nc_H}	S_{nc_UPH}	Observaciones
1	11	σ_{δ_TV1}	$\sigma_{d_H2};$ $\widehat{\sigma}_{\psi_H2}$	$\sigma_{d_UP};$ σ_{sr}	ε	Autonomía a nivel de la UPH
	14	σ_{δ_TV2}	σ_{d_H1}	ε	ε	Autonomía a nivel de la holarquía.
	19	σ_{f_TG3}	σ_{δ_H1}	ε	ε	Autonomía a nivel de la holarquía
2	4	σ_{d_TG3}	$\sigma_{dp_H2};$ $\sigma_{d_H2};$ σ_{ψ_H2}	ε	ε	Autonomía a nivel de la holarquía.
	10	σ_{f_TG4}	$\sigma_{\delta_H2};$ σ_{ψ_H2}	$\sigma_{\delta_UP};$ $\sigma_{sr};$ $\widehat{\sigma}_{\psi_UP}$	σ_{sr}	Se resuelve por fuera de la UPH.
	17	σ_{f_TV1}	$\sigma_{\delta_H1};$ σ_{ψ_H1}	$\sigma_{d_UP};$ $\sigma_{sr};$ $\widehat{\sigma}_{\psi_UP}$	σ_{sr}	Se resuelve por fuera de la UPH.
3	5	σ_{δ_TG2}	$\sigma_{d_H2};$ σ_{δ_H2} $\widehat{\sigma}_{\psi_H2};$ σ_{ψ_H2}	$\sigma_{d_UP};$ σ_{sr}	ε	Autonomía a nivel de la UPH
	12	-	σ_{f_TG3}	ε	ε	Autonomía a nivel de la holarquía.
	21	σ_{f_TG4}	-	σ_{δ_UP}	ε	Autonomía a nivel de la UPH-TG4 no pertenece a ninguna holarquía
4	7	σ_{f_TG4}	-	σ_{d_UP}	ε	Autonomía a nivel de la UPH-TG4 no pertenece a ninguna holarquía
	10	σ_{δ_TV1}	σ_{dp_H2} $\sigma_{d_H2};$ σ_{ψ_H2}	σ_{sr}	ε	Autonomía a nivel de la UPH
	14	σ_{d_TG1}	ε	ε	ε	Autonomía a nivel del holón
	19	-	σ_{f_HRSG2} σ_{ψ_H1}	$\sigma_{\delta_UP};$ σ_{ψ_H1}	ε	Autonomía a nivel de la UPH

Experimento	Periodo	S_{nc}	S_{nc_h}	S_{nc_H}	S_{nc_UPH}	Observaciones
5	3	-	$\sigma_{f_HRSG2};$ σ_{d_H1}	ε	ε	Autonomía a nivel de la holarquía
	10	σ_{δ_TG3}	$\sigma_{dp_H1};$ $\sigma_{d_H1};$ σ_{ψ_H1}	$\sigma_{d_UP};$ $\sigma_{sr};$ σ_{ψ_UP}	σ_{sr}	Se resuelve por fuera de la UPH
	15	σ_{f_TV2}	$\sigma_{\delta_H2};$ $\widehat{\sigma}_{\psi_H2}$	$\sigma_{d_UP};$ σ_{sr}	ε	Autonomía a nivel de la UPH
6	4	σ_{d_TV2}	$\sigma_{dp_H1};$ σ_{d_H1}	ε	ε	Autonomía a nivel de la holarquía
	9	σ_{f_TV1}	σ_{δ_H1}	ε	ε	Autonomía a nivel de la holarquía
	14	-	$\sigma_{f_TG3};$ σ_{d_H1}	ε	ε	Autonomía a nivel de la holarquía
	20	σ_{d_TG4}	ε	ε	ε	Autonomía a nivel del holón
Autonomía _nivel 1	$ S_{nc} $	16				
	$\frac{ S_{nc} }{np_1}$	1				
Autonomía _nivel 2	$ S_{nc_h} $		33			
	$\frac{ S_{nc_h} }{np_{12}}$		2.06			
Autonomía _nivel 3	$ S_{nc_H} $			20		
	$\frac{ S_{nc_H} }{np_{12}}$			1.25		

Cuadro 6.21: Registro de eventos - Autonomía - Métrica 2

Nivel i		
1	$\frac{ S_{nc} }{np_1}$	1
2	$\frac{ S_{nc_h} }{np_{12}}$	2.06
3	$\frac{ S_{nc_H} }{np_{12}}$	1.25

Cuadro 6.22: Número de eventos no controlables en cada uno de los niveles definidos

Sí $t_0 > t_t$ se rechaza la hipótesis nula. Con $t_t = t_{\alpha, v}$ y $v = n_1 + n_2 - 2 = 38$.

$$S_p = 1,36$$

$$t_0 = 2,13$$

$$t_{0,05, 38} = 1,68595$$

Es claro que: $2,13 > 1,68595$ por lo que se rechaza la hipótesis nula, y por tanto se afirma que el sistema holónico bajo la arquitectura propuesta es autónomo, considerando en la prueba los niveles de holarquía y UPH.

Atributo Cooperación - Métrica 1

Variable a medir: Número de intervenciones, según las siguientes consideraciones, presentadas en la sección 6.5:

- I. Las perturbaciones que no se pueden resolver mediante autonomía por los holones, son las fallas permanentes y las de operación degradada que generan incumplimiento o probable incumplimiento.
- II. Sea un S_1 un sistema con supervisor centralizado, que actúa como sistema de control y sea S_2 un sistema con una arquitectura de supervisión holónica. Se elige S_1 como sistema de control porque todas las perturbaciones requieren su intervención.

Se hará el conteo de intervenciones bajo las siguientes dos condiciones:

- Condición (a): Fallas que no se pueden resolver mediante autonomía, según se expresó en 1.
- Condición (b): Las fallas que cumplen la condición (a) son resueltas dentro de la Unidad de Producción Holónica.

Cumpliendo las condiciones (a) y (b) se tiene:

Hipótesis nula: El número medio de intervenciones del sistema S_2 es igual que el número medio de intervenciones de S_1 .

Hipótesis alternativa: El número medio de intervenciones del sistema S_2 es menor que el número medio de intervenciones de S_1 .

Hipótesis (cumpliendo condiciones a y b): Si el número de intervenciones del sistema S_2 es menor que el número de intervenciones de S_1 , implica que S_2 dispone de mecanismos de cooperación.

Para el conteo de eventos, se define la siguiente notación:

Sea:

S : Una secuencia de eventos.

$|S|$: La longitud de la secuencia de eventos.

n_{ab} : Número de veces que se dan las condiciones (a) y (b) simultáneamente.

Así, según la hipótesis alternativa planteada se tiene:

$$\frac{|S_{c_s_2}| + |S_{nc_s_2}|}{n_{ab}} < \frac{|S_{c_s_1}| + |S_{nc_s_1}|}{n_{ab}} - \text{Bajo condiciones a y b.}$$

En el Cuadro 6.24 se registran los eventos del experimento para la métrica de cooperación. En las columnas “condición (a)” y “condición (b)” se indica si el experimento cumple con las condiciones establecidas en la descripción del experimento de la métrica.

En la columna S_1 se registra el número de eventos no controlables recibidos por el supervisor centralizado y los controlables generados por este supervisor para resolver la perturbación.

En la columna S_2 se registran los eventos controlables y no controlables del supervisor de la unidad de producción.

Se pretende entonces afirmar con validez estadística que la arquitectura holónica dispone de mecanismos de cooperación, en la medida que las perturbaciones podrían ser resueltas al interior de cada uno de los niveles de supervisión, evitando que dichos eventos escalen al nivel superior de supervisión (nivel UPH). En comparación con un enfoque jerárquico, en cuyo caso toda perturbación debe ser resuelta a través del supervisor centralizado, que es el único con el que cuenta dicha estructura al no distribuir la función de supervisión.

Exp.	Per.	Condición a	Condición b	S_1		S_2		Observaciones
				$ S_c $	$ S_{nc} $	S_{c_H}	S_{nc_H}	
1	11	x	x	5	2	$\sigma_{\psi};$ σ_{ns}	$\sigma_{d};$ σ_{sr}	Cooperación entre holarquías a través del supervisor de la UPH
	14	x	x	5	2	ε	ε	Cooperación entre holones a través del supervisor de la holarquía.
	19	x	x	4	2	ε	ε	Cooperación entre holones a través del supervisor de la holarquía.

Exp.	Per.	Condición a	Condición b	S_1		S_2		Observaciones
				$ S_c $	$ S_{nc} $	S_{c_H}	S_{nc_H}	
2	4	x	x	3	1	ε	ε	Cooperación entre holones a través del supervisor de la holarquía.
	10	x	-	-	-	-	-	El evento sale de la UP.
	17	x	-	-	-	-	-	El evento sale de la UP.
3	5	x	x	6	2	$\sigma_\psi;$ σ_{ns}	$\sigma_d;$ σ_{sr}	Cooperación entre holarquías a través del supervisor de la UPH.
	12	x	x	5	1	ε	ε	Cooperación entre holones a través del supervisor de la holarquía.
	21	x	x	6	2	$\sigma_\psi;$ σ_{ns}	σ_δ	Cooperación entre holarquías a través del supervisor de la UPH.
4	7	x	x	6	2	$\sigma_\psi;$ σ_{ns}	σ_d	Cooperación entre holarquías a través del supervisor de la UPH.
	10	x	x	6	2	σ_ψ σ_{ns}	σ_{sr}	Cooperación entre holarquías a través del supervisor de la UPH.

Exp.	Per.	Condición a	Condición b	S_1		S_2		Observaciones
				$ S_c $	$ S_{nc} $	S_{c_H}	S_{nc_H}	
4	14	-	x	-	-	-	-	Autonomía del holón, no se cumple con la condición (a).
	19	x	x	5	2	$\sigma_{\psi};$ σ_{ns}	σ_{δ}	Cooperación entre holarquías a través del supervisor de la UPH.
5	3	x	x	5	2	ε	ε	Cooperación entre holones a través del supervisor de la holarquía.
	10	x	-	-	-	-	-	Cooperación entre holarquías a través del supervisor de la UPH.
	15	x	x	4	2	$\sigma_{\psi};$ σ_{ns}	$\sigma_d;$ σ_{sr}	Cooperación entre holarquías a través del supervisor de la UPH.
6	4	x	x	4	2	ε	ε	Cooperación entre holones a través del supervisor de la holarquía.
	9	x	x	4	2	ε	ε	Cooperación entre holones a través del supervisor de la holarquía.
	14	x	x	6	2	ε	ε	Cooperación entre holones a través del supervisor de la holarquía.

Exp.	Per.	Condición a	Condición b	S_1		S_2		Observaciones
				$ S_c $	$ S_{nc} $	S_{c_H}	S_{nc_H}	
6	20	-	x	-	-	-	-	Autonomía del holón, no se cumple con la condición (a).
		$ S_{c_S_1} + S_{nc_S_1} $			102			
		$\frac{ S_{c_S_1} + S_{nc_S_1} }{n_{ab}}$			6.80			
			$ S_{c_S_2} + S_{nc_S_2} $			24		
			$\frac{ S_{c_S_2} + S_{nc_S_2} }{n_{ab}}$			1.60		

Cuadro 6.23: Registro de eventos - Cooperación Métrica 1

Determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre los dos enfoques de supervisión utilizados a nivel de mecanismos de cooperación:

Número de intervenciones media $\frac{|S_{c_S_1}| + |S_{nc_S_1}|}{n_{ab}} = 6,80$

Número de intervenciones media $\frac{|S_{c_S_2}| + |S_{nc_S_2}|}{n_{ab}} = 1,60$

Nivel de significancia: $\alpha = 0,05$

Sí $-t_0 > t_t$ se rechaza la hipótesis nula. Con $t_t = t_{\alpha,v}$ y $v = n_1 + n_2 - 2 = 28$

Aplicando una prueba estadística a partir del estadístico t_0 se tiene:

$$S_p = 3,32$$

$$t_0 = -4,29$$

$$t_{0,05, 28} = 1,7011$$

Así es claro que: $4,29 > 1,70113$ por lo que se rechaza la hipótesis nula, y por tanto se afirma que el sistema cuya arquitectura es holónica (S_2) maneja mecanismos de cooperación dado que los holones que pertenecen a una misma holarquía pueden cooperar a través del supervisor de la misma.

Atributo Cooperación - Validación 2.

Bajo los siguientes resultados se pretende mostrar el número de veces que se activa el mecanismo de cooperación (independiente del nivel en el que se coopera) y establecer un porcentaje al compararlo con el número total de perturbaciones.

Suposiciones:

- a. El sistema coopera $\Leftrightarrow S = \sigma_r\sigma_{ns}$, es decir, se genera el evento de “Activar mecanismo de renegociación $-\sigma_r$ ” y se genera como consecuencia el evento “Reprogramar agendas $-\sigma_{ns}$ ”.
- b. Dado que no existe comunicación entre holones, la cooperación directa entre ellos no es posible.

Para la validación de la métrica se tiene la siguiente notación:

$n(\sigma_r\sigma_{ns}, S_{c_*})$: Número de ocurrencias de los eventos σ_r y σ_{ns} en la secuencia S_c a cualquier nivel, para el caso holarquía y UPH.

np : Número total de perturbaciones.

Así se calculará entonces: $\frac{n(\sigma_r\sigma_{ns},S_{c_*})}{np}$ A partir del registro del Cuadro 6.24 se tiene lo siguiente:

$$\frac{n(\sigma_r\sigma_{ns},S_{c_*})}{np} = \frac{15}{20} = 0,75$$

Se concluye entonces que el sistema cuenta con mecanismos de cooperación, resolviendo el 75 % de las perturbaciones haciendo uso de dicho mecanismo.

Exp.	Per.	σ_{r_h}	σ_{ns_h}	σ_{r_H}	σ_{ns_H}	Observaciones
1	11	-	-	x	x	Cooperación _UPH.
	14	x	x	-	-	Cooperación_ Holarquía.
	19	x	x	-	-	Cooperación_ Holarquía.
2	4	x	x	-	-	Cooperación_ Holarquía.
	10	-	-	x	x	Evento sale de la UPH.
	17	-	-	x	x	Evento sale de la UPH.
3	5	-	-	x	x	Cooperación_ UPH.
	12	x	x	-	-	Cooperación_ Holarquía.
	21	-	-	x	x	Cooperación_ _UPH.
4	7	-	-	x	x	Cooperación_ _UPH.
	10	-	-	x	x	Cooperación_ _UPH.
	14	-	-	-	-	Autonomía_ Holón.
	19	-	-	x	x	Cooperación_ _UPH.

Exp.	Per.	σ_{r_h}	σ_{ns_h}	σ_{r_H}	σ_{ns_H}	Observaciones
5	3	x	x	-	-	Cooperación_ Holarquía.
	10	-	-	-	-	Evento sale de la UPH.
	15	-	-	x	x	Cooperación_ _UPH.
6	4	x	x	-	-	Cooperación_ Holarquía
	9	x	x	-	-	Cooperación_ Holarquía.
	14	x	x	-	-	Cooperación_ Holarquía.
	20	-	-	-	-	Autonomía_ Holón.

Cuadro 6.24: Registro de eventos - Cooperación - Validación 2

Atributo Proactividad

Hipótesis nula: El número medio de eventos de “probable incumplimiento” es igual al número medio de eventos de “solicitud de renegociación”.

Hipótesis alternativa: El número medio de eventos de “probable incumplimiento” es diferente del número medio de eventos de “solicitud de renegociación”.

Variable a medir: Número de eventos.

Para la validación de la métrica se define la siguiente notación:

$n(\hat{\sigma}_{\psi}, S_{nc_*})$: número de ocurrencias del evento $\hat{\sigma}_{\psi}$ en la secuencia S_{nc} a cualquier nivel, para el caso holarquía y UPH.

$n(\sigma_{sr}, S_{c_*})$: número de ocurrencias de los eventos $\hat{\sigma}_{\psi}$ en la secuencia S_{nc} a cualquier

nivel, para el caso holarquía y UPH.

n_p : número total de perturbaciones.

Sea i el nivel de profundidad en la arquitectura holónica planteada con $i = 1, 2, 3, 4$.

Siendo $i = 2$ el nivel de la holarquía.

Número medio de eventos no controlables en cada uno de los niveles definidos (ver Cuadro 6.26).

En el Cuadro se indica en las respectivas columnas cuando se presenta un evento de probable incumplimiento en el holón, la holarquía o la unidad de producción y si se genera el evento de solicitud de renegociación.

Exp.	Per.	Holón		Holarquía		UP		Observaciones
		$\hat{\sigma}_{\psi}$	σ_{sr}	$\hat{\sigma}_{\psi_h}$	σ_{sr_h}	$\hat{\sigma}_{\psi_H}$	σ_{sr_H}	
1	11	-	-	x	x	-	-	Proactividad supervisor de la holarquía
	14	-	-	-	-	-	-	Perturbación resuelta por cooperación
	19	-	-	-	-	-	-	Perturbación resuelta por cooperación
2	4	-	-	-	-	-	-	Perturbación resuelta por cooperación
	10	-	-	-	-	x	x	Proactividad supervisor de la UPH
	17	-	-	-	-	x	x	Proactividad supervisor de la UPH

Exp.	Per.	Holón		Holarquía		UP		Observaciones
		$\hat{\sigma}_{\psi}$	σ_{sr}	$\hat{\sigma}_{\psi_h}$	σ_{sr_h}	$\hat{\sigma}_{\psi_H}$	σ_{sr_H}	
3	5	-	-	x	x	-	-	Proactividad supervisor de la holarquía
	12	-	-	-	-	-	-	Perturbación resuelta por cooperación
	21	-	-	-	-	-	-	Perturbación resuelta por cooperación
4	7	-	-	-	-	-	-	Perturbación resuelta por cooperación
	10	-	-	-	-	-	-	Perturbación resuelta por cooperación
	14	-	-	-	-	-	-	Resuelto por autonomía
	19	-	-	-	-	-	-	Perturbación resuelta por cooperación
5	3	-	-	-	-	-	-	Perturbación resuelta por cooperación
	10	-	-	-	-	x	x	Proactividad supervisor de la UPH
	15	-	-	x	x	-	-	Proactividad supervisor de la holarquía
6	4	-	-	-	-	-	-	Perturbación resuelta por cooperación
	9	-	-	-	-	-	-	Perturbación resuelta por cooperación
	14	-	-	-	-	-	-	Perturbación resuelta por cooperación
	20	-	-	-	-	-	-	Resuelto por autonomía

Exp.	Per.	Holón		Holarquía		UP		Observaciones
		$\hat{\sigma}_\psi$	σ_{sr}	$\hat{\sigma}_{\psi_h}$	σ_{sr_h}	$\hat{\sigma}_{\psi_H}$	σ_{sr_H}	
		$\frac{n(\hat{\sigma}_\psi, S_{nc_h})}{np}$		0,15				
		$\frac{n(\sigma_{sr}, S_{c_h})}{np}$			0,15			
		$\frac{n(\hat{\sigma}_\psi, S_{nc_H})}{np}$				0,15		
		$\frac{n(\sigma_{sr}, S_{c_H})}{np}$					0,15	

Cuadro 6.25: Registro de eventos - Proactividad

Nivel i				
2	$\frac{n(\hat{\sigma}_\psi, S_{nc_h})}{np}$	0,15	$\frac{n(\sigma_{sr}, S_{c_h})}{np}$	0,15
3	$\frac{n(\hat{\sigma}_\psi, S_{nc_H})}{np}$	0,15	$\frac{n(\sigma_{sr}, S_{c_H})}{np}$	0,15

Cuadro 6.26: Número medio de eventos no controlables en cada uno de los niveles definidos

Nivel de significancia: $\alpha = 0,05$

La prueba estadística consiste en lo siguiente: $|t_0| < t_t \Rightarrow$ se acepta la hipótesis nula.

Con $t_t = t_{v, \frac{\alpha}{2}}$ y $v = n_1 + n_2 - 2 = 38$.

$$S_p = 0,34$$

$$t_0 = 0,00$$

$$t_{0,025, 38} = 2,02439$$

Así es claro que: $0,00 < 2,228$ por lo que se acepta la hipótesis nula, y se afirma que el sistema bajo la arquitectura holónica propuesta es proactivo en la medida que se anticipa a incumplimientos y solicita la renegociación de la misión previamente asignada para el período en el cual se presentaría el incumplimiento.

Atributo Reactividad

Hipótesis nula: El número medio de eventos controlables es igual que el número medio de eventos no controlables.

Hipótesis alternativa: El número medio de eventos controlables es mayor que el número medio de eventos no controlables.

Variable a medir: Número de eventos.

Para validar la métrica se define la siguiente notación:

Sea:

$|S_{c_*}|$: longitud de la secuencia de eventos controlables.

$|S_{nc_*}|$: longitud de la secuencia de eventos no controlables.

np_i : número de perturbaciones de el nivel i .

Exp.	Per.	S_c	S_{nc}	S_{c_h}	S_{nc_h}	S_{c_H}	S_{nc_H}	Observaciones
1	11	σ_{op}	σ_{δ_TV1}	$\sigma_r;$ $\sigma_{ns};$ σ_{sr}	$\sigma_{d_H2};$ $\widehat{\sigma}_{\psi_H2}$	$\sigma_r;$ $\sigma_{ns};$ σ_l	$\sigma_{sr};$ σ_{d_UP}	Perturbación resuelta a nivel de la UPH
	14	σ_{op}	σ_{δ_TV2}	$\sigma_r;$ σ_{ns}	σ_{d_H1}	-	-	Perturbación resuelta a nivel de la holarquía
	19	$\sigma_{\mu};$ σ_a	σ_{f_TG3}	$\sigma_r;$ σ_{ns}	σ_{δ_H1}	-	-	Perturbación resuelta a nivel de la holarquía

Exp.	Per.	S_c	S_{nc}	S_{c_h}	S_{nc_h}	S_{c_H}	S_{nc_H}	Observaciones
2	4	σ_l	σ_{d_TG3}	$\sigma_r;$ σ_{ns}	$\sigma_{dp_H2};$ σ_{d_H2}	-	-	Perturbación resuelta a nivel de la holarquía
	10	$\sigma_\mu;$ σ_a	σ_{f_TG4}	σ_r $\sigma_{ns}; \sigma_{sr}$ σ_{ns}	$\sigma_{\delta_H2};$ σ_{ψ_H2}	$\sigma_r; \sigma_{ns};$ $\sigma_l; \sigma_{sr};$ $\sigma_{ns}; \sigma_l$	$\sigma_{sr};$ $\sigma_{\delta_UP};$ $\widehat{\sigma}_{\psi_UP}$	Perturbación resuelta por fuera de la UP
	17	$\sigma_\mu;$ σ_a	σ_{f_TV1}	$\sigma_r; \sigma_{ns}$	$\sigma_{\delta_H1};$ σ_{ψ_H1}	$\sigma_r; \sigma_{ns};$ $\sigma_l; \sigma_{sr};$ $\sigma_{ns}; \sigma_l$	$\sigma_{sr};$ $\sigma_{d_UP};$ $\widehat{\sigma}_{\psi_UP}$	Perturbación resuelta por fuera de la UP
3	5	σ_{op}	σ_{δ_TG2}	$\sigma_r; \sigma_{sr};$ σ_{ns}	$\sigma_{\delta_H2};$ $\sigma_{\psi_H2};$ $\widehat{\sigma}_{\psi_H2}$	$\sigma_r;$ $\sigma_{ns};$ σ_l	$\sigma_{sr};$ σ_{d_UP}	Perturbación resuelta a nivel de la UPH
	12	-	-	$\sigma_r; \sigma_{ns};$	σ_{f_T3}	-	-	Perturbación resuelta a nivel de la holarquía
	21	$\sigma_\mu;$ σ_a	σ_{f_TG4}	-	-	$\sigma_r;$ $\sigma_{ns};$ σ_l	σ_{δ_UP}	Perturbación resuelta a nivel de la UPH
4	7	$\sigma_\mu;$ σ_a	σ_{f_TG4}	-	-	$\sigma_r;$ $\sigma_{ns};$ σ_l	σ_{d_UP}	Perturbación resuelta a nivel de la UPH
	10	σ_{op}	σ_{δ_TG3}	$\sigma_{op}; \sigma_r;$ $\sigma_{ns}; \sigma_{sr}$	$\sigma_{dp_H2};$ $\sigma_{d_H2};$ σ_{ψ_H2}	$\sigma_r;$ $\sigma_{ns};$ σ_l	σ_{sr}	Perturbación resuelta a nivel de la UPH
	14	σ_l	σ_{d_TG1}	-	-	-	-	Perturbación resuelta a nivel del holón
	19	-	-	$\sigma_r; \sigma_{ns}$	σ_{f_HRSG2}	$\sigma_r;$ $\sigma_{ns};$ σ_l	σ_{δ_UP}	Perturbación resuelta a nivel de la UPH
5	3	-	-	$\sigma_r;$ $\sigma_{ns};$ σ_{op}	$\sigma_{f_HRSG2};$ σ_{d_H1}	-	-	Perturbación resuelta a nivel de la holarquía
	10	σ_{op}	σ_{δ_TG3}	$\sigma_{op};$ $\sigma_r;$ σ_{sr}	$\sigma_{dp_H1};$ $\sigma_{d_H1};$ σ_{ψ_H1}	$\sigma_r;$ $\sigma_{sr};$ σ_{ns}	$\sigma_{sr};$ $\sigma_{d_UP};$ σ_{ψ_UP}	Perturbación resuelta por fuera de la UP
	15	$\sigma_\mu;$ σ_a	σ_{f_TV2}	$\sigma_r;$ $\sigma_{ns};$ σ_{sr}	$\sigma_{\delta_H2};$ $\widehat{\sigma}_{\psi_H2}$	$\sigma_r;$ σ_{ns}	$\sigma_{sr};$ σ_{d_UP}	Perturbación resuelta a nivel de la UPH

Exp.	Per.	S_c	S_{nc}	S_{c_h}	S_{nc_h}	S_{c_H}	S_{nc_H}	Observaciones
6	4	σ_l	σ_{d_TV2}	$\sigma_{op};$ $\sigma_r;$ σ_{ns}	$\sigma_{dp_H1};$ σ_{d_H1}	-	-	Perturbación resuelta a nivel de la holarquía
	9	$\sigma_\mu;$	σ_{f_TV1}	$\sigma_r;$ σ_{ns}	σ_{δ_H1}	-	-	Perturbación resuelta a nivel de la holarquía
	14	-	-	$\sigma_r;$ σ_{ns}	$\sigma_{f_T3};$ σ_{d_H1}	-	-	Perturbación resuelta a nivel de la holarquía
	20	σ_l	σ_{d_TGA}		-	-	-	Perturbación resuelta a nivel del holón
	$\frac{ S_{c_*} }{np}$	1,15		2,20		1,25		
	$\frac{ S_{nc_*} }{np}$		0,80		1,55		0,95	

Cuadro 6.27: Registro de Eventos - Reactividad

Así, para la hipótesis alternativa planteada y según los diferentes niveles de profundidad de la estructura se tiene:

$$\frac{|S_{c_*}|}{np_i} > \frac{|S_{nc_*}|}{np_i}$$

Se puede afirmar entonces que un sistema holónico bajo la arquitectura propuesta es reactivo en la medida que por cada evento no controlable genera por lo menos un evento de control para dicha perturbación.

Aplicando el mismo procedimiento anterior se debe determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre el número de eventos controlables y no controlables dentro de cada nivel de supervisión (holón, holarquía, unidad de producción holónica).

Nivel de significancia: $\alpha = 0,05$

Nivel i				
1	$\frac{ S_c }{np}$	1.44	$\frac{ S_{nc} }{np}$	1.00
2	$\frac{ S_{c_h} }{np}$	2.75	$ \bar{\sigma}_{nc_h} $	1.94
3	$\frac{ S_{c_H} }{np}$	3.70	$ \bar{\sigma}_{nc_H} $	1.90

Cuadro 6.28: Número medio de eventos controlables y no controlables en cada uno de los niveles definidos

La prueba estadística consiste en lo siguiente: $t_0 > t_t \Rightarrow$ se rechaza la hipótesis nula.

Con $t_t = t_{v,\alpha}$ y $v = n_1 + n_2 - 2 = 38$.

Aplicando una prueba estadística a partir del estadístico t_0 se tiene:

$$\frac{|S_{c_1}|}{np_1} > \frac{|S_{nc_1}|}{np_1}$$

$$S_p = 0,60$$

$$t_0 = 1,84$$

$$t_{0,05, 38} = 1,68595$$

$$\frac{|S_{c_2}|}{np_2} > \frac{|S_{nc_2}|}{np_2}$$

$$S_p = 1,15$$

$$t_0 = 1,79$$

$$t_{0,05, 38} = 1,68595$$

$$\frac{|S_{c_3}|}{np_3} > \frac{|S_{nc_3}|}{np_3}$$

$$S_p = 1,15$$

$$t_0 = 2,52$$

$$t_{0,05, 38} = 1,68595$$

Así es claro que: para todos los casos $t_0 > t_t$, por lo que se rechaza la hipótesis nula, y por tanto se afirma con una confianza del 95% que la arquitectura holónica propuesta cuenta con mecanismos de reacción ante cada uno de los eventos inesperados que pueden poner en riesgo el cumplimiento satisfactorio de la misión, generando para cada uno de ellos más de un evento de control.

Conclusiones

- Se valida la hipótesis 6.5.1, indicando que en el enfoque holónico, la autonomía del sistema, medida desde el número de intervenciones del supervisor de orden superior es mucho mayor, si se compara con un enfoque jerárquico-centralizado, comprobando que el paradigma holónico distribuye la supervisión.
- Validando la hipótesis 6.5.2, se puede afirmar que en un sistema holónico bajo la arquitectura propuesta se resuelve un mayor número de perturbaciones en los niveles más internos de la estructura, evitando que se propaguen dichos eventos a los niveles externos.
- El atributo de “Autonomía” se incrementa según los niveles de profundidad de la arquitectura. En el nivel más interno (holón), la autonomía depende no sólo de restricciones de capacidad, sino de restricciones físicas y operacionales. La holarquía cuenta con una mayor autonomía.
- Si un holón pertenece a una holarquía, no cuenta con autonomía total, dado que cualquier cambio en un punto de operación afecta a los demás holones de la holarquía y debe considerar por tanto las restricciones operacionales. De este modo, todo cambio que viole restricciones operacionales es coordinado por el supervisor de la holarquía y no a través del supervisor del holón.

- Con respecto a la métrica de cooperación, la métrica propuesta es validada en la medida que se comprueba estadísticamente que la arquitectura holónica dispone de mecanismos de cooperación, ya que las perturbaciones son resueltas al interior de cada uno de los niveles supervisión, evitando que dichos eventos escalen al nivel superior de supervisión (Nivel UPH). En contraste, por comparación se analiza al arquitectura jerárquica, en cuyo caso toda perturbación debe ser resuelta a través del supervisor centralizado, como consecuencia de la no distribución de la función de supervisión.
- En la arquitectura propuesta no se cuenta con comunicación directa mediante intercambio de mensajes entre holones y holarquías, lo que sacrifica dentro de este esquema a este nivel el atributo de la cooperación dado que se requiere de un supervisor que actúa como mediador entre holones para que puedan cooperar.
- Los mecanismos de cooperación se activan en el caso de que una perturbación no pueda ser resuelta por autonomía, en cualquiera de los niveles de profundidad de la arquitectura propuesta.
- El atributo de proactividad validado a partir de la hipótesis 6.5.5 evidencia que la arquitectura cuenta con mecanismos de proactividad dado que ante perturbaciones se anticipa a incumplimientos y renegocia la misión con el objetivo de evitar llegar a incumplimientos.
- La hipótesis 1.5.6 valida el atributo de reactividad al mostrar evidencia estadística que por cada evento no controlable se genera por lo menos un evento de control para dicha perturbación. Esto es una consecuencia directa de la aplicación de la teoría de control supervisorio, la cual se tomó como base para diseñar la componente reactiva.

- Como se consideró en el esquema de respuesta a perturbaciones, la propagación de eventos disminuye de los niveles más internos a los más externos, dado que en cada nivel de decisión se procura resolver este tipo de situaciones, lo que se traduce en una disminución de las perturbaciones que se propagan a los niveles más externos.
- Ante fallas permanentes de un recurso que pertenece a una holarquía, no es necesario ajustar el punto de operación, ya que se realiza un cálculo instantáneo del nuevo programa de producción. Desde el enfoque convencional se debe realizar un ajuste del punto de operación para la nueva condición y posteriormente reprogramar la producción. Para el caso de estudio presentado, este proceso puede tardar entre 15 y 30 minutos.
- En la arquitectura propuesta, la estructura que mejor expresa los atributos holónicos es la holarquía. Un holón tiene limitada su autonomía cuando pertenece a una holarquía, dado que debe respetar las restricciones operacionales impuestas por el supervisor de la misma. Igualmente, el mejor escenario en el cual se desarrolla la cooperación es la holarquía, dado que este proceso se realiza a través del supervisor como mediador de la negociación y no requiere intervenciones del supervisor de la UPH.

Conclusiones y futuros trabajos

Conclusiones generales

- Las características y atributos del paradigma holónico, entre los que se destacan los atributos básicos (autonomía, cooperación, proactividad y reactividad), la combinación apropiada de esquemas jerárquicos y heterárquicos, la recursividad, la reconfigurabilidad, el concepto de *holarquía*, la inteligencia distribuida, entre otras características lo posicionan como un enfoque que da respuesta a las necesidades actuales y futuras de los sistemas de producción y permite materializar el concepto de “sistema de producción Inteligente” , haciendo contribuciones importantes a mejorar el tiempo de respuesta ante las perturbaciones propias de estos ambientes y a la integración de las funciones de planificación, programación y supervisión de la producción.
- La mayor cantidad de trabajos investigativos y aplicaciones industriales se concentra en los procesos de manufactura discretos. Sin embargo, trabajos previos y la investigación realizada, plasmada en la propuesta presentada, evidencian el potencial de aplicación que tiene el paradigma en procesos de producción continua, sobre todo en aquellos que por sus características de múltiples productos, múltiples operaciones y múltiples configuraciones tienen altas exigencias de reconfigurabilidad. Una restricción adicional que se impone a los sistemas de control de este tipo de procesos es que por los productos que manejan, deben

garantizar la producción en flujo continuo.

- Los conceptos del paradigma holónico, combinados con la teoría de control supervisorio y las redes de Petri, permiten tener una base formal unificada para modelar los comportamientos de dinámicas discretas y procesos concurrentes, presentes en las decisiones de los distintos niveles de los sistemas de producción. Como resultado de esta combinación, se tiene una propuesta para planificar, programar y supervisar la producción en procesos continuos, la cual se compone un modelo global en redes de Petri a partir de los modelos de los recursos inteligentes, con sus capacidades, competencias y disponibilidad. Aplicando técnicas de análisis del árbol de alcanzabilidad y la teoría de control supervisorio se obtienen soluciones factibles para programar la producción, en línea y fuera de línea y para conducir el sistema hacia los estados finales deseados, mediante leyes de supervisión sintetizadas desde las mismas técnicas formales y planteando las funciones de producción como problemas de control supervisorio.
- La base formal empleada le da robustez a las soluciones, en tanto que propiedades como la alcanzabilidad, la controlabilidad y la supervisabilidad pueden ser validadas formalmente. De la misma manera, la teoría de control supervisorio facilita el establecimiento de métricas formales para evaluar los atributos holónicos y de expresiones matemáticas para formar holarquías. La representación formal tanto de las métricas como de la formación de holarquías facilita la expresión algorítmica de los modelos y en consecuencia, también facilita la implementación.
- Las PN representan una herramienta fundamental para garantizar la reconfigurabilidad del paradigma, no solo de la infraestructura de producción, sino también de las leyes de control y supervisión. Por su naturaleza matemática y algorítmica, las PN son un “ejecutor”, lo que facilita que para cada condición de

operación se defina una configuración y un modelo PN, que se ejecuta sobre un motor basado en la evolución dinámica de la PN.

- En la propuesta se ha evidenciado el poder del paradigma holónico para abordar el problema de la complejidad en sistemas de producción. Conceptos como la *formación de holarquías* y características como la recursividad, la especialización, la agregación, la reusabilidad y la modularidad resultaron fundamentales para entregar soluciones al problema de la reprogramación de la producción, con tiempos de respuesta apropiados para las exigencias de las funcionalidades de tiempo real. En los nuevos programas de producción que se calculan como respuesta a las perturbaciones, se sacrifica optimización global, dado que no se garantiza que las soluciones son óptimas globalmente. Sin embargo este sacrificio puede ser aceptable, dados los tiempos de respuesta que se alcanzan. La combinación de las PN con la teoría de control supervisorio y el concepto de *Holarquía* resultó apropiada para proponer el esquema de respuesta a las perturbaciones.
- Para preservar criterios de optimización global, se propone un modelo de la UPH basado en redes de Petri, que tiene en cuenta competencias, disponibilidad y conexiones. Este modelo puede presentar problemas de desempeño en tiempo real para sistemas muy complejos, debido a que está sujeto a un crecimiento combinatorio, con el aumento de las conexiones entre recursos. Sin embargo, la determinación de la configuración inicial es parte de la función de Programación de la producción y esto se hace fuera de línea. De esta manera, otra característica del paradigma se cumple en la propuesta: se conserva la estructura jerárquica para garantizar óptimos globales, en las funciones que no exigen desempeño en tiempo real y cuando el sistema opera en un ambiente estable, sin perturbaciones. En situaciones de falla se privilegia el tiempo de respuesta

sobre la optimización global, lo cual se obtiene mediante estructuras heterárquicas que no están sujetas a relaciones de autoridad. De esta manera se evidencia que el paradigma holónico combina apropiadamente las estructuras jerárquicas con las heterárquicas.

- En diversos trabajos sobre sistemas holónicos para procesos discretos se propone el concepto de *agenda* como un componente fundamental de la autonomía del holón. Los demás atributos se pueden expresar en función de los objetivos del sistema holónico, es decir, de la misión negociada. En este trabajo se retoma ese concepto, se define formalmente su estructura para procesos continuos y se establece su interacción como parte del sistema de supervisión. En la construcción del supervisor se considera tanto el estado del holón como el estado de su misión expresada en la Agenda de producción.
- Se ha propuesto una estructura para la supervisión de sistemas de producción continuos, basada en el paradigma holónico y apoyada en la aplicación de conceptos de la teoría de control supervisorio. En este esquema de supervisión la función de toma de decisiones se distribuye en los diferentes niveles de la arquitectura, teniendo en cuenta las restricciones temporales de cada uno de ellos, como característica fundamental de la supervisión holónica. Los resultados obtenidos han evidenciado la contribución importante de contar con una estructura de supervisión en cada uno de los niveles de decisión, reflejada en los atributos contemplados por el paradigma, dado que en el supervisor se concentra la mayor parte de las decisiones autónomas, reactivas, proactivas y cooperativas del holón, holarquía o UPH, permitiendo conocer el estado global de la UP y garantizar el control de la misma.
- Durante las pruebas experimentales se comprobó no solo que el sistema de producción holónico bajo la arquitectura propuesta cumple con las principales

métricas para este tipo de sistemas, sino también con características como la reconfigurabilidad, la recursividad y la autosimilaridad. Los resultados experimentales presentados en esta propuesta pueden considerarse limitados debido al número de experiencias y escenarios evaluados, sin embargo estadísticamente hablando a partir de las hipótesis planteadas se puede llegar a conclusiones válidas sobre el comportamiento de la arquitectura LOCHA, pudiéndose afirmar por consiguiente que dicha arquitectura es holónica.

- En un sistema holónico siempre se deben cumplir como mínimo los atributos de autonomía y reactividad, dado que los demás atributos están supeditados a las condiciones del evento de falla. Por ejemplo el sistema cumple el atributo de proactividad si y sólo si hay un evento no controlable de probable incumplimiento. Con respecto a la cooperación sólo se presenta si el holón no lo puede resolver autónomamente.
- La plataforma tecnológica debe garantizar que todos los recursos estén en red, lo cual se facilita con los actuales avances en redes industriales basadas en Ethernet. De la misma manera, el reto para la implementación, es que los atributos holónicos puedan ser agregados a un sistema de producción, contando con la infraestructura tecnológica existente.
- Los modelos y algoritmos presentados, el prototipo desarrollado y los requerimientos tecnológicos para una eventual implementación, permiten afirmar que el sistema no solo es factible de ser construido, si no que da los resultados esperados, disminuyendo tanto los tiempos como los esfuerzos de desarrollo.

Futuros trabajos

- La consolidación de una arquitectura para ejecutar las funciones de producción en procesos continuos desde el enfoque holónico invita a continuar desarrollos tendientes a la generación automática de los modelos en PN a partir de la representación formal o semiformal del producto. De la misma manera se deben continuar desarrollos para la generación automática de las leyes de supervisión.
- Se deben investigar otros métodos, basados en extensiones de PN, como las coloreadas y las jerárquicas para optimizar los modelos de las conexiones. La mayor complejidad en la realización de los modelos radica en la característica combinatoria de las conexiones.
- Los límites de desempeño temporal de los modelos globales propuestos deben ser explorados para procesos más complejos, dado que puede presentarse la explosión de estados que puede dificultar el análisis del árbol de alcanzabilidad.
- En propuestas posteriores se recomienda incluir en la arquitectura, los esquemas de premios y penalizaciones, tal como se presenta en ADACOR. Estos esquemas son importantes para evaluar el desempeño de los holones y unidades de producción y como elemento fundamental para considerar criterios de negociación basados en desempeño histórico del holón.
- El modelo de cooperación planteado tiene una falencia, dado que la cooperación entre holones se realiza a instancias del supervisor de la holarquía y la cooperación entre holarquías se realiza a instancias del supervisor de la UPH. De esta forma se afecta la autonomía de los holones que negocian, dado que exigen la intervención del supervisor. Una concepción con mayor autonomía sería aquella en la que la cooperación se realiza entre los supervisores de los holones involucrados en la negociación.

- El atributo holónico que presenta mayores dificultades para su formalización es la proactividad. Se presentó y formalizó un comportamiento proactivo, relacionado con la anticipación a incumplimientos. Futuros trabajos deben profundizar en la formalización de comportamientos que refuercen este atributo.
- Para consideraciones de implementación, además de tener en cuenta que las estructuras propuestas se deben desarrollar sobre las plataformas tecnológicas existentes, debe considerarse la aplicación de la norma IEC61499, como nuevo paradigma de programación de controladores orientado a componentes inteligentes y distribuidos.

Bibliografía

- [1] Koestler A. The ghost in the machine. Macmillan, editor; 1968.
- [2] Deen S. Cooperating Agents for Holonic Manufacturing. In: Marik V, Stepankova O, Krautwurmova H, Luck M, editors. Multi-Agent Systems and Applications II. vol. 2322 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg; 2002. p. 119–133.
- [3] Quintero Henao LF. Un Modelo de control inteligente para sistemas de manufactura basado en los paradigmas Holónico y Multi-Agente. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; 2010.
- [4] Bongaerts L. Integration of scheduling and control in holonic manufacturing systems. Katholieke Universiteit Leuven, Fculteit Toegepaste Wetens Schappen, Departement Werktuigkunde; 1998.
- [5] Chokshi NN, McFarlane DC. A Distributed Coordination Approach to Reconfigurable Process Control. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer; 2008.
- [6] Suda H. Future Factory System Formulated in Japan. Japanese Journal of Advanced Automation Technology. 1989; vol. 1(No. 10): p. 15–25.
- [7] Vrba P, Tichy and P, Mar andi andk V, Hall KH, Staron RJ, Maturana FP, et al. Rockwell Automation’s Holonic and Multiagent Control Systems Com-

- pendium. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, IEEE Transactions on. 2011; vol. 41(No. 1): p. 14–30.
- [8] Mella P. *The Holonic Revolution: Holon, Holarchies and Holonic Networks The Ghost in the Production Machine*. 8th ed. Pavia University Press; Pavia, 2009.
- [9] Pétin JF, Gouyon D, Morel G. Supervisory synthesis for product-driven automation and its application to a flexible assembly cell. *Control Engineering Practice*. 2007; vol. 15(No. 5): p. 595–614.
- [10] Zaremba M, Morel G. Integration and control of intelligence in distributed manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2003; vol. 14(No. 1): p. 25–42.
- [11] Khalgui M, Hanisch HM. Reconfiguration Protocol for Multi-Agent Control Software Architectures. *Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, IEEE Transactions on. 2011; vol. 40(No. 1): p. 70–81.
- [12] Xiaokun Z, Norrie DH, Brennan RW, Yuefei X. A multi-level reconfiguration control for holonic PLC. In: *Systems, Man, and Cybernetics, 2000 IEEE International Conference on*. vol. 3; 2000. p. 1762–1767.
- [13] Insaurrealde CC, Seminario MA, Jiménez JF, Giron-Sierra JM. IEC 61499 Model for Avionics Distributed Fuel Systems with Networked Embedded Holonic Controllers. In: *Emerging Technologies and Factory Automation, 2006. ETFA '06*. IEEE Conference on; 2006. p. 388–396.
- [14] Strasser T, Christensen JH, Sünder C. Design and Execution Issues in IEC61499 Distributed Automation and Control Systems. *Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, IEEE Transactions on. 2011; vol. 41(No. 1): p. 41–52.

- [15] Brennan RW, Gruver WA, Hall KH. Forward-Special Issue on Industrial Applications of Holonic Manufacturing Systems. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on.* 2011; vol. 41(No. 1): p. 1 –3.
- [16] Vyatkin V, Hanisch HM. Verification of distributed control systems in intelligent manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing.* 2003; vol. 14: p. 123–136.
- [17] Heikkila T, Rannanjarvi L, Sallinen M, Rintala M. A holonic shot-blasting system. In: Deen SM, editor. *Agent-Based Manufacturing: Advances in the Holonic Approach.*, Springer-Verlag, Berlin; 2003. p. 255–302.
- [18] Bussmann S, Sieverding J. Holonic control of an engine assembly plant: an industrial evaluation. In: *Systems, Man, and Cybernetics, 2001 IEEE International Conference on.* vol. 5; 2001. p. 3151 –3156.
- [19] Jarvis DH, Jarvis JH. Holonic Diagnostics for an Automotive Assembly Line. In: M DS, editor. *Agent-based manufacturing : advances in holonic approach.* Springer-Verlag. Berlin,; 2003. p. 193–206.
- [20] Heragu SS, Graves RJ, Kim BI, St Onge A. Intelligent agent based framework for manufacturing systems control. *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on.* 2002; vol. 32(No. 5): p. 560 – 573.
- [21] Gruver WA, Kotak DB, van Leeuwen EH, Norrie D. Holonic Manufacturing Systems - Phase 2. *Proceedings of the 2001 IMS International Projects Forum;* 2001.
- [22] HoloMAS. *4th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems.* Linz, Austria; 2009.

- [23] HoloMAS. 5th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems. Toulouse,France; 2011.
- [24] Christensen J. Holonic Manufacturing systems - Initial architecture and standard directions. Hannover; 1994.
- [25] Wyns J. Reference architecture for holonic manufacturing systems. Katholieke Universiteit Leuven; Bélgica, 1999.
- [26] Leitão P. Holonic Rationale and Self-organization on Design of Complex Evolvable Systems. In: Marík V, Strasser T, Zoitl A, editors. Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. vol. 5696 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg; 2009. p. 1–12.
- [27] McFarlane DC. Holonic manufacturing systems in continuous processing: concepts and control requirements; 1995.
- [28] Maturana F, Norrie DH. Multi-Agent Mediator Architecture for Distributed Manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 1996; vol. 7(No. 4): p. 257–270.
- [29] Brennan RW, Balasubramanian S, Norrie DH. A Dynamic Control Architecture for Metamorphic Control of Advanced Manufacturing Systems. In: *Proceedings of Intellinegt Systems & Automated Manufacturing*; 1997. p. 213–223.
- [30] Fischer K. Agent-Based Design of Holonic Manufacturing Systems. *Robotics and Autonomous Systems*. 1999; vol. 27(No. 1&2): p. 3–13.
- [31] Muller J. An Architecture for dynamically interacting agents. Universitat des Saarlandes, Saarbrucken; 1996.
- [32] Chirn J, McFarlane DC. A Holonic Component-Based Architecture for Manufacturing Control Systems; 1999.

- [33] Covanich W, McFarlane D. Comparing the Control Structures of ISA S88- and Holonic Component-Based Architecture. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*. 2011; vol. 41(No. 1): p. 4 –13.
- [34] Covanich W, McFarlane D. Assessing ease of reconfiguration of conventional and Holonic manufacturing systems: Approach and case study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2009; vol. 22(No. 7): p. 1015 – 1024. *Distributed Control of Production Systems*.
- [35] Leitão P. ADACOR: An Agile and Adaptive Holonic Architecture for Manufacturing Control. Facultad de ingeniería de la Universidad de Porto; 2004.
- [36] Langer G. HoMuCS - A methodology and Architecture for Holonic Multi - Cell Control Systems; 1999.
- [37] Babiceanu RF. Holonic-based Control System for Automated Material Handling Systems. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University; 2005.
- [38] Giret A. Anemona: Una Metodología Multi-Agente Para Sistemas Holónicos De Fabricación. Universidad Politécnica de Valencia, España; 2005.
- [39] El-Kebbe Salaheddine DA. Findings from adapting real-time aperiodic scheduling under dynamic priority systems to production planning and control. In: *Emerging Technologies and Factory Automation, 2001. Proceedings. 2001 8th IEEE International Conference on*. vol. 2; 2001. p. 715 –717.
- [40] El-Kebbe DA. Towards the MaSHReC Manufacturing System under Real-Time Constraints: A contribution to the application of real time system advances to production control. Paderborn University, Germany; 2002.

- [41] Adam E, Mandiau R, Kolski C. HOMASCOW: a holonic multi-agent system for cooperative work. In: Database and Expert Systems Applications, 2000. Proceedings. 11th International Workshop on; 2000. p. 247 –253.
- [42] Chokshi NN, McFarlane DC. A Distributed Architecture for Reconfigurable Control of Continuous Process Operations. Journal of Intelligent Manufacturing. 2008; vol. 19(No. 2): p. 215–232.
- [43] Chokshi NN, McFarlane DC. Rationales for holonic manufacturing systems in chemical process industries. In: Database and Expert Systems Applications, 2001. Proceedings. 12th International Workshop on; 2001. p. 616 –620.
- [44] Agre JR, Elsley G, McFarlane D, Cheng J, Gunn B. Holonic control of a water cooling system for a steel rod mill. In: Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology, 1994., Proceedings of the Fourth International Conference on; 1994. p. 134 –141.
- [45] Chacón E. A way to implement supervisors for holonic production units. Departamento de Computación. Escuela de Ingeniería de Sistemas. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela; 2001.
- [46] IMS. HMS I and II: Holonic Manufacturing Systems - Phase I and II, IMS Project No. 95003; n. d.
- [47] Kosakaya J, Kobayashi A, Yamaoka K. Cooperative multi-agent-based control technology for supervisory control and data-acquisition systems. In: Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA '03. IEEE Conference. vol. 2; 2003. p. 19 – 26.
- [48] Chacón E, Zapata G, Quintero Henao LF. La agenda de producción para la supervisión de sistemas holónicos. XIII Congreso Latinoamericano de Control Automático; 2008.

- [49] Lobo Benítez CL. Sistema Multiagente para Coordinar Unidades de Producción. Universidad de los Andes. Escuela de Ingeniería de Sistemas. Mérida, Venezuela; 2003.
- [50] Pérez L. Técnicas Emergentes para la Automatización Integrada de Procesos industriales - MODELOS DE AUTOMATIZACIÓN Reporte Técnico No. 1; 2006.
- [51] Durán J. Técnicas Emergentes para la Automatización Integrada de Procesos de Producción INTEGRACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN Reporte Técnico No. 2; 2006.
- [52] Chacón E, Besembel I, Narciso F, Montilva J, Colina E. An integration architecture for the automation of a continuous production complex. ISA Transactions. 2002; vol. 41(No. 1): p. 95 – 113.
- [53] Chacón E, Besembel I, Hennes J. Coordination and Optimization in Oil & Gas Production Complexes. Computers in Industry. 2004; vol. 53(No. 1): p. 17–37.
- [54] Mendoza J, Chacón E. Revisión de Conceptos sobre Sistemas híbridos; 2005.
- [55] Caramihai S. An Agent-Based DES Supported Modelling Framework for Enterprises. First International on Interoperability of Enterprise Software and Applications, Suiza; 2005.
- [56] Celaya R, Desrochers A, Graves R. Modeling and Analysis of Multi-agent Systems using Petri Nets. Journal of Computers. 2009; vol. 4(No. 10): p. 981–996.
- [57] Balasubramanian S, Brennan RW, Norrie DH. Requirements for holonic manufacturing systems control. In: Database and Expert Systems Applications, 2000. Proceedings. 11th International Workshop on; 2000. p. 214–218.

- [58] Leitão P, Boissier R, Casais F, Restivo F. Integration of Automation Resources in Holonic Manufacturing Applications Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. Holonic and MultiAgent Systems for Manufacturing. 2003;p. 1085–1086.
- [59] Ramos F, Frausto J, Camargo F. An Expressive Coloured Petri Nets Methodology Applied to a Business to Business Enviroment. MOCA01, Workshop on Modelling of Objects, Components, and Agents. 2001;p. 1–26.
- [60] Raposo AB, Magalhaes LP, Ricarte ILM. Petri nets based coordination mechanisms for multi-workflow enviroments. Computer Systems Sciencie and Engineering. 2000; vol. 15(No. 5): p. 315–326.
- [61] Fu-Shiung H. Collaborative timed Petri net for holonic process planning. In: American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003. vol. 1; 2003. p. 344–349.
- [62] Fu-Shiung H. Model and control holonic manufacturing systems based on fusion of contract nets and Petri nets. Automatica. 2004; vol. 40(No. 1): p. 51–57.
- [63] Saint-Voirin D, Lang C, Guyennet H, Zerhouni N. Scoop: A Complete Methodology for Cooperative Systems Modeling and Analysis. In: Computing in the Global Information Technology, 2007. ICCGI 2007. International Multi-Conference on; 2007. p. 47–54.
- [64] Fu-Shiung H. Design of reconfiguration mechanism for holonic manufacturing systems based on formal models. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2010; vol. 23(No. 7): p. 1187 – 1199.
- [65] Ciufudean C, Filote C. Safety Discrete Event Models for Holonic Cyclic Manufacturing Systems. In: Marík V, Strasser T, Zoitl A, editors. Holonic and

- Multi-Agent Systems for Manufacturing. vol. 5696 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg; 2009. p. 225–233.
- [66] Ramadge PJG, Wonham WM. The control of discrete event systems. *Proceedings of the IEEE*. 1989; vol. 77(No. 1): p. 81–98.
- [67] Akesson K. *Methods and Tools in Supervisory Control Theory*. Chalmers University Of Technology; 2002.
- [68] Tittus M, Akesson K. Petri Net Models in Batch Control. *Mathematical Modelling of Systems*; 1999.
- [69] Bourdeaud’huy T, Toguyeni A. Analysis of Reconfiguration Strategies Based On Petri Nets Models and Optimization Techniques. In: *Discrete Event Systems, 2006 8th International Workshop on*; 2006. p. 319 –324.
- [70] Verstraete P, Germain BS, Valckenaers P, Brussel HV, Belle J, Hadeli H. Engineering manufacturing control systems using PROSA and delegate MAS. *Int’l J Agent-Oriented Software Eng*. 2008; vol. 2(No. 1): p. 62–89.
- [71] Brussel HV, Wyns J, Valckenaers P, Bongaerts L, Peeters P. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Comput Ind*. 1998; vol. 37(No. 3): p. 255–274.
- [72] Leitão P. Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2009; vol. 22(No. 7): p. 979 – 991.
- [73] Thorne A, McFarlane D, Hodges S. *The Auto-ID Automation Laboratory: Building Tomorrows Systems Today*. Auto-ID centre institute for manufacturing, university of cambridge, mill lane, cambridge, cb2 1rx, united kingdom; 2003.
- [74] Brandl D. *Design Patterns for Flexible Manufacturing*. ISA; 2006.

- [75] Brandl D. Applying S88 to “Non-Stop” Production. In: World Batch Forum, North American Conference; 2005. p. 1–10.
- [76] ISA S The Instrumentation, Society A. ANSI/ISA-88.01-1995: Batch Control; 1995.
- [77] Luder A, Klostermeyer A, Peschke J, Bratoukhine A, Sauter T. Distributed automation: PABADIS versus HMS. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*. 2005; vol. 1(No. 1): p. 31–38.
- [78] HMS. Holonic Manufacturing Systems Consortium. <http://hms.ifw.uni-hannover.de>; 2004.
- [79] Leitão P, Mendes JM, Colombo AW, Restivo F. Reconfigurable production control systems: beyond ADACOR. In: In Proceedings of the IFAC Intelligent Manufacturing Systems Workshop (IMS07). vol. 8. Alicante, Spain.; 2007. p. 1–6.
- [80] Babiceanu R, Chen F. Development and Applications of Holonic Manufacturing Systems: A Survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2006; vol. 17: p. 111–131.
- [81] Chacón E, Besembel I, Rivero DM, Cardillo J. The Holonic Production Unit: an Approach for an Architecture of Embedded Production Process. In: Aramburo J, Ramirez Trevino A, editors. *Advances in Robotics, Automation and Control*. Intech; 2008. p. 301–314.
- [82] Bravo CE. *Inteligencia Artificial Distribuida como estrategia para la Gerencia Integrada de Producción Industrial*. Consejo de estudios de posgrado. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela; 2010.

- [83] International Standard for the integration of enterprise and control systems, ISA-95; 2002.
- [84] Cassandras C, Lafortune S. Introduction to discrete event systems. Springer Science+Business Media; 2008.
- [85] Iordache MV, Antsaklis PJ. Supervisory Control of Concurrent Systems: A Petri Net Structural Approach (Systems & Control: Foundations & Applications). Birkhauser; 2006.
- [86] Isermann R. Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods – An introduction. Control Engineering Practice. 1997; vol. 5(No. 5): p. 639–652.
- [87] Arzen KE. Grafset for intelligent supervisory control applications. Automatica. 1994; vol. 30(No. 10): p. 1513–1525.
- [88] Alvarez A, García W, Camacho O, Chacón E. Automation of a steam generation plant using hybrid systems. ISA Transactions. 1999; vol. 38(No. 1): p. 87–99.
- [89] Deligiannis V, Manesis S, Lygeros J. Global automata: a new approach on modelling industrial systems. International Journal of Industrial and Systems Engineering. 2008; vol. 3(No. 4): p. 383–406.
- [90] Giua A. Petri nets as discrete event models for supervisory control. Rensselaer Polytechnic Institute; 1992.
- [91] Oltean V, Borangiu T, Manu M. The Supervision of Hybrid Control Systems A Layered Architecture. In: Kopacek P, Moreno-Díaz R, Pichler F, editors. Computer Aided Systems Theory - EUROCAST99. vol. 1798 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg; 2000. p. 573–587.

- [92] Böling J. Homepage for the course Control of Discrete Event Systems; 2009. Citado Enero de 2009. webpage. Available from: <https://www.abo.fi/~jbo-ling/cdes/>.
- [93] Peterson JL. Petri Net Theory and the Modeling of Systems. Prentice Hall PTR; 1981.
- [94] Silva M. Las Redes de Petri: en la Automática y la Informática; 1985.
- [95] David R, Alla H. Discrete, continuous and hybrid Petri Nets. Berlin: Springer; 2005.
- [96] Yan C, Liqun W. A Study of Concurrent Integrated Process Planning Architecture and Cooperative Model in Holonic Manufacturing System. In: Mechatronic and Embedded Systems and Applications, 2008. MESA 2008. IEEE/ASME International Conference on; 2008. p. 337–340.
- [97] Ramos C. A holonic approach for task scheduling in manufacturing systems. In: Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on. vol. 3; 1996. p. 2511–2516.
- [98] Sousa P, Ramos C. A dynamic scheduling holon for manufacturing orders. Journal of Intelligent Manufacturing. 1998; vol. 9(No. 2): p. 107–112.
- [99] Gou L, Hasegawa T, Luh PB, Tamura S, Oblak JM. Holonic planning and scheduling for a robotic assembly testbed. In: Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology, 1994., Proceedings of the Fourth International Conference on; 1994. p. 142–149.
- [100] McFarlane DC, Bussmann S, Ag D. Developments in Holonic Production Planning and Control; 2000.

- [101] Ong L. An Investigation of an Agent-Based Scheduling in Decentralised Manufacturing Control. University of Cambridge, Department of Engineering; 2003.
- [102] Chacón Ramirez EA. Planificación / Programación en línea de sistemas de producción continua bajo una visión holónica. In: Menorias CAC'01; 2001. p. 1–5.
- [103] McFarlane D, Marett B, Elsley G, Jarvis D. Application of holonic methodologies to problem diagnosis in a steel rod mill. In: Systems, Man and Cybernetics, 1995. Intelligent Systems for the 21st Century., IEEE International Conference on. vol. 1; 1995. p. 940 –945.
- [104] Kovács A. Novel Models and Algorithms for Integrated Production Planning and Scheduling. Budapest University of Technology and Economics, Department of Measurement and Information Systems and Hungarian Academy of Sciences, Computer and Automation Research Institute. Budapest; 2005.
- [105] Lennartson B, Tittus M, Fabian M. Modeling, specification and controller synthesis for discrete event systems. In: Systems, Man, and Cybernetics, 1998. 1998 IEEE International Conference on. vol. 1; 1998. p. 698–703.
- [106] Falkman P, Lennartson B, Tittus M. Specification of a batch plant using process algebra and Petri nets. In: Automation Science and Engineering, 2005. IEEE International Conference on; 2005. p. 339 – 344.
- [107] Music G, D M. Petri Net Based Supervisory Control of Flexible Batch Plants. vol. 2. Faculty of Electrical Engineering S University of Ljubljana, editor. Prepr. 8th IFAC Symp. on Large Scale Systems: Theory & Application, Rio Patras; 1998.
- [108] Reveliotis S. Real-Time Control of Flexibly Automated production systems; 1999.

- [109] Alibhai Z, Lum R, Huster A, Gruver WA, Kotak DB. Coordination of distributed energy resources. In: Fuzzy Information, 2004. Processing NAFIPS '04. IEEE Annual Meeting of the. vol. 2; 2004. p. 913–918.
- [110] Smith RG. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. Computers, IEEE Transactions on. 1980; vol. C-29(No. 12): p. 1104–1113.
- [111] Fu-Shiung H. Modeling and control of holonic manufacturing systems based on extended contract net protocol. In: American Control Conference, 2002. Proceedings of the 2002. vol. 6; 2002. p. 5037–5042.
- [112] Liu S. Architecture and coordination of a Holonic automated guided vehicle system. Simon Frasier University; 1999.
- [113] Billington J, Gupta A. Effectiveness of Coloured Petri nets for Modelling and Analysing the Contract Net Protocol. In: Proceedings of 8th Workshop and Tutorial on Practical Use of Coloured Petri Nets and the CPN Tools. Aarhus, Denmark; 2007. p. 46–65.
- [114] Billington J, Gupta A, Gallasch G. Modelling and Analysing the Contract Net Protocol - Extension Using Coloured Petri Nets. In: Suzuki K, Higashino T, Yasumoto K, El-Fakih K, editors. Formal Techniques for Networked and Distributed Systems FORTE 2008. vol. 5048 of Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg; 2008. p. 169–184.
- [115] Jensen K. Coloured Petri Nets : Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Volume 1 (Monographs in Theoretical Computer Science. An EATCS Series). Springer, editor. Springer; 2003.
- [116] Jones A, Rabelo LC. Survey of Job Shop Scheduling Techniques. NISTIRNational Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD; 1998.

- [117] Vollmann TE, Berry WL, Whaybarck DC. Manufacturing Planning & Control Systems. 2nd ed. Irwin I, editor. Homewood; 1988.
- [118] Matellán V, Borrajo D. ABC2 an Agenda Based Multi-Agent Model for Robots Control and Cooperation. *J Intell Robotics Syst.* 2001; vol. 32: p. 93–114.
- [119] ISA-dS95.00.01- 2000: Enterprise - Control System Integration Part 1: Models and Terminology [Standard]; 2000.
- [120] Boulos PF, Wu Z, Orr CH, Moore M, Hsiung P, Thomas D. Optimal Pump Operation of Water Distribution Systems Using Genetic Algorithms Abstract; 2004.
- [121] Yu TC, Zhang Tq, Li X. Optimal operation of water supply systems with tanks based on genetic algorithm. *Journal of Zhejiang University SCIENCE.* 2005; vol. 6a(No. 8): p. 886–893.
- [122] Handschin E, Neise F, Neumann H, Schultz R. Stochastic Models and Algorithms for the Optimal Operation of a Dispersed Generation System under Uncertainty. In: Krebs HJ, Jäger W, editors. *Mathematics Key Technology for the Future.* Springer Berlin Heidelberg; 2008. p. 205–233.
- [123] D'Accadia MD, Sasso M, Sibilio S. Optimum Operation of a Thermal Plant with Cogeneration and Heat Pump. *International Journal of Thermodynamics.* 2001; vol. 4(No. 2): p. 93–102.
- [124] Bosch PPJ, Lootsma FA. Scheduling of power generation via large-scale non-linear optimization. *Journal of Optimization Theory and Applications.* 1987; vol. 55: p. 313–326.

- [125] Martinez F, Hernandez V, Alonso JM, Zhengfu R, Alvisi S. Optimizing the operation of the Valencia water distribution network. *Journal of hydroinformatics*. 2007; vol. 9(No. 1): p. 65–78.
- [126] Berruet P, Lallican JL, Rossi A, Philippe JL. A component based approach for the design of FMS control and supervision. In: *Systems, Man and Cybernetics, 2005 IEEE International Conference on*. vol. 4; 2005. p. 3005 – 3011.
- [127] Coudert T, Berruet P, Philippe JL. Integration of reconfiguration in transitive systems: an agent-based approach. In: *Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on*. vol. 4; 2003. p. 4008 – 4014.
- [128] Fletcher M, Deen SM, Misbah S, Granby P. An Evaluation of Rescheduling Techniques and Architectures in Holonic Manufacturing Systems. *Journal of Intelligent Information Systems*. 2000;p. 1–26.
- [129] Maturana FP, Tichy P, Slechta P, Staron RJ, Discenzo FM, Hall K, et al. Cost-based dynamic reconfiguration system for intelligent agent negotiation. In: *Intelligent Agent Technology, 2003. IAT 2003. IEEE/WIC International Conference on*; 2003. p. 629 – 632.
- [130] Brennan RW, Fletcher M, Norrie DH. Reconfiguring real-time holonic manufacturing systems. In: *Database and Expert Systems Applications, 2001. Proceedings. 12th International Workshop on*; 2001. p. 611 –615.
- [131] Zapata Madrigal G, Chacón Ramirez E, Palacio Betancur JE. Intelligent Production Systems Reconfiguration by Means of Petri Nets and the Supervisory Control Theory. In: Aized T, editor. *Advances in Petri Net Theory and Application*. InTech; 2010. p. 75–102.

- [132] Caloud P. Towards continuous process supervision. In: Proceedings of the 10th international joint conference on Artificial intelligence - Volume 2. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.; 1987. p. 1086–1089.
- [133] Waissman J, Sarrate R, Escobet T, Aguilar J, Dahhou B. Wastewater treatment process supervision by means of a fuzzy automaton model. In: Intelligent Control. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on; 2000. p. 163–168.
- [134] Vagelatos GA, Rigatos GG, Tzafestas SG. Incremental fuzzy supervisory controller design for optimizing the injection molding process. *Expert Systems with Applications*. 2001; vol. 20(No. 2): p. 207–216.
- [135] Wang W, Li HX, Zhang J. A hybrid approach for supervisory control of furnace temperature. *Control Engineering Practice*. 2003; vol. 11(No. 11): p. 1325–1334.
- [136] Blanke M, Staroswiecki M, Wu NE. Concepts and methods in fault-tolerant control. In: American Control Conference. Proceedings of the 2001. vol. 4; 2001. p. 2606–2620.
- [137] Larsson T, Skogestad S. Plantwide control - A review and a new design procedure. *Modeling, Identification and Control*. 2000; vol. 21(No. 4): p. 209–240.
- [138] Eigi Miyagi P, Villani E, Maruyama N. Modeling of hybrid supervisory systems using UML and Petri nets. In: *Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings*. 2001 8th IEEE International Conference on. vol. 2; 2001. p. 149–158.
- [139] Rodriguez JA, Romagnoli JA, Goodwin GC. Supervisory multiple regime control. *Journal of Process Control*. 2003; vol. 13(No. 2): p. 177 – 191.

- [140] Quek C, Wahab A. Real-time integrated process supervision. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2000; vol. 13(No. 6): p. 645–658.
- [141] Ya-Li W, Ding L, Jian-Chao Z. Hybrid Petri nets of scheduling and supervisory control integrated system in process industry. In: *Machine Learning and Cybernetics. Proceedings of 2004 International Conference on*. vol. 2; 2004. p. 1008–1013.
- [142] Gonnet S, Chiotti O. Modeling of the supervisory control system of a multipurpose batch plant. *Computers & Chemical Engineering*. 1999; vol. 23(No. 4-5): p. 611–622.
- [143] Gandibleux X, Rosenthal-Sabroux C, Libert G. Multicriteria approach for intelligent decision support in supervisory control. *Annals of Operations Research*. 1994; vol. 51: p. 327–347.
- [144] Villa JL, Duque M, Gauthier A, Rakoto-Ravalontsalama N. Supervision and optimal control of a class of industrial processes. In: *Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings. ETFA '03. IEEE Conference*. vol. 2; 2003. p. 177–180.
- [145] Uraikul V, Chan CW, Tontiwachwuthikul P. Artificial intelligence for monitoring and supervisory control of process systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2007; vol. 20(No. 2): p. 115–131.
- [146] Esteva Payet S. Modelling, control and supervision for a class of hybrid system. *Universitat de Girona. Departament d'Electrònica, Informàtica i Automàtica*; 2003.
- [147] Montmain J, Gentil S. Causal modeling for supervision. In: *Intelligent Control/Intelligent Systems and Semiotics. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on*; 1999. p. 231–236.

- [148] Rodríguez Lelis JM, Pineda C, Echeverría WH. Supervisión avanzada de procesos. CAPACITA, Una publicación bimestral. 2005;(No. 2).
- [149] Puig V, Quevedo Casin JJ, Escobet T, Morcego B, Ocampo C. Control Tolerante a Fallos (Parte II): MEcanismos de Tolerancia y Sistema Supervisor. Revista iberoamericana de automática e informática industrial (RIAI). 2004; vol. 1(No. 2): p. 5–21.
- [150] Contreras O, De La Rosa JL, Frigola JM. I-SS: integrated supervision systems approach based on interactive components. In: Emerging Technologies and Factory Automation. Proceedings. 2001 8th IEEE International Conference on. vol. 2; 2001. p. 119–127.
- [151] Lo CH, Wong YK, Rad AB. Intelligent system for process supervision and fault diagnosis in dynamic physical systems. Industrial Electronics, IEEE Transactions on. 2006; vol. 53(No. 2): p. 581–592.
- [152] Michels K. HISS - a new approach for intelligent supervision. In: IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference, 2001. Joint 9th. vol. 2; 2001. p. 1110 –1115.
- [153] Xiaowen X, Lin C, Hengzhi F, Yongxing C. Research on process supervision and quality control system of modular pharmaceutical production line. In: Computer Science and Information Technology, 2009. ICCSIT 2009. 2nd IEEE International Conference on; 2009. p. pp. 69 –73.
- [154] Bunch L, Breedy M, Bradshaw JM, Carvalho M, Suri N, Uszok A, et al. Software agents for process monitoring and notification. In: Proceedings of the 2004 ACM symposium on Applied computing 967921; 2004. p. 94–100.

- [155] Avouris NM, Van Liedekerke MH, Lekkas GP, Hall LE. User interface design for cooperating agents in industrial process supervision and control applications. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1993; vol. 38(No. 5): p. 873–890.
- [156] Simão JM. A contribution to the development of a HMS simulation tool and proposition of a meta-model for holonic control. Henry Poincaré Univ. (UHP), Curitiba, Brazil; 2005.
- [157] Georgoudakis M, Kalogeras A, Alexakos C, Charatsis K, Koubias S. A holonic ontology-based multi-agent system for the distributed scheduling and monitoring of industrial processes. In: *Emerging Technologies and Factory Automation, 2005. ETFA 2005. 10th IEEE Conference on*. vol.1; 2005. p. 6–920.
- [158] Pirttioja T, Halme A, Pakonen A, Seilonen I, Koskinen K. Multi-Agent System Enhanced Supervision of Process Automation. In: *Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications, 2006. DIS 2006. IEEE Workshop on*; 2006. p. 151–156.
- [159] Seilonen I, Pirttioja T, Appelqvist P, Koskinen K, Halme A. Modelling cooperative control in process automation with multi-agent systems. In: *Industrial Informatics. INDIN '04. 2004 2nd IEEE International Conference on*; 2004. p. 260–265.
- [160] Bogh SA, Blanke M. Fault-tolerant control-a case study of the Orsted satellite. In: *Fault Diagnosis in Process Systems (Digest No: 1997/174), IEE Colloquium on*; 1997. p. 1111–1113.
- [161] García HE. A hierarchical platform for implementing hybrid systems in process control. *Control Engineering Practice*. 1997; vol. 5(No. 6): p. 779–789.

- [162] Kwang-Hyun C, Jong-Tae L. Synthesis of fault-tolerant supervisor for automated manufacturing systems: a case study on photolithographic process. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*. 1998; vol. 14(No. 2): p. 348–351.
- [163] Rezg N, Niel E. Extension of the supervision concept to the monitoring of discrete event systems. In: *Emerging Technologies and Factory Automation, 1996. EFTA '96. Proceedings., 1996 IEEE Conference on*. vol. 1; 1996. p. 150–156.
- [164] Lunze J, Nixdorf B, Richter H. Process supervision by means of a hybrid model. *Journal of Process Control*. 2001; vol. 11(No. 1): p. 89–104.
- [165] Lambert M, Riera B, Martel G. Application of functional analysis techniques to supervisory systems. *Reliability Engineering and System Safety*. 1999; vol. 64: p. 209–224.
- [166] Morgenstern A, Schneider K. Synthesizing Deterministic Controllers in Supervisory Control. In: Filipe J, Ferrier JL, Cetto JA, Carvalho M, editors. *Informatics in Control, Automation and Robotics II*. Springer Netherlands; 2007. p. 95–102.
- [167] Prosser J, Selinsky J, Kwatny H, Kam M. Supervisory control of electric power transmission networks. *Power Systems, IEEE Transactions on*. 1995; vol. 10(No. 2): p. 1104 –1110.
- [168] Rezg N, Neubert G, Favrel J. Proactive supervision control in discrete event systems using Petri nets. In: *Emerging Technologies and Factory Automation Proceedings, 1997. ETFA '97., 1997 6th International Conference on*; 1997. p. 275–280.
- [169] Basile F, Chiacchio P. On the Implementation of Supervised Control of Discrete Event Systems. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*. 2007; vol. 15(No. 4): p. 725–739.

- [170] Charbonnier F, Alla H, David R. Discrete-event dynamic systems. Control Systems Technology, IEEE Transactions on. 1999; vol. 7(No. 2): p. 175–187.
- [171] Boyer SA. SCADA: supervisory control and data acquisition. 3rd ed. Virginia University: ISA, The Instrumentation Systems and Automation Society; 2004.
- [172] IEEE 100 The Authoritative Dictionary of IEEE Standards Terms Seventh Edition; 2000.
- [173] Da Silveira MR, Combacau M. Supervision and control of heterarchical discrete event systems. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica. 2006; vol. 17(No. 1): p. 1–9.
- [174] Isermann R. On fuzzy logic applications for automatic control, supervision, and fault diagnosis. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on. 1998; vol. 28(No. 2): p. 221–235.
- [175] Suárez S, López B, Melendez J. Towards holonic multiagent systems: Ontology for supervision tool boxes. Workshop de Agentes Inteligentes en el tercer milenio. 2003;p. 1–8.
- [176] Zapata G, Cardillo J, Chacón E. Aportes metodológicos para el diseño de sistemas de supervisión de procesos continuos. Información Tecnológica. 2011; vol. 22: p. 97–114.
- [177] Chacón E, De Sarrazin G. Automatización Integral de Sistemas de producción continuos: control y supervisión. Libro texto posgrado Ingeniería de control, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela; 1999.
- [178] Lennartson B, Tittus M, Egardt B, Pettersson S. Hybrid systems in process control. Control Systems Magazine, IEEE. 1996; vol. 16(No. 5): p. 45–56.

- [179] Lygeros J. Hierarchical, Hybrid Control of Large Scale Systems. University of California at Berkeley; 1996.
- [180] De Schutter B, Heemels M. Modelling and control of hybrid systems. TU Delf; 2007.
- [181] Lygeros J. Lecture notes on hybrid systems. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Patras, Patras, Greece; 2004.
- [182] Lefebvre D, Delherm C, Leclercq E, Druaux F. Some contributions with Petri nets for the modelling, analysis and control of HDS. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*. 2007; vol. 1(No. 4): p. 451 – 465. Proceedings of the International Conference on Hybrid Systems and Applications, Lafayette, LA, USA, May 2006: Part I.
- [183] Champagnat R, Esteban P, Pingaud H, Valette R. Petri net based modeling of hybrid systems. *Computers in Industry*. 1998; vol. 36(No. 1-2): p. 139–146.
- [184] Villani E, Pascal JC, Miyagi PE, Valette R. A Petri net-based object-oriented approach for the modelling of hybrid productive systems. *Nonlinear Analysis*. 2005; vol. 62(No. 8): p. 1394 – 1418. *Hybrid Systems and Applications*.
- [185] Blouin S. Finite-State Machine Abstractions of Continuous Systems. Queens University. Kingston, Ontario, Canada; 2003.
- [186] Koutsoukos XD, Antsaklis PJ, Stiver JA, Lemmon MD. Supervisory control of hybrid systems. *Proceedings of the IEEE*. 2000; vol. 88(No. 7): p. 1026 –1049.
- [187] Ohashi K, Shin KG. Model-based control for reconfigurable manufacturing systems. In: *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA*. IEEE International Conference on. vol. 1; 2001. p. 553–558.

- [188] Tittus M, Egardt B, Lennartson B. Plant and Product Models for Batch Processes. In: In Proc. of the ECC'95; 1995. p. 1–10.
- [189] Vahidi A, Fabian M, Lennartson B. Generic resource booking models in flexible cells. In: Intelligent Control, 2001. (ISIC '01). Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on; 2001. p. 252–257.
- [190] Blanke M, Kinnaert M, Staroswiecki J, Lunze J. Diagnosis and fault-tolerant control. Springer Berlin / Heidelberg; 2006.
- [191] Durán JE. Representación, modelado, y supervisión de procesos de producción por Lotes. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela; 2008.
- [192] Parra C. Modelado y simulación del control supervisorio para sistemas holónicos de producción continua. Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela; 2010.
- [193] Rojas OA. Principios de un modelo dinámico para la integración de empresas de manufactura. Universidad del Cauca, Colombia; 2007.
- [194] Ruiz Jaramillo N. Diseño de un sistema de control lógico programable para la supervisión convencional de una central térmica ciclo combinado. Escuela de Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; 2009.
- [195] Palacio Betancur JE. Un modelo bajo el paradigma holónico de una turbina de gas. Escuela de Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; 2009.
- [196] Bedoya Mejía JC. Diseño de un sistema de supervisión convencional para una central térmica de ciclo combinado, mediante la implementación de un scada. Escuela de Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; 2010.

- [197] Hincapie Mesa LI. Aplicación de un método de diseño formal para la supervisión de una caldera. Escuela de Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; 2008.
- [198] Patiño López VA. Diseño de criterios formales para la implementación de sistemas de supervisión. Escuela de Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; 2009.
- [199] Wark K, Richards DE, Moretín PAM. Termodinámica. McGraw-Hill; 2000.
- [200] Moran MJ, Shapiro HN. Fundamentals of engineering thermodynamics. Wiley; 2006.
- [201] De Mello FP, Ahner FJ, Anderson PM, Doudna JH, Kundur P, Richardson LM, et al. Dynamic models for combined cycle plants in power system studies. Power Systems, IEEE Transactions on. 1994; vol. 9(No. 3): p. 1698 –1708.
- [202] Yee SK, Milanovic JV, Hughes FM. Overview and Comparative Analysis of Gas Turbine Models for System Stability Studies. Power Systems, IEEE Transactions on. 2008; vol. 23(No. 1): p. 108 –118.
- [203] Hannett LN, Khan AH. Combustion turbine dynamic model validation from tests. Power Systems, IEEE Transactions on. 1993; vol. 8(No. 1): p. 152 –158.