

PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA MODELAR SISTEMAS
DISTRIBUIDOS CON ORIENTACIÓN A AGENTES UTILIZANDO REDES DE
PETRI COLOREADAS

JESUS FILANDER CARATAR CHAUX
COD. 1204344

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2015

PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA MODELAR SISTEMAS
DISTRIBUIDOS CON ORIENTACIÓN A AGENTES UTILIZANDO REDES DE
PETRI COLOREADAS

AUTOR:
JESUS FILANDER CARATAR CHAUX
COD 1204344

Proyecto de Grado para optar por el título de
Maestría en Ingeniería Mecánica

Director:
José Isidro García, PhD.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2015

JESUS FILANDER CARATAR CHAUX

JOSÉ ISIDRO GARCÍA MELO
Director

Jurado

Jurado

Dedicatoria

Dedicado principalmente a Dios

*A mi hermosa hija que es mi motivo de
todo, y a mi esposa por su apoyo.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a **Dios** por la oportunidad de obtener este logro, agradezco a mis abuelos **María Adelinda Ramírez y Florentino Getial** por brindarme bases tan firmes y ejemplos maravillosos que me guiaron por el camino de la educación.

Gracias al profesor José Isidro García por su voto confianza al permitirme trabajar en este proyecto.

Doy gracias a todos los que me apoyaron para alcanzar esta meta, en particular a mis compañeros del Grupo de Investigación de Mejoramiento Industrial y a mi esposa, Nohora Noguera, que de forma desinteresada me apoyaron en los momentos difíciles.

A todos aquellos que de forma directa o indirecta colaboraron con el alcance de este proyecto de vida les agradezco, aunque no los mencione; no hay espacio suficiente para listarlos a todos.

Muchas gracias a todos.

Jesus Filander Caratar Chau

Contenido

Pág.

Lista de Figuras	VI
Lista de Tablas.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	4
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.2 OBJETIVO GENERAL	4
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	5
2 MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 MODELADO CON REDES DE PETRI.....	7
2.2 REDES DE PETRI COLOREADAS	10
2.2.1 Marcas	11
2.2.2 Arcos	11
2.2.3 Transiciones.....	11
2.2.4 Lugares	12
2.3 CPN TOOLS	13
2.3.1 Componentes de <i>CPN Tools</i>	14
2.3.1.1 Índex o índice	15
2.3.1.2 Espacio de trabajo	15
2.3.1.3 Menú de marcas.....	16
2.4 SISTEMAS DISTRIBUIDOS	16
2.4.1 Sistema distribuido intra-empresa.....	18
2.4.2 Sistema distribuido inter-empresa.....	18
2.5 AGENTES.....	19
2.5.1 Arquitectura de agentes	21
2.5.1.1 Arquitectura deliberativa	22
2.5.1.2 Arquitectura de agentes reactivos	23
2.5.1.3 Agentes híbridos.....	24

2.6	SISTEMAS MULTI-AGENTES.....	25
3	ESTADO DEL ARTE	28
4	MEDOLOGÍA PARA MODELADO	30
4.1	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	30
4.2	DEFINICIÓN DE VARIABLES Y COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA...	32
4.3	MODELAMIENTO ESTRUCTURAL	33
4.4	MODELAMIENTO CONCEPTUAL Y FUNCIONAL	34
4.5	ANÁLISIS DEL MODELO	35
5	EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....	36
5.1	MODELO SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE DE CAÑA	36
5.1.1	Recolección de información del sistema	36
5.1.2	Definición de variables y comportamiento del sistema.....	39
5.1.3	Modelo estructural.....	42
5.1.4	Modelado conceptual y funcional	43
5.1.5	Análisis del modelo	49
5.2	MODELADO DE LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA EN PUERTO MALLARINO CALI – VALLE DEL CAUCA.....	50
5.2.1	Recolección de información de la planta.....	50
5.2.2	Definición de variables y comportamiento del sistema.....	53
5.2.3	Modelo estructural.....	54
5.2.4	Modelado conceptual y funcional	55
5.2.5	Análisis del modelo	62
6	CONCLUSIONES.....	64
7	BIBLIOGRAFÍA	65

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 2.1 Componentes de una Red de Petri.....	8
Figura 2.2 Ilustración de una regla de transición	9
Figura 2.3 Declaración de diferentes tipos de colores de una CPN.....	10
Figura 2.4. Declaración de conjunto de colores utilizando combinaciones.	11
Figura 2.5. Tipos de colores de una CPN (a) entero, (b) unidad, (c) texto (string), (d) combinación entero y real.	11
Figura 2.6. Ejemplo función «case» a la salida de una transición.	12
Figura 2.7. Ejecución de función «case» con id=2.	12
Figura 2.8 Características de un lugar.	12
Figura 2.9. a.) Confusión simétrica b.) Confusión asimétrica c.) Conflicto, selección o decisión d.) Concurrencia, arreglo «and» e.) Paralelismo y/o concurrencia.	14
Figura 2.10 Componentes de CPN Tools	15
Figura 2.11 Menú de marcas de CPN Tools.	16
Figura 2.12. Sistema Distribuido.	16
Figura 2.13. Falla en componente de sistema distribuido.	17
Figura 2.14. Sistema distribuido intraempresa.	18
Figura 2.15. Sistema productivo distribuido inter-empresa.	19
Figura 2.16. Agente inteligente y Sistema artificial.	20
Figura 2.17 Esquema de un Agente Inteligente	20
Figura 2.18. Características de un agente inteligente.	21
Figura 2.19 Arquitectura general de un agente.	22
Figura 2.20 Arquitectura deliberativa – Agente BDI (tomada de [41])	23
Figura 2.21 Arquitectura agente reactivo (tomada de [41])	24
Figura 2.22 Arquitectura híbrida (tomada de [41]).	24
Figura 2.23. Sociedad de Agentes o SMA	26
Figura 2.24. Propiedades de SMA,	27
Figura 4.1 Metodología de modelado de SP.....	30
Figura 4.2. Medios de búsqueda y recolección de información.	31
Figura 4.3. Esquema estructural de un proceso productivo.	33
Figura 5.1. Semi remolque ZAF HD 32.....	37
Figura 5.2. Autovolteo ZAF 10.	37
Figura 5.3. Distribución de etapas de la empresa.....	38
Figura 5.4. Diagrama general del proceso de producción.	39
Figura 5.5. Estructura de canasta armada.	40
Figura 5.6. Componentes generales de estructura de un transporte de caña.	41
Figura 5.7. Forros de canasta de tren cañero	41
Figura 5.8. Modelo estructural de proceso productivo	43
Figura 5.9. Actividades por etapas del sistema.	43
Figura 5.10. Modelo general de producción.....	44

Figura 5.11. Ejemplo de estado similar para dos productos donde el proceso es llevado en diferente E.T.	45
Figura 5.12. Modelo agente asignar estaciones de trabajo.	46
Figura 5.13. Modelo de MÓDULO DE ACCIÓN ASIGNAR ESPACIO EN PLANTA.	47
Figura 5.14. Modelo de MÓDULO PERCIBIR ENTORNO Y MODIFICAR ESTADO INTERNO.....	48
Figura 5.15. Estado inicial del proceso, nueva solicitud de producto.....	48
Figura 5.16. Productos terminados según O. T.	49
Figura 5.17 Planta Puerto Mallarino.....	50
Figura 5.18 Esquema de planta de potabilización.	51
Figura 5.19 Entrada bocatoma.....	51
Figura 5.20 Estructura Desarenador.....	52
Figura 5.21 Reactores.	52
Figura 5.22 Filtros rápidos para agua clarificada.	53
Figura 5.23 Modelo estructural general del proceso productivo de agua potable planta Puerto Mallarino.	55
Figura 5.24 Modelo Estructural de bocatoma	55
Figura 5.25. Diagrama de flujo a nivel macro planta Puerto Mallarino.....	56
Figura 5.26. Levantamiento conceptual inicial.	56
Figura 5.27. Esquema conceptual refinado del modelo, primera etapa.	57
Figura 5.28. Esquema conceptual refinado del modelo, segunda etapa.	57
Figura 5.29. Esquema conceptual refinado del modelo general.	58
Figura 5.30. Colores y variables definidas para propiedades del agua.....	59
Figura 5.31. Modelo de AGENTE CONDICIONES RÍO y AGENTE RÍO.	60
Figura 5.32. Modelo de Estación de bombeo en bocatoma.....	61
Figura 5.33. Modelo estación de desarenado.....	62
Figura 5.34. Datos del sistema real.	63
Figura 5.35. Datos obtenidos con el modelo.....	63

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 5.1. Áreas del proceso productivo.....	38
Tabla 5.2. Descripción de marcas en un lugar o estado.	45
Tabla 5.3. Etapas y variables del sistema.....	53
Tabla 5.4. Variables supervisadas en la planta.....	58

INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Productivos (SP) se definen como aquellos sistemas que integran o combinan cierta cantidad de recursos (energía, personas, materia prima, máquinas, etc.) para llevar a cabo un proceso donde se generen bienes o servicios destinados a satisfacer una necesidad [1], [2]. Actualmente, estas organizaciones se caracterizan por un incremento en la demanda de los requerimientos que les permitan satisfacer las frecuentes variaciones del mercado globalizado, como las siguientes: variedad de productos, disminución del ciclo de vida de los mismos, flexibilidad en la producción, necesidad de respuestas rápidas a la demanda de productos, ampliación de los mercados debido al desarrollo de las tecnológicas de la comunicación, entre otros [3]. Esto ha incentivado la evolución de la estructura organizacional centralizada a una distribuida. Donde, según [4], la define como un conjunto de entidades autónomas y heterogéneas ubicadas en un lugar específico o distribuidas geográficamente, las cuales se integran mediante el uso de las tecnologías de información inteligente para obtener un sistema ágil, flexible y robusto.

Entre las principales ventajas de los Sistemas Distribuidos se tiene: flexibilidad, rápida respuesta a fallas y capacidad de compartir recursos para alcanzar un objetivo, entre otras [5]. Sin embargo, la complejidad del sistema se ve incrementada debido a la autonomía de sus componentes y a la necesidad de una correcta integración entre ellos [4]. Así, al considerar las consecuencias económicas o de seguridad derivadas de una inadecuada especificación de este tipo de sistemas, es recomendable el uso de modelos. Por ejemplo, según [6], en los SP generadores de bienes existen operaciones que no pueden ser revertidas, pues las respectivas modificaciones en las entidades físicas no son irreversibles. En consecuencia, un modelo permite asegurar la correcta definición del proceso productivo a ser desarrollado en los módulos autónomos, así como la integración entre ellos, previniendo las consecuencias económicas o de seguridad derivadas una inadecuada especificación. En este contexto, varios autores recomiendan el uso de modelos formales para la especificación de SP distribuidos debido a la formalidad de los procesos de verificación y validación tanto de la estructura como de la dinámica del SP [5], [6] y [7]. De esta forma, el modelado permite analizar e implementar mejoras y/o también evaluar el comportamiento del SP antes de su fabricación o implementación; de esta manera, es posible obtener una mayor seguridad en la producción, reducción de tiempos muertos por fallas o malas implementaciones del sistema, entre otras características [7]. Así, el uso de

herramientas en el modelado permiten especificar, modelar y evaluar los SP desde diferentes escenarios para obtener SP eficientes, flexibles y libres de bloqueos [8].

Entre las soluciones propuestas tenemos por ejemplo, el uso de la herramienta llamada Red de Petri (RP) permite modelar sistemas a eventos discretos que tienen características de ser concurrentes, distribuidos, estocásticos y no determinismos, además de otras características [9], [10] y [11]. Para esto, el SP distribuido se considera con una dinámica orientada por la ocurrencia instantánea de eventos, definidos como sistemas a eventos discretos [12]. Específicamente, una extensión de este tipo de herramienta, denominada Redes de Petri Coloreadas (del inglés, *Coloured Petri Nets* o *CP-nets* or CPN), ofrece características que permiten modelar Sistemas Distribuidos a eventos discretos y utiliza un lenguaje de programación de alto nivel,[9], [12],[13],[14], [15].

Considerando las demandas de los actuales SP, un reto del proceso de modelado radica en representación del SP que considere comportamientos inteligentes. Es decir, que el SP establezca políticas de decisión que le permita una adaptación a las variaciones del entorno. De esta forma, considerando un abordaje dentro del marco de la inteligencia artificial, soluciones orientadas a agentes han sido planeadas para estructuras distribuidas [16], [17]. Donde, según [18], un agente es un sistema computacional o una entidad inteligente, generalmente dotado de intencionalidad.

Estos sistemas hacen parte de los sistemas basados en el conocimiento, donde cada entidad posee metas y unos planes de acción asociados para alcanzar estas metas. Así, los agentes poseen la capacidad de tomar decisiones e interactuar con el entorno para realizar diferentes operaciones o reaccionar ante determinados eventos e, incluso, trabajar como sociedad al agruparse con otros agentes para alcanzar un objetivo [19], [17], [20], [16]. En este contexto, las RP han demostrado su eficacia en la representación de sistemas a eventos discretos desde un enfoque de agentes inteligentes [20], [21] y [22]. Donde, de forma general, la representación en RP de un SP distribuido puede ser combinado con el criterio de toma de decisiones inteligentes basado en agentes, lo cual permite, por ejemplo, desarrollar un modelo que considere la experticia de los operarios del sistema para responder a eventos inesperados o administrar recursos de una planta. [17],[23].

En la literatura se pueden encontrar diversos trabajos relacionados con la construcción de modelos en RP de sistemas productores de bienes o servicios, por ejemplo [24]–[26]. Todos estos trabajos, aunque muestran resultados mediante los modelos obtenidos, tienen limitada la información referente a la metodología utilizada para abordar el problema de modelado; es decir, no se presenta una guía que permita de cierta manera replicar el proceso de obtención de modelos. En este contexto, este trabajo presenta una metodología estructurada que permite

identificar, simular y evaluar SP mediante el uso de RP desde un enfoque de agentes [20] [27].

Al considerar la necesidad de evaluar los planteamientos realizados, fueron implementados en dos ejemplos de aplicación donde los agentes representan la toma de decisiones por parte del personal experto y el comportamiento del entorno. El primer modelo representa un proceso de fabricación de trenes cañeros (transportes de caña de azúcar); el segundo modelo es desarrollado para algunas etapas de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Puerto Mallarino, ubicada en la ciudad de Cali, Valle del Cauca.

La estructura de este trabajo es la siguiente: en el capítulo 1 se presentará el planteamiento del problema de investigación, se detallan los objetivos y la justificación de este proyecto; en el capítulo 2 se presenta el marco teórico, en el capítulo 3 se presenta el estado del arte, el capítulo 4 detalla la metodología utilizada para el desarrollo de modelos y, finalmente, en el capítulo 5 se muestran dos ejemplos de aplicación donde se implementa la metodología de modelado resultante de la investigación.

1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los SP actuales deben cumplir con los exigentes requerimientos del mercado dinámico [4]. La calidad del producto, los bajos costos y la flexibilidad para proveer diferentes tipos de productos en el menor tiempo son exigencias comunes dentro de la actividad económica y productiva a nivel mundial [28]; en este contexto, los sistemas de fabricación han incrementado sus dispositivos y estrategias de producción, con el fin de acoplarse a estos exigentes requerimientos.

Como resultado, los SP presentan una mayor complejidad en su estructura productiva, en función de la alta dinámica entre los componentes que la integran; este hecho ha impactado los costos de producción y la estructura organizativa. Al considerar las altas inversiones económicas necesarias para obtener SP flexibles y al tener en cuenta los riesgos de una inadecuada especificación, se hace recomendable el modelado de los procesos productivos.

En la literatura aunque se encontraron diferentes trabajos acerca del proceso de modelado [17], [20], [29], [30], [26] en la mayoría no se establece una estrategia clara que permita asegurar los resultados del proceso de modelado con un enfoque de agentes. Es decir, que permita crear modelos que incluyan algunas características de los entes expertos en modelos, donde algunas o todas las decisiones cruciales de los procesos sean llevadas a cabo con alguna clase de inteligencia. Donde el término inteligencia es la capacidad de respuesta ante eventos que acontecen en un entorno dado para cumplir unas metas específicas [31].

1.2 OBJETIVO GENERAL

Proponer una metodología para modelar Sistemas Distribuidos con orientación a agentes utilizando Redes de Petri Coloreadas (CPN).

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar tipos y técnicas de modelado de Sistemas Distribuidos.
- Conceptualizar las características principales de los Sistemas Productivos Distribuidos para el desarrollo de modelos.

- Establecer las herramientas necesarias para el modelado con Redes de Petri Coloreadas aplicadas a sistemas distribuidos.
- Establecer una arquitectura distribuida con orientación a agentes.
- Determinar las estrategias de control necesarias para cumplir con las especificaciones del sistema.
- Modelar un ejemplo aplicativo de un sistema productivo distribuido utilizando Redes de Petri Coloreadas.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los sistemas productivos (SP) continuamente están procurando una mejor eficiencia a un menor costo. Para esto, son utilizadas herramientas computacionales que permiten simular modelos o abstracciones de dichos sistemas [10]–[12], [18], [32]. Así, algunas herramientas computacionales permiten elaborar modelos virtuales de SP distribuidos a eventos discretos para evaluar su desempeño y así poder determinar qué opción, qué se debe implementar o cómo se debe afectar un sistema ya implementado, en aras de aumentar su producción, mejorar su calidad, aumentar su flexibilidad y reducir costos, entre otros objetivos [10], [21], [24], [25].

Como consecuencia, es recomendable el planteamiento de estrategias que permitan dar una acertada respuesta a las rigurosas demandas de eficiencia y eficacia relacionadas con los sistemas productivos para abastecer la creciente y exigente demanda del mercado. Para esto, se hace necesario un modelo del proceso productivo que permita simular su comportamiento. Sin embargo, al considerar la diversidad de los recursos involucrados, así como la dinámica del proceso que depende de una variedad de decisiones y hechos realizados de forma natural (personal experto, condiciones naturales, etc.), la tarea de modelado no es una tarea trivial.

Diferentes investigaciones presentan información acerca del modelado de SP, mencionan en forma general la importancia de modelar y los resultados obtenidos del modelo, pero, en la mayoría de los casos, no se da una definición clara de cómo elaborar los modelos [32]–[34]. Teniendo en cuenta lo anterior, se carece de una metodología bien estructurada y detallada que facilite la obtención de un modelo.

Por lo anterior, la herramienta de las RP, teniendo en cuenta un enfoque de agentes, es un abordaje recomendable, ya que permiten simular algunos eventos propios de personal experto o procesos naturales que no son determinísticos y, al considerar

la dinámica del SP desde la ocurrencia instantánea de eventos, permiten generar modelos donde se plantea una metodología estructurada que permite identificar, simular y analizar el sistema. Adicionalmente, el modelo generado permite observar estados seleccionados del sistema para realizar futuros estudios de alertas tempranas de fallas de los dispositivos constituyentes del sistema.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 MODELADO CON REDES DE PETRI

Según [35], la abstracción de las características de un sistema para la creación de un modelo no es tarea trivial y depende en gran medida de las habilidades del proyectista. Es decir, no hay una receta estándar para modelar, ya que diferentes modeladores expertos pueden construir diferentes soluciones válidas de acuerdo a los requerimientos, la diferencia radica en la percepción y el nivel de abstracción que use el modelador. Por lo tanto, se pueden construir diferentes modelos en RP de un mismo problema y la mejor solución dependerá de los criterios de diseño, la complejidad de interpretación de la red, el tamaño, etc.

Una RP es una representación matemática e iconográfica que es utilizada en el modelado de sistemas a eventos discretos que permiten expresar eventos concurrentes o en paralelo, distribuidos, asincrónicos, determinísticos y/o estocásticos [12], [36]. Las RP fueron definidas en los años 1960 por Carl Adam Petri en su tesis doctoral, allí se encontró que las RP tienen propiedades que pueden modelar sistemas de eventos discretos como sistemas automatizados, sistemas de comunicación y los sistemas basados en computadoras [10].

Según [12], las RP son ampliamente utilizadas para modelar y analizar sistemas industriales por las siguientes razones: la semántica formal, la naturaleza gráfica, la expresividad, la disponibilidad de técnicas de análisis para probar las propiedades estructurales (invariancia y bloqueos, vivacidad, etc.) y la posibilidad de definir y evaluar los índices de desempeño (rendimiento, las tasas de ocupación, etc.).

Una red de Petri está formada por:

- **lugares** (P representados gráficamente mediante circunferencias).
 $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, es un conjunto finito de lugares, $n \geq 0$.
- **transiciones** (representadas por segmentos rectos verticales).
 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, es un conjunto finito de transiciones, $m \geq 0$.
- **Entradas (I) y salidas (O)** que mediante arcos dirigidos (flechas), definen las entradas y/o salidas de una transición a un lugar o de un lugar a una transición.
- **Marcas** («token») una marca se representa mediante un punto en el interior del círculo) que ocupan lugares (p). Los lugares contienen un número

cualquiera de marcas; las transiciones (t) consumen marcas desde un lugar de entrada y generan marcas a los lugares de llegada.

- Las transiciones que no tienen lugares de entrada se les llama *transiciones fuente*. Una transición fuente siempre está habilitada. Por otro lado, una transición sin lugares de salida consume marcas, pero no las produce.

En la Figura 2.1 se aprecian los componentes de una RP, en su forma básica las marcas que circulan en el modelo son idénticas. Existen extensiones de las RP que permiten manejar características distintivas representadas en las marcas, tiempo de activación y/o jerarquías, entre otras características [32], [37].

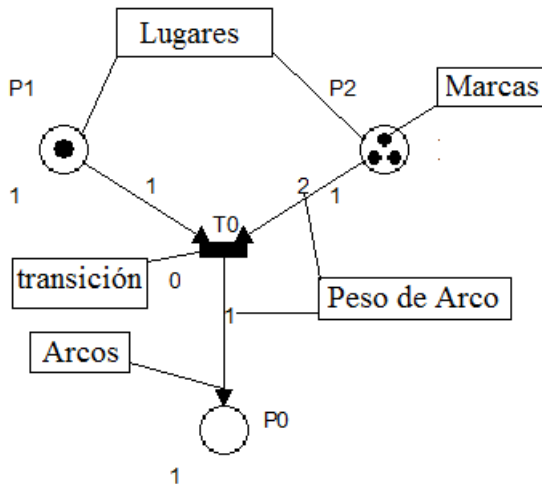


Figura 2.1 Componentes de una Red de Petri

Una transición puede ser destino u origen de varios lugares y un lugar puede ser el destino u origen de varias transiciones.

- Cada lugar tiene asociado un **estado**.
- A las transiciones se les asocia **eventos** de entrada (funciones lógicas de las variables de entrada).

Una transición se dice que está sensibilizada cuando todos sus lugares de origen están marcados.

Los arcos tienen un peso especificado, indicado con un número junto a ellos.

Una transición está habilitada si cada lugar de entrada tiene como mínimo una cantidad de marcas igual al peso del arco que tiene asociado.

Un ejemplo de transición habilitada y luego disparada se muestra en la Figura 2.2, en esta figura se modela el comportamiento de un robot de transporte de material, debe transportar una sola pieza a la vez, desde la entrada de material hasta la salida del almacén; en este modelo la entrada de material está habilitada para permitir el ingreso de una pieza a la vez y el robot tomará dicha pieza siempre que esté libre, lo cual sucede al inicio del proceso o al terminar de transportar una pieza.

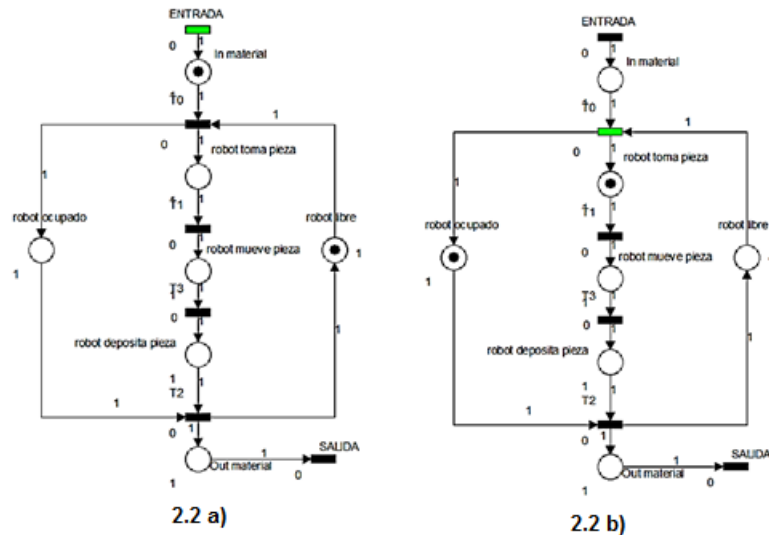


Figura 2.2 Ilustración de una regla de transición

En la Figura 2.2a se muestra una pieza en la entrada y el robot libre, lo que habilita la transición t_0 . En la Figura 2.2b se muestra el proceso un instante después de disparar la transición t_0 , esto da inicio al transporte de material y el robot, por lo tanto, se encuentra ocupado; observe que el robot estará disponible para tomar una nueva pieza cuando finalice el transporte de la actual pieza, es decir, cuando se dispare la transición T_2 .

Las RP clásicas son aquellas donde la marca no tiene ningún tipo de descripción (puntos de color negro), no interesa el tiempo en el modelo o no se consideran muchos detalles del modelo para evitar la explosión de estados. Cuando el interés del modelo va más allá y busca representar un sistema complejo en detalle o interesa el tiempo, se deben utilizar otras clases de redes que consideren los anteriores aspectos, de aquí surgen las RP estocásticas, temporizadas, coloreadas, etc., a las que se conocen como RP extendidas.

Para este proyecto se utilizarán las CPN para realizar el modelo, debido a las ventajas que esta extensión ofrece.

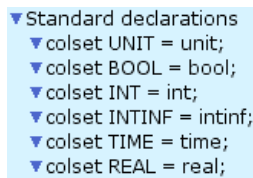
2.2 REDES DE PETRI COLOREADAS

Las Redes de Petri Coloreadas son una extensión a las RP clásicas que tienen incorporado un lenguaje de modelación [7], [9]. Las CPN se consideran un lenguaje de modelación desarrollado para sistemas en los cuales la comunicación, la sincronización y el uso compartido de recursos son importantes.

El lenguaje de CPN se basa en unos cuantos modelos primitivos muy útiles, lo que significa que relativamente se deben dominar pocas construcciones primitivas para poder construir modelos.

Las CPN combinan las ventajas de las RP clásicas y los lenguajes de programación de alto nivel (lenguaje de modelado estándar, en inglés *standard ML*); al utilizar esta herramienta se puede estudiar el comportamiento del sistema modelado mediante simulación, verificar propiedades a través del método estado espacio y llevar a cabo análisis de rendimiento mediante simulación [9].

Para esto, las CPN extienden la capacidad de contenido de información discreta de las marcas y permiten definir estas con el concepto de Color. Los colores definen los valores que pueden tomar las marcas, por ejemplo: entero, decimal, booleano, texto, unidad (marca que es similar al trabajar con redes ordinarias), y combinaciones de los anteriores (ver Figura 2.3). De esta forma, un modelo en CPN integra la información en una estructura basado en los componentes ordinarios de una RP (lugar, transición y arco) y una abstracción de alto nivel basado en la programación del contenido de las marcas. Adicionalmente, esta herramienta permite la definición de jerarquías. De esta forma, es posible encapsular diferentes niveles de abstracción del modelo en subredes, con lo que se evita una explosión de estados. Algunas de las características de los elementos gráficos de este tipo de redes se listan a continuación (ver Figura 2.3).

A screenshot of a software interface showing standard declarations for colors in CPN. The text is as follows:

```
▼ Standard declarations
▼ colset UNIT = unit;
▼ colset BOOL = bool;
▼ colset INT = int;
▼ colset INTINF = intinf;
▼ colset TIME = time;
▼ colset REAL = real;
```

Figura 2.3 Declaración de diferentes tipos de colores de una CPN.

Se debe tener en cuenta que se pueden crear combinaciones de conjuntos para crear un nuevo tipo de color (ver Figura 2.4)Figura 2.4. Declaración de conjunto de colores utilizando combinaciones.

```

▶ colset INT
▼ colset DATOS=product INT*INT*INT*INT*INT*INT*INT;
▼ colset REGISTRO= list DATOS;
▼ colset REGISTRADOS= list INT;
▼ colset PAR= product INT*INT;
▼ colset INFO=product INT*STRING;

```

Figura 2.4. Declaración de conjunto de colores utilizando combinaciones.

2.2.1 Marcas

Como se observó en la sección 2.1, las RP clásicas por convención utilizan marcas de color negro de tal manera que la descripción del estado y de los recursos viene dada únicamente por los lugares. Las CPN permiten trabajar con marcas de distintas características, las cuales transportan información (colores, valores o conjunto de valores asignados a las marcas) o tipos de datos que utilizará el sistema modelado. Esta distinción en los colores de marcas clarifica, al usuario, la interpretación de los recursos del sistema y la evolución de los estados durante la ejecución de la red, algunos ejemplos de diferentes tipos de marcas realizadas con el programa CPN Tools son mostradas en [7], [38]

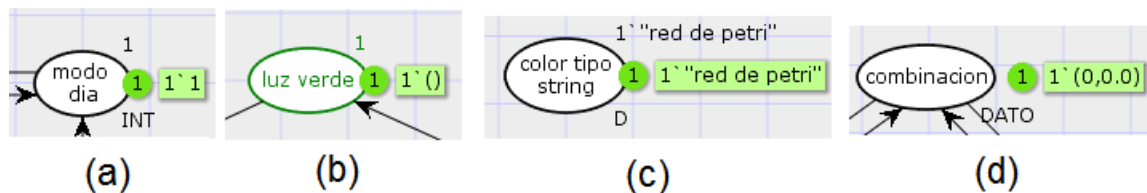


Figura 2.5. Tipos de colores de una CPN (a) entero, (b) unidad, (c) texto (string), (d) combinación entero y real.

2.2.2 Arcos

Los arcos tienen asociado un peso y un color que depende del lugar del que provengan o al que lleguen, estos colores se mueven en los arcos por medio de **variables** que están asociadas al conjunto color de salida o de entrada.

2.2.3 Transiciones

Las transiciones representan las acciones instantáneas que permiten cambiar el estado de la red cuando se disparan. En las CPN, las transiciones permiten una ejecución manual para que el usuario pueda modificar los valores de entrada y/o salida, o una automática, que permite que las probabilidades decidan algunos valores internos de las funciones de los arcos.

A las salidas de las transiciones se pueden aplicar funciones que según el argumento de la variable de entrada determina el valor de la marca de salida (ver Figura 2.6 y Figura 2.7).

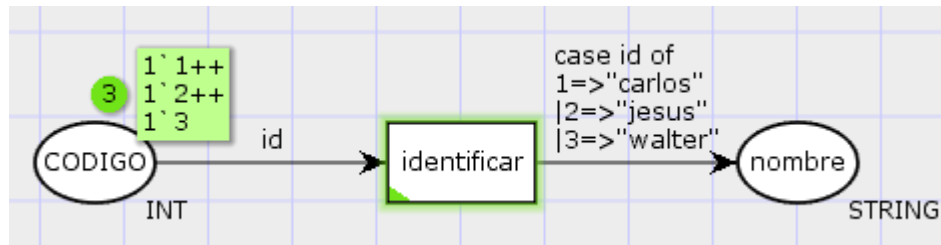


Figura 2.6. Ejemplo función «case» a la salida de una transición.

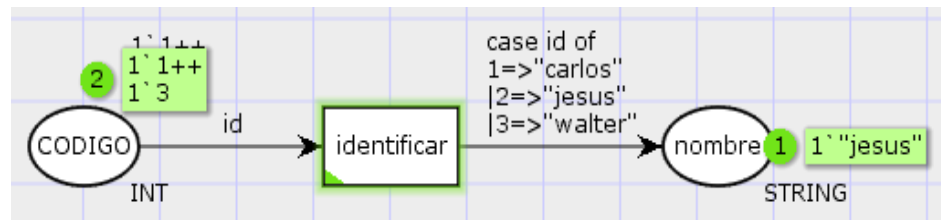


Figura 2.7. Ejecución de función «case» con id=2.

2.2.4 Lugares

Los lugares normalmente se representan mediante círculos o elipses, estos objetos almacenan marcas del color que tengan asociado. No es regla que todos los lugares manejen marcas de todos los colores que utiliza el modelo, en realidad, esto depende del resultado de las funciones asociadas a las transiciones de entrada y del tipo de color predefinido para cada lugar (ver Figura 2.8).

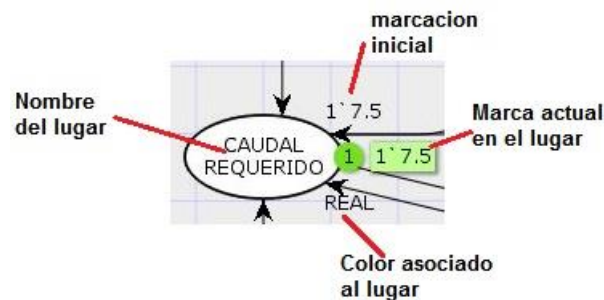


Figura 2.8 Características de un lugar.

2.3 CPN TOOLS

CPN Tools es un software desarrollado para editar, simular y analizar modelos en CPN. Esta herramienta fue originalmente desarrollada por el grupo CPN en la Universidad de Aarhus, desde el 2000 al 2010; los arquitectos principales detrás de esta herramienta son Kurt Jensen, Soren Christensen, Lars M. Kristensen y Michael Westergaard. Desde el otoño del 2010, *CPN Tools* es transferido al grupo de AIS de la Universidad Tecnológica de Eindhoven, Holanda [14].

«Un estudio realizado en 1998 con 91 software para el análisis y simulación con RP arrojó que el mejor software era el *Design CPN*, actualmente se recomienda utilizar *Cpntools* que es el paquete sucesor del *Design CPN*, ambos paquetes fueron desarrollados en la Universidad Aarhus por el profesor Kurt Jensen». [39]

Según [7], las CPN son aplicables de forma general en el desarrollo de sistemas donde la concurrencia y la comunicación son piezas claves, por ejemplo, procesos de negocios, sistemas de manufactura, sistemas de agentes, etc. En [38] podemos apreciar una lista de ejemplo de aplicaciones industriales que utilizan *CPN Tools*.

Debido a que la herramienta *CPN Tools* permite generar modelos con jerarquías, es posible desarrollar modelos con refinamientos sucesivos que dependen del nivel de detalle deseado por el modelador o por las necesidades del sistema, a partir de un modelo con un grado de abstracción mayor. En este sentido, las jerarquías permiten utilizar subredes que describen procesos internos que pueden tener un mayor grado de complejidad, esto permite una mayor compactación de la red. Esta compactación posibilita que el grado de abstracción del sistema sea mayor, así facilita su inspección y construcción por partes, es decir, divide el nivel de complejidad de todo el sistema a entidades modulares que son fáciles de construir y analizar. Los comportamientos u operaciones en cada módulo se construyen por medio de refinamientos continuos (subredes).

Adicionalmente, *CPN Tools* cuenta también con una interfaz gráfica de fácil manejo que permite analizar y simular los avances que se realizan en un determinado modelo. En la página web oficial de la herramienta (CPNTOOLS), se encuentra una extensa información, ejemplos y tutoriales que permiten aprender sobre el manejo de la herramienta [14]; igualmente, en [7] se tiene una guía detallada para el uso de la herramienta.

Algunas de las construcciones primitivas de un modelo CPN pueden ser observadas en la Figura 2.9.

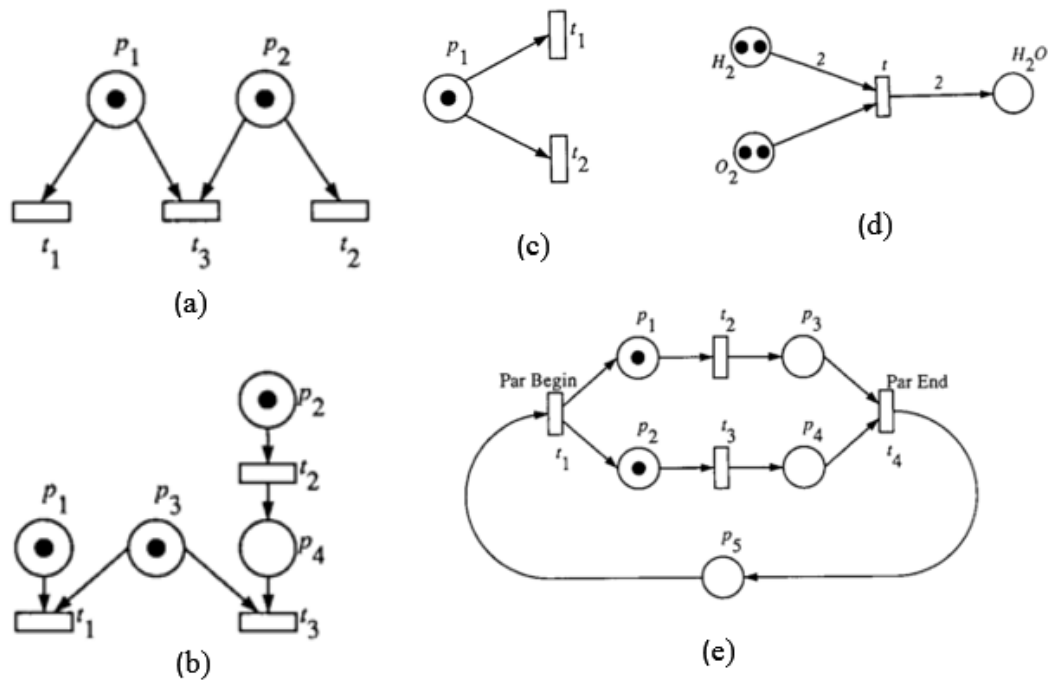


Figura 2.9. a.) Confusión simétrica b.) Confusión asimétrica c.) Conflicto, selección o decisión d.) Concurrency, arreglo «and» e.) Paralelismo y/o concurrency.

Tomado de: T. Murata, "Petri nets: Properties, analysis and applications", 1989.

En 2.9 a) se observa una confusión simétrica que describe un proceso donde se presenta concurrency y conflicto, ya que t_1 y t_2 son concurrentes, pero ambos están en conflicto con t_3 ; en 2.9 b) se tiene un proceso donde t_1 y t_2 son concurrentes, pero estarán en conflicto si t_2 se dispara antes de t_1 ; 2.9 c) representa un conflicto entre t_1 y t_2 ; en 2.9 d) muestra un arreglo donde dos estados con sus respectivos pesos son necesarios para que se ejecute t ; 2.9 e) representa un proceso concurrente donde al disparar t_1 el proceso se divide y opera de forma paralela hasta que converge en una transición en este caso en t_4 .

2.3.1 Componentes de CPN Tools

Los componentes de la herramienta se muestran en la Figura 2.10, estos sirven para la creación de elementos gráficos, variables, funciones, simulación y análisis. Este programa maneja paletas en lugar de pestañas como lo hace *Windows* y dichas paletas pueden ser activadas desde el índice o también con el *click* derecho del ratón, el cual desplegará diferentes opciones que dependen del lugar donde el puntero esté ubicado.

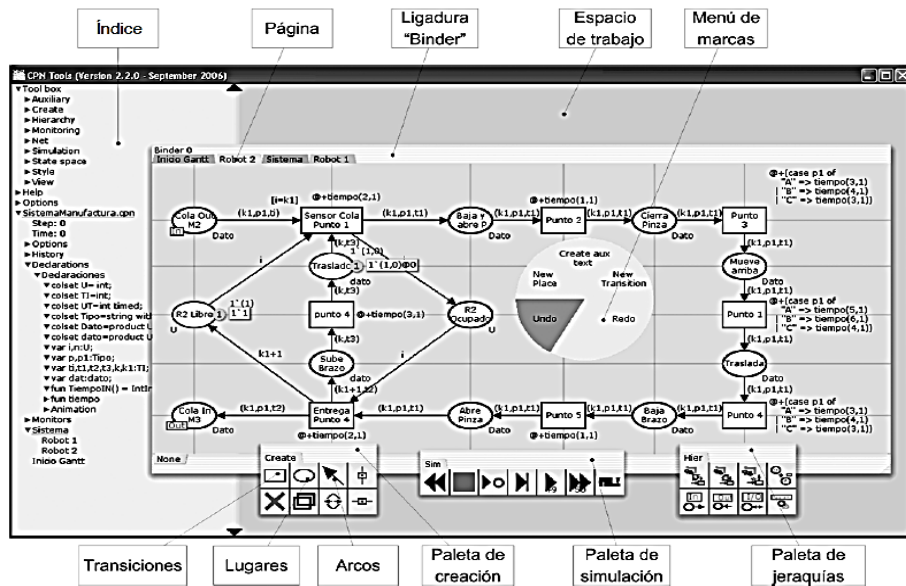


Figura 2.10 Componentes de CPN Tools

Tomado de: Murillo Soto, Luis D., *Modelado de una celda de manufactura flexible con redes de petri coloreadas*, 2010.

Esta herramienta está compuesta por tres partes:

2.3.1.1 Índice o índice

En este espacio están las herramientas necesarias para crear, analizar y simular las redes, y es similar al menú tipo árbol del administrador de archivos de «*Windows Explorer*». El índice consta de cuatro entradas principales que aparecen en el siguiente orden: «*Tool box*», «*Help*», «*Options*», y los proyectos cargados en la herramienta. La entrada «*Tool box*» despliega todos los grupos de herramientas disponibles para la creación de las redes, estos grupos son llamados paletas; para desplegar las paletas en pantalla se selecciona la paleta deseada y se arrastra al espacio de trabajo.

También en este espacio aparece el nombre del proyecto y las opciones para la creación de variables y de los colores que harán parte de la Red de Petri (para más información ver [9], [14]).

2.3.1.2 Espacio de trabajo

Es donde se crean las páginas para elaborar las redes y subredes del sistema, es decir, donde se ubicará el ambiente gráfico del programa; se pueden crear muchas páginas independientes o también se pueden insertar varias pestañas en una sola página, todo depende de cómo se desee trabajar (ver Figura 2.10).

2.3.1.3 Menú de marcas

Este menú aparece con el botón derecho del ratón y es fácil de reconocer por ser circular. Por medio de un menú contextual llamado Menú de marcas se obtienen opciones que dependen de la zona específica en la GUI que se seleccione. Así, por ejemplo, si se ubica en una página donde no haya objetos, muestra la opción de crear lugar, transición, texto auxiliar y las opciones de deshacer (ver Figura 2.11).

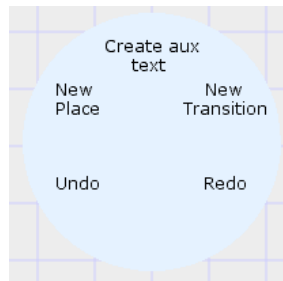


Figura 2.11 Menú de marcas de CPN Tools.

2.4 SISTEMAS DISTRIBUIDOS

En capítulos anteriores se menciona de forma repetitiva el término «Sistemas Distribuidos», en este capítulo se definirán aspectos relevantes sobre los diferentes tipos de Sistemas Distribuidos (SD) y su importancia en el entorno mundial en la actualidad.

Los SD se pueden relacionar a procesos de fabricación distribuida o a sistemas que interactúan de forma distribuida, es decir, sistemas o procesos que trabajan de forma modular en el interior de su organización y también en el exterior, lo que permiten suplir todas las necesidades de la entidad (ver Figura 2.12).

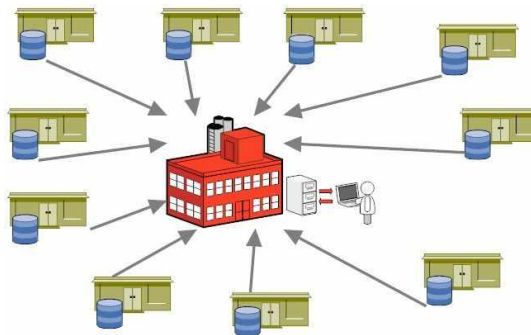


Figura 2.12. Sistema Distribuido.

Tomado de: competencia informática, procesamiento distribuido.

<http://competencia-informatica.blogspot.com/2012/03/introduccion-las-redes-segundo-parcial.html>

Según [40], un SD es aquel donde los componentes o módulos que se encuentran interconectados en red se comunican y coordinan sus acciones por medio de sistemas de información o sistemas inteligentes. Los SD tienen las siguientes características: concurrencia de los componentes, carencia de un reloj global y fallos independientes de los componentes, lo que permite corregir dicha falla sin detener todo el sistema como se muestra en la Figura 2.13.

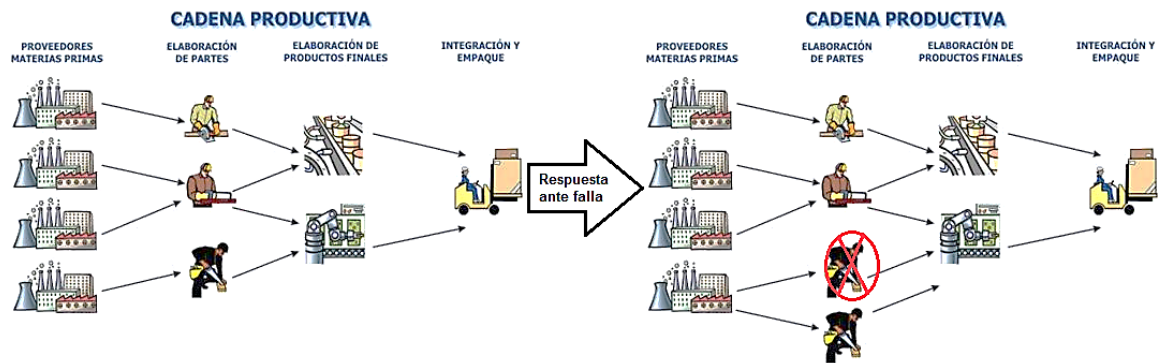


Figura 2.13. Falla en componente de sistema distribuido.
Adaptado de: Carrillo Aldana Emmanuel, gestión de procesos industriales.
<http://gestiondeprocesosi.blogspot.com/>

El concepto de SD Industriales abarca un campo muy amplio, según [5] se puede aplicar en diferentes niveles dentro de una fábrica, desde la simple automatización de un proceso aislado hasta la gestión integral de una fábrica. Este hecho hace que exista un gran número de posibilidades a la hora de la implantación de este tipo de instalaciones, se puede recurrir a diferentes elementos y tecnologías esto depende de las necesidades y el tipo de automatización o intercomunicación que se desee llevar a cabo. Por otro lado, a menudo existen tecnologías y sistemas con características similares orientados a un mismo rango de aplicaciones; por tanto, resulta importante ser capaces de disponer de suficiente información acerca de los diferentes fabricantes y sus tecnologías para instalar de forma correcta los sistemas en cada uno de los diferentes niveles de la automatización de procesos industriales.

En este contexto, los SP distribuidos industriales conciben un ambiente de integración de dispositivos o módulos de producción autónomos para conformar un sistema, esta integración tiene un medio de comunicación que permite coordinar los procesos llevados a cabo en cada módulo donde dicha comunicación se realiza mediante los sistemas de información o sistemas inteligentes, por ejemplo: intranet, internet, etc.

Según [4], los sistemas de producción distribuida pueden clasificarse según su ubicación como: Sistema distribuido intra-empresa y sistema distribuido inter-empresa.

2.4.1 Sistema distribuido intra-empresa

Este tipo de sistema está conformado por una planta, empresa o entidad donde todas sus operaciones son realizadas en su interior mediante módulos independientes y autónomos que se adaptan para cumplir con un determinado proceso de modo que todas las actividades estén integradas entre estos para lograr un objetivo en común. Estos sistemas intra-empresa pueden estar organizados e integrados utilizando redes de comunicación local (LAN) o a través de internet, Figura 2.14.

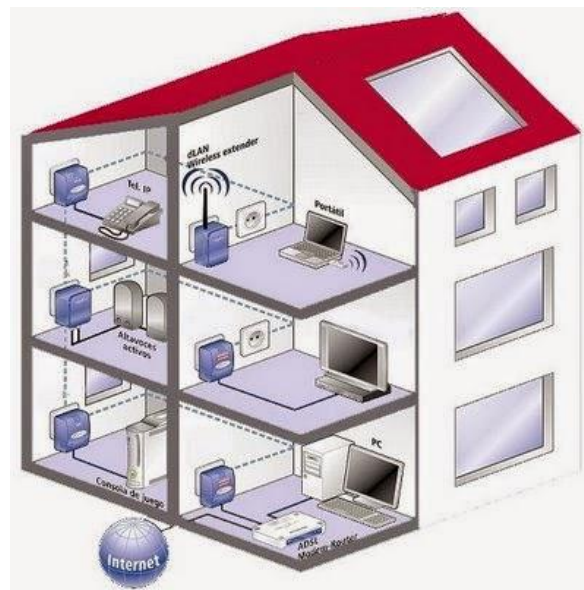


Figura 2.14. Sistema distribuido intraempresa.

Tomado de: Claudia Y. Meneses Ramirez, sistemas distribuidos y redes.

<http://claudiayetlanezimenesesramirez.blogspot.com/2014/08/sistema-distribuido-y-redes.html>

2.4.2 Sistema distribuido inter-empresa

En [4] se define a este tipo de sistema como un sistema productivo virtual, ya que está conformado por diferentes plantas de producción con diferentes capacidades, que en unión con las redes de comunicación y de logística permiten obtener grupos de trabajos integrados fuera de la empresa.

Una de las principales características de este tipo de sistema distribuido es la ubicación de sus componentes modulares, los cuales se encuentran dispersos geográficamente, (ver Figura 2.15). Uno de los principales retos de estos sistemas

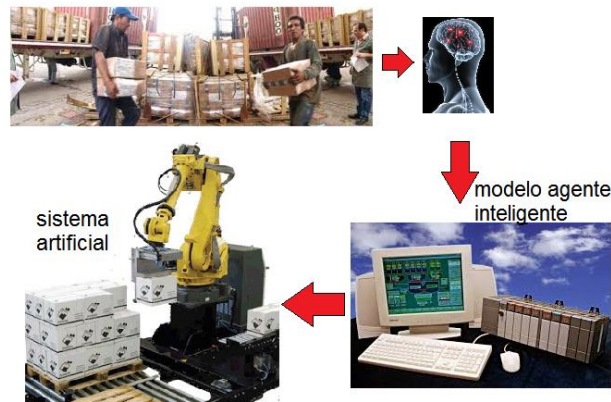


Figura 2.16. Agente inteligente y Sistema artificial.

En la Figura 2.17 se muestra un esquema de agente inteligente donde según [19], [42] un agente es un sistema computacional o entidad inteligente de acción autónoma, generalmente dotado de intencionalidad, posee metas y unos planes de acción asociados para alcanzar sus objetivos.

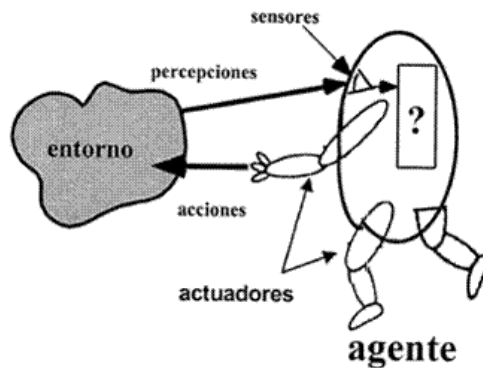


Figura 2.17 Esquema de un Agente Inteligente
Tomado de: J. Palma y R. Marín, *inteligencia artificial*, 2008.

Dichos agentes tienen una estructura interna donde se define su nivel de inteligencia, autonomía y flexibilidad (ver Figura 2.18); Estos agentes son capaces de tomar decisiones, percibir e interactuar con el entorno para realizar diferentes operaciones, reaccionar ante determinados eventos e incluso trabajar como sociedad agrupándose con otros agentes para alcanzar un objetivo [17], [20], [16].

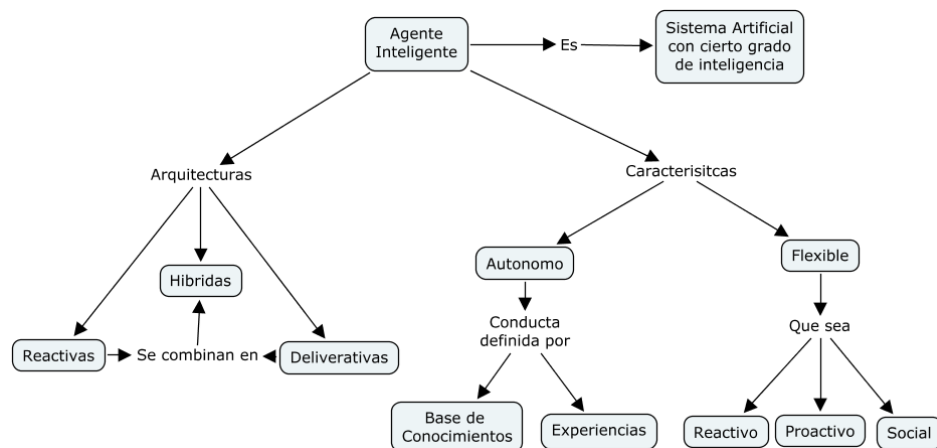


Figura 2.18. Características de un agente inteligente.

Un sistema será autónomo en la medida en que su conducta además de estar definida por una base de conocimientos integrados, va a estar definida por su propia experiencia. Un ejemplo de agente se menciona en [16] donde un termostato tiene un sensor el cual permite medir la temperatura de un cuarto, es decir el sensor está directamente conectado al entorno; el termostato responde de dos maneras, enciende el sistema cuando la temperatura esta fuera de lo especificado o lo apaga cuando la temperatura esta Ok; por lo tanto los cambios en el entorno dependen de las percepciones del sensor y de las decisiones que tome el agente termostato.

Un agente [18] pretende modelar el saber teórico (conocimiento) y el saber hacer (razonamiento y pericias) de un experto en un dominio de aplicación específico. De esta forma, conocimiento, mecanismos de razonamiento, habilidades, destrezas y experiencias deben ser representadas apropiadamente en el agente, para que este se comporte inteligentemente en ejecución, al resolver tareas de alta complejidad.

2.5.1 Arquitectura de agentes

Para construir agentes primero se debe establecer una arquitectura, es decir, definir y estructurar sus componentes y la relación entre ellos.

Según [43], la arquitectura de un agente es una metodología particular para construir agentes, donde se tiene un conjunto módulos y relaciones o interacciones entre módulos. El conjunto total de módulos y sus relaciones determinan cómo los datos percibidos por los sensores y el estado interno de agente influyen en las acciones del agente.

Inicialmente se definió a un agente como un ente que interactúa con un entorno, lo percibe y puede modificarlo o usarlo para lograr un objetivo (ver Figura 2.19).

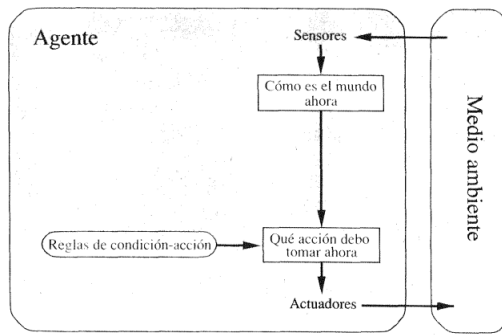


Figura 2.19 Arquitectura general de un agente.
Tomado de: Russell y Norvig, *inteligencia artificial, un enfoque moderno*, 2004.

La representación del ambiente externo que tiene un agente es parcial, está limitado por la cantidad de sensores que posea y que le dan información específica del entorno, por ejemplo, un sensor de proximidad o temperatura en un dispositivo que le permite identificar las propiedades que toman los sensores desde el entorno y tomar acciones de acuerdo a los parámetros de operación para los cuales fue diseñado.

Para tomar acciones en el entorno, el agente cuenta con dispositivos actuadores que le permiten llevar a cabo manipulaciones o modificaciones del entorno para cumplir un objetivo o ejecutar una tarea, ejemplo de estos actuadores pueden ser los motores, los cilindros hidráulicos, los equipos de refrigeración, etc.

Sin embargo, la arquitectura de un agente puede cambiar dependiendo del entorno, así, un agente toma decisiones al tener en cuenta la información percibida por los sensores. Así, según [42] la arquitectura del agente, especialmente el componente de control, es una arquitectura software de un sistema de toma de decisiones.

Para definir las estructuras de los modelos que serán los encargados de procesar todas las actividades internas y externas del agente, se han propuesto varias arquitecturas, que se pueden resumir en tres: deliberativas, reactivas e híbridas.

2.5.1.1 Arquitectura deliberativa

Este tipo de arquitectura se basa en una metodología de representación simbólica del conocimiento, donde se las decisiones son tomadas por medio de la lógica; en este tipo de arquitectura los agentes tienen un objetivo y a partir del estado del entorno desarrollan planes para lograr dichos objetivos.

La arquitectura deliberativa más extendida es la DBI (del inglés, *Belief, Desire, Intention*), que caracteriza a los agentes por poseer un estado mental interno, compuesto por un conjunto de creencias, deseos e intenciones que definen el plan

a seguir para alcanzar sus objetivos. Esta arquitectura se caracteriza por que el agente planea cómo alcanzar sus objetivos a partir de las percepciones que recibe del entorno y así sus planes pueden cambiar o modificarse según vaya cambiando el entorno que lo rodea.

Se define como creencia a los conocimientos que el agente tiene de su entorno; los deseos son los objetivos que pretende alcanzar, y las intenciones son los planes que estructura de acuerdo a lo que percibe, con el interés de cumplir sus deseos u objetivos [4]. Este tipo de arquitectura puede contar con un control del estado mental, este es el encargado de analizar la información percibida por los sensores y determinar cómo esta información afectará el estado mental del agente, es decir, analiza las señales e informa si el agente debe cambiar su estado interno (ver Figura 2.20), mientras que otro módulo del agente debe estar encargado de gestionar el estado mental del agente, crear, modificar o eliminar creencias u objetivos.

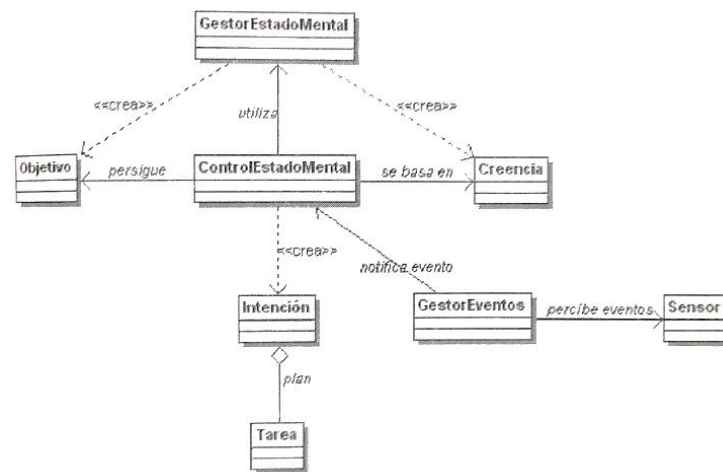


Figura 2.20 Arquitectura deliberativa – Agente BDI (tomada de [41])

2.5.1.2 Arquitectura de agentes reactivos

En esta arquitectura las acciones que toman los agentes son una respuesta directa, es decir, no se requiere un proceso deliberativo o un razonamiento simbólico complejo ante las entradas percibidas por los sensores, para dar una respuesta. Debido a esto, el comportamiento del agente se puede implementar como autómatas o como reglas de situación – acción (reglas conocidas como if – then) [41], en la Figura 2.21 se presenta un ejemplo de un modelo con este tipo de arquitectura donde el agente percibe su entorno mediante los sensores y responde de acuerdo a la señal recibida, en este ejemplo las acciones tienen un grado de jerarquía que depende del tipo del sensor que se active primero, de ahí el uso de inhibidores.

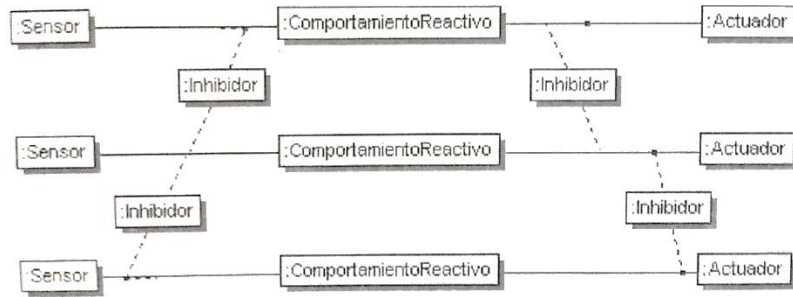


Figura 2.21 Arquitectura agente reactivo (tomada de [41]).

Esta arquitectura reactiva es frecuentemente utilizada cuando los problemas están bien definidos pero de múltiple elección de respuesta. Es decir, cuando las acciones a tomar, debido a estados del entorno, son simultáneas, es decir, se presentan múltiples respuestas. Para resolver dichos problemas, este tipo de arquitectura utiliza módulos con diferentes niveles de abstracción que permiten crear jerarquías y definir prioridades desde niveles inferiores [4].

2.5.1.3 Agentes híbridos

Este tipo de arquitectura combina aspectos de las arquitecturas deliberativas y reactivas donde se pretende diseñar al agente con dos subsistemas en los cuales uno sea simbólico o deliberativo, encargado de las tareas complejas, y otro módulo se encargue de reaccionar (sistema reactivo) ante las señales del entorno, donde las respuestas no requieran un mecanismo de raciocinio complejo [41].

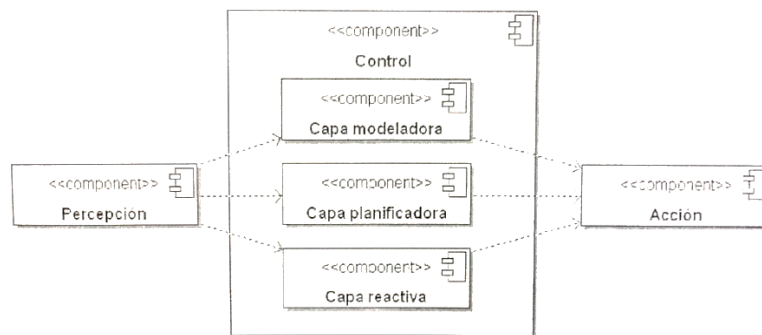


Figura 2.22 Arquitectura híbrida (tomada de [41]).

En el campo de modelado de sistema con agentes existen diferentes puntos de vista para tratar el nivel de complejidad, pero en la mayoría se tiene un consenso general donde se define que todo agente debe al menos cumplir con:

- Un agente debe ofrecer una visión micro de un sistema o entorno que lo rodea de forma individual.
- La organización entre agentes describe una visión macro del sistema, denominado Sistema Multi - Agente (SMA).
- Todo agente posee un entorno donde se sitúa y con el cual interactúa para generar acciones en pro de sus objetivos.
- La interacción hace parte del agente, ya sea entre agentes o con usuarios (humanos).
- Cuando se trata de sistemas distribuidos la coordinación de las tareas llevadas a cabo por los agentes es vital.

2.6 SISTEMAS MULTI-AGENTES

Una sociedad de agentes se denomina Sistema Multi-Agente, donde un comportamiento global se observa a nivel macro [41] «La organización de un Sistema Multi Agente (SMA) es importante para definir el propósito general del sistema, su estructura, el contexto en el que los agentes desempeñan sus funciones específicas, las políticas de participación y las interacciones que permiten la colaboración entre los agentes». Actualmente, se utilizan en numerosos dominios de aplicación e investigación, y pueden ser una forma muy interesante y conveniente para la comprensión, el modelado, el diseño y la implementación de diferentes tipos de sistemas distribuidos. De esta forma, los agentes representan una alternativa interesante de modelado, en comparación con el modelado basado en ecuaciones diferenciales, para la representación y simulación de sistemas del mundo real o virtual que pueden ser descompuestos en unidades menores que interactúan [29].

Puesto que varios procesos no pueden ser representados mediante modelos matemáticos, un abordaje multi-agentes es utilizado para este tipo de situaciones. La diferencia entre los modelos basados en ecuaciones y los modelos basados en agentes es que las ecuaciones definen el comportamiento global *a priori* mientras en los agentes el comportamiento está dado por la interacción y la dinámica de cada módulo que compone el sistema, y también tiene en cuenta la interacción con el entorno (ver Figura 2.23). Así, el comportamiento general del sistema queda definido por las interacciones y decisiones llevadas a cabo desde un nivel micro.

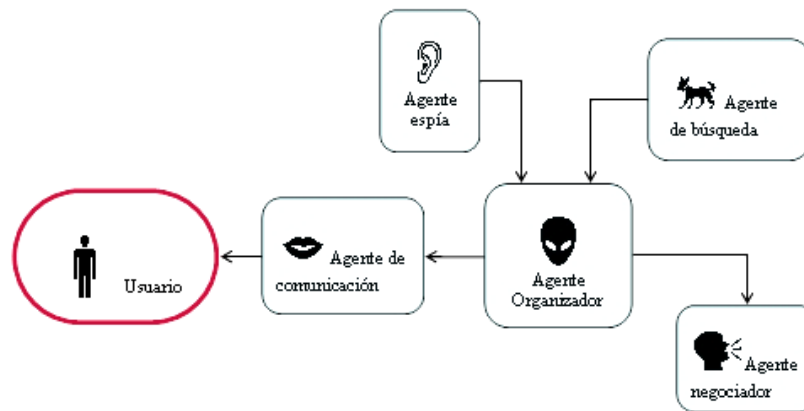


Figura 2.23. Sociedad de Agentes o SMA
 Tomado de: Serrano Cinca C. (2013): «La Contabilidad en la Era del Conocimiento»
<http://ciberconta.unizar.es/leccion/INTRODUC/inicio.html>

En los conceptos principales del modelado de multi-agentes podemos encontrar las siguientes propiedades que los caracterizan, [19], [41], [29]:

- **Autonomía**, es su capacidad para llevar a cabo una acción por iniciativa propia (pro-actividad), mediante el control de su comportamiento interno y sus actividades para cumplir sus objetivos de diseño. Como puede observarse, el agente puede trabajar sin la intervención directa del usuario u otros agentes.
- **Sociabilidad**, es la capacidad de actuar con otros agentes desde un punto de vista social, lo anterior con miras a alcanzar sus objetivos por medio de la colaboración de otros agentes en quienes delega o con quienes comparte la realización de tareas, para ello necesita coordinarse, negociar e interactuar con otros agentes; las interacciones y los estados internos (si los hay) del agente definen los tipos de roles que tendrá cada cual dentro de la sociedad.
- **La interacción**, es lo que conecta los dos conceptos anteriores. Este entrelazado de las acciones, donde cada acción se decide en la mente de un agente, produce patrones organizados de actividades (formas sociales emergentes) que, a cambio, fuerza y restringe la conducta de los agentes. Así, surgen las siguientes formas de interacción: cooperación, conflicto, competencia, etc.
- **La contextualización**, es decir, el hecho de que los agentes están en un entorno que define las condiciones en las que estos existen, actúan e interactúan. El medio ambiente es el pegamento que conecta los agentes

entre sí, permite la interacción entre ellos, de manera que sean capaces de alcanzar sus objetivos.

- **Reactividad**, es la forma en que los agentes pueden responder ante los cambios en el entorno que perciben, de tal forma que pueden modificarlo para lograr sus metas.
- **Iniciativa**, debido a que los agentes buscan cumplir con sus objetivos o metas, estos pueden realizar acciones independientes del entorno que los rodea, es decir, ejecutar acciones no solo como respuesta al entorno.
- **Razonamiento**, un agente puede decidir qué objetivo alcanzar, cómo lograrlo y el medio para lograrlo, puede priorizar sus objetivos y abandonar uno para dedicarse a otro.
- **Aprendizaje**, el agente puede adaptarse progresivamente a cambios en entornos dinámicos, mediante técnicas de aprendizaje.
- **Movilidad**, cuando un agente puede migrar de un nodo a otro en una red, y preserva su estado entre los saltos entre nodos.
- **Capacidad de comunicación**, un agente debe ser capaz de comunicarse con otros agentes con el fin de buscar ayuda para cumplir con sus objetivos o colaborar a otros a alcanzar sus objetivos, un agente debe estar en capacidad de establecer comunicación a través de un lenguaje de comunicación de agentes.
- **Benevolencia**, es el comportamiento determinado por la ayuda en la búsqueda de los objetivos de otros agentes, sin que esto afecte o entre en conflicto con sus propios objetivos.

En este contexto, para interactuar exitosamente los agentes requieren la habilidad de cooperar, coordinarse y negociar unos con otros, tal como lo hacen los seres humanos (ver Figura 2.24). Cabe resaltar que dependiendo del tipo de aplicación que se pretenda modelar, las cualidades o características de estos pueden aumentar o disminuir.



Figura 2.24. Propiedades de SMA,
Adaptado de: agentes inteligentes, definición y tipología.
<http://es.slideshare.net/hdzmanzo/agentes-inteligentes-15323648>

3 ESTADO DEL ARTE

Desde hace algunos años el modelado de SP se ha incentivado como un medio para asegurar de forma eficiente y eficaz el comportamiento del SP a cambios del ambiente productivo o ajustes de su estructura, entre otros motivos. En este contexto, las herramientas computacionales han adquirido un rol importante al permitir evaluar sistemas de gran tamaño y complejidad en un corto tiempo, estas herramientas permiten el desarrollo de modelos desde diferentes enfoques y estrategias.

Varios autores han enfocado su interés en el modelado de SP, en consecuencia, podemos encontrar diversos estudios relacionados con el modelado de sistemas donde la automatización del conocimiento de los expertos juega un rol importante [14], [17], [20], [23], [26]. Un abordaje ha sido utilizando herramientas del campo de la Inteligencia Artificial (IA), a continuación se listaran algunos trabajos que aportan información importante en el proceso de modelado relacionado con las RP e inteligencia artificial.

En [45], se propone el desarrollo de un modelo del sistema de control mediante el uso de redes neuronales para el proceso de coagulación, floculación y sedimentación en una planta de potabilización de agua, este caso es de interés en el presente proyecto, ya que el ejemplo de estudio será aplicado en una planta de tratamiento de agua potable.

En [24], es presentado un modelo del proceso de tratamiento de agua residual que utiliza la herramienta formal llamada RP con el objetivo de hacer un diagnóstico del proceso. El uso de esta herramienta formal en el modelado del sistema, permite mejorar la comprensión del sistema, identificar sus principales características, beneficiar el planteamiento de estrategias de mejora, entre otros aspectos. Además, la herramienta posee una representación gráfica que beneficia la comprensión del modelo de forma intuitiva; hecho que facilita un abordaje interdisciplinario en la etapa de evaluación y de diseño del sistema [11], [10].

En [30], se tiene un procedimiento que permite desarrollar el modelo de SP distribuidos orientado a servicios, allí se utiliza una metodología para el desarrollo de este tipo de modelos mediante el uso de RP clásicas, el problema de utilizar este tipo de herramienta es que el modelo puede verse expuesto a una explosión de estados, lo que reduciría la ventaja descriptiva gráfica que posee esta herramienta, por eso en el presente proyecto se utilizarán las CPN.

En [46], [47] se desarrolla un modelo en RP para el análisis y el diagnóstico de fallas en un sistema de envasado de líquidos, en [27], se modela el sistema de entrada

de rollos metálicos para que estos se unan continuamente mediante soldadura y luego pasen a una etapa de decapado, el objetivo de dicho proyecto es obtener un sistema de flujo de material para que sea continuo.

Dado que el enfoque del proyecto está relacionado con sistemas inteligentes, donde se pretende desarrollar modelos con un enfoque en agentes inteligentes capaces de modelar eventos o acciones de expertos o sistemas asociados a condiciones biológicas o naturales, se presentan algunos trabajos donde se han desarrollado modelos basados en este tipo de sistemas, algunos combinan el enfoque de agentes con la herramienta CPN como sigue:

En [17], se desarrolla una metodología analítica para modelar y analizar sistemas multi-agentes donde se considera al sistema como dinámico a eventos discretos, por tal razón, se utiliza la herramienta RP para asegurar las propiedades del Sistema Multi- Agente.

En [23], encontramos el desarrollo conceptual y la posible implementación de un sensor de plataforma móvil que coopera con la tarea de inspección del estado del motor de un *jet* en pleno vuelo, lo anterior desde un enfoque multi-agente, dicho proyecto se está trabajando con el centro de investigación Glenn, de la NASA, y con colaboración universitaria del Instituto de Tecnología de California para permitir la realización de este tipo de sistema. También [20] desarrolla un trabajo con CPN desde un enfoque multiagente para el desarrollo de un sistema de asignación de tareas de forma dinámica, en este estudio se evalúa la creación de un modelo donde la asignación de labores entre un número determinado de agentes sea dinámico y no determinístico, la decisión de quien realiza la tarea se da por medio de una evaluación que incluye las virtudes del agente así como su intención de querer realizar dicha labor, trabajos similares para simular sistemas multi-agentes que utilizan CPN se pueden encontrar en [48], [25], [26] y [21]. Una característica general de estas propuestas es la imprecisión en el proceso de modelado o la limitada información al respecto.

4 MEDOLOGÍA PARA MODELADO

Para el desarrollo de modelos de SP basados en CPN se integran las propuestas presentadas en [27] y [41], para el modelado de SP y el desarrollo de sistemas inteligentes, respectivamente. Así, basados en la ingeniería de conocimiento, se establecen un conjunto de guías, métodos y técnicas para desarrollar de manera formal sistemas capaces de resolver problemas (ver Figura 4.1).

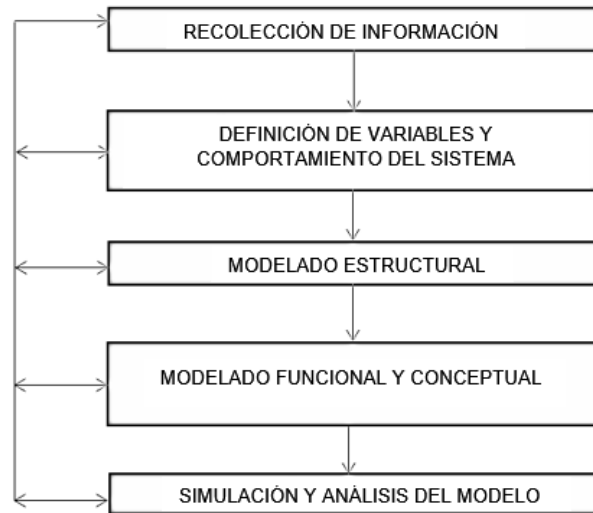


Figura 4.1 Metodología de modelado de SP.

Así, esta estrategia permite construir el modelo de forma sistemática y ordenada para evitar pérdida de información relevante que pueda afectar la correcta especificación del modelo, este tipo de técnica permite desarrollar un modelo donde los refinamientos progresivos hacen parte del trabajo y permiten alcanzar el nivel de detalle deseado, con lo que cumplen con todas las especificaciones del sistema a modelar.

4.1 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Inicialmente se debe recopilar información del sistema a modelar, con el fin de conocer su funcionamiento e identificar las partes que componen dicho sistema. Es importante establecer el tipo de sistema, los dispositivos físicos que hacen parte del proceso (sensores, actuadores, equipos especializados, químicos, personal experto, etc.), recolección de datos sobre las variables importantes involucradas en el proceso, el entorno y los materiales o bienes a producir.

Es importante, en la medida de lo posible, realizar visitas de campo para seleccionar o identificar totalmente el sistema a modelar, en esta etapa se puede conocer de forma general los parámetros funcionales del sistema.

Algunas de las preguntas que se recomienda plantear en esta etapa son las siguientes:

- ¿Qué tipo productos son generados por la empresa?
- ¿Cuáles son los equipos que se utilizan en la producción?
- ¿Cuál es la distribución geográfica de los equipos y cuáles son los recursos que componen el sistema productivo?
- ¿Cómo están conformados los diferentes productos ofrecidos por el sistema (partes que lo componen)?
- ¿Cuál es el flujo de trabajo realizado para obtener un producto terminado?
- ¿Qué variables forman parte del proceso productivo?

En esta etapa se recomienda hacer uso de dispositivos electrónicos que permitan grabar video y audio, con el fin de obtener registros donde se explique el proceso productivo de la planta; esto con el fin de tomar con detalle toda la información que este personal pueda dar y evitar así la pérdida de información que puede ser necesaria en etapas posteriores para el planteamiento o la depuración del modelo.

Se debe obtener toda la documentación disponible en manuales, catálogos, referencias en libros e internet, documentos relacionados con el tipo de proceso del sistema, personal especializado, etc. La Figura 4.2 presenta un mapa conceptual de los medios de búsqueda y recolección de información.

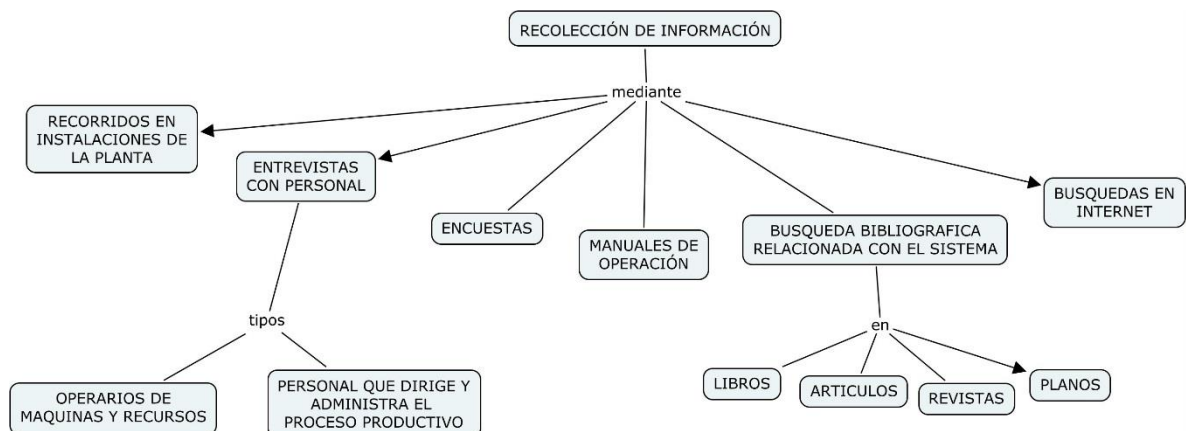


Figura 4.2. Medios de búsqueda y recolección de información.

4.2 DEFINICIÓN DE VARIABLES Y COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA

Se procede a analizar toda la información recolectada y se establecen las variables características del sistema; las variables a manejar dependen del tipo de estudio que se realizará al sistema, ya que para un mismo sistema podemos tomar como variables el flujo de información entre las diferentes etapas que componen el sistema o se pueden tomar como variables el flujo de recursos materiales que son modificados o procesados para obtener un producto.

En la definición del comportamiento del sistema a modelar se debe plantear inicialmente las simplificaciones y el tipo de abordaje a realizar en el sistema de manera que se limite el alcance del modelo dentro del estudio a realizar, ya que modelar toda la realidad y todos los cambios que esta realidad posee es un trabajo muy complejo y en ocasiones innecesario; en resumen se establece que tipo de información debe entregar el modelo y hasta que nivel de detalle debe ser modelado.

Luego, se definen las etapas que componen el sistema distribuido, además, se da una descripción preliminar de los modos de operación y la relación entre los diferentes módulos que componen el sistema.

De forma general, en esta etapa se debe atender las siguientes inquietudes:

- Cuál es el flujo de actividades necesario para atender las especificaciones del proceso [27].
- Cuáles dispositivos son utilizados en la ejecución de cada paso del proceso.
- Información, señales y datos relacionados durante las actividades.
- Relación que existe entre cada dispositivo para la ejecución de tareas.
- Relación entre las variables involucradas en el proceso que permiten la evolución de estados o la toma de decisiones para llevar a cabo un proceso.
- Tiempos de ejecución, variables involucradas en el inicio y final de un proceso, etc.

En esta etapa se recomienda el uso de mapas conceptuales o de flujo de trabajo los cuales pueden ser contruidos de tal forma que se tenga un mapa esquemático del sistema general y otros mapas que describan las diferentes etapas que componen el sistema productivo.

4.3 MODELAMIENTO ESTRUCTURAL

Se procede a elaborar un modelo estructural del sistema, donde se identifican los módulos que componen el sistema, componentes como máquinas, dispositivos de control, etc. Los anteriores son ubicados en su posición correspondiente, en este caso se utilizan gráficos y planos del sistema para representar las etapas o los componentes del proceso (ver Figura 4.3). En esta figura se representa la distribución en planta de los módulos que componen un sistema productivo.

Se identifican las posiciones de todos los dispositivos de ejecución y de control, por cada zona que compone el sistema. En esta etapa se analiza algunas de las variables de control que se tendrán en cuenta para la ejecución de cada etapa del sistema, estas sirven para definir algunos de los colores que se necesitarán en el modelo.

Se identifican dispositivos de control, sensores, dispositivos actuadores, dispositivos de monitoreo, etc.

Para desarrollar modelos desde un enfoque de agentes, en esta etapa se determinan todas las acciones inteligentes que se pretenden modelar bajo el enfoque de agentes, por ejemplo, acciones donde los criterios o la toma de decisiones son llevadas a cabo por el personal de la empresa. Las acciones tomadas por este personal, ante determinados eventos o variables, es definida en la primer etapa; estas acciones o decisiones se plantearán en el modelo mediante módulos denominados agentes, que ejecutarán acciones que modificaran los estados del sistema.

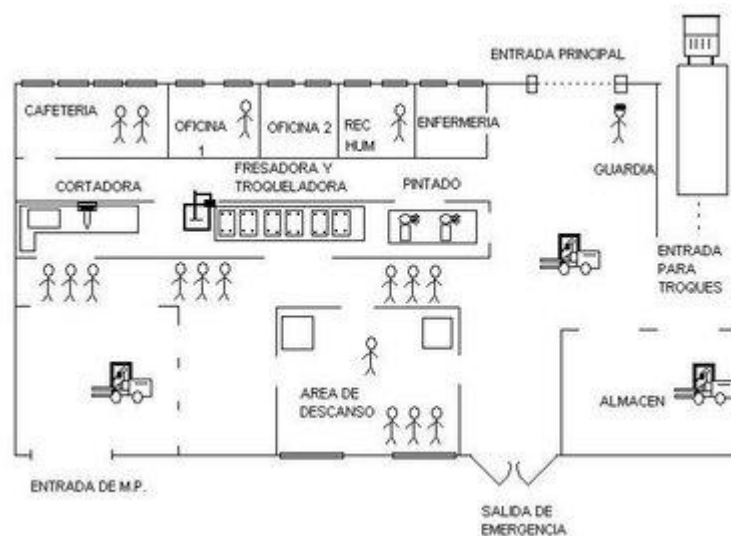


Figura 4.3. Esquema estructural de un proceso productivo.

Al definir comportamiento, módulos y agentes que componen el sistema, en la mayoría de los casos será necesario volver a revisar la información obtenida o buscar nueva información que aclare dudas que normalmente se generan durante el proceso de generación del modelo.

4.4 MODELAMIENTO CONCEPTUAL Y FUNCIONAL

Esta etapa describe la relación de los dispositivos, las señales y las partes que componen el sistema de forma conceptual (intercepción entre módulos), además se establece las funciones entre los componentes que definen el comportamiento y el valor de las variables durante el flujo del proceso. Para el desarrollo de este modelo se debe analizar toda la información adquirida anteriormente con el fin de realizar un modelo organizado que permita una descripción y un entendimiento de los componentes. También se analiza información relevante acerca de variables y funciones que definen cada proceso involucrado en el sistema.

Al iniciar esta etapa se debe establecer un nivel de abstracción macro del modelo (tomar un esquema general) y se definen las posibles relaciones entre los componente del sistema, esto se hace mediante el modelo estructural desarrollado en el paso anterior, en esta etapa se procede a ubicar en el programa de modelado CpnTools los módulos del sistema que son representados por transiciones de sustitución (rectángulos con doble línea de contorno) y se interconectan dichos módulos según esquema estructural e información recolectada.

Durante esta etapa se definen las características de las marcas que definirán el flujo de recursos o de información a través de la red del modelo. La información de las marcas están ligadas a las variables que hacen parte del sistema real, es decir, si la información de una variable es un valor numérico que cambia o evoluciona de un estado a otro se puede pensar en utilizar una marca tipo «INT» o «REAL»; estos conjuntos de marcas pueden aumentar a medida que se refina el modelo, ya que en ocasiones se requiere mayor información para definir los recursos que se mueven en la red, algunos de estos conjuntos se forman a partir de la combinación de colores tipo «STRING» con «INT» o «REAL» u otras combinaciones (para mayor información ver [7], [14]).

Se deben tomar módulos o etapas del sistema (transiciones de sustitución) y proceder con el refinamiento de cada una para describir el proceso interno de dicho módulo, esta operación se realiza hasta niveles que representen la ejecución, el control y el desarrollo del sistema en dichas zonas; el nivel de detalle o refinamiento realizado está ligado a la experticia del modelador y el nivel de abstracción requerido o deseado para el modelo.

Luego de tener las relaciones entre componentes y módulos interconectados mediante los arcos se procede desarrollar las funciones que definen el el valor y comportamiento de las variables del sistema, en CpnTools estas funciones deben ser ubicadas a la salida de las transiciones (luego de que el sistema ejecuta una acción que modifica su estado), con esto finalmente se obtiene un modelo funcional que contiene una descripción dinámica del sistema, este modelo es analizado por etapas o en el orden del proceso para verificar si satisface las especificaciones del sistema real.

4.5 ANÁLISIS DEL MODELO

En esta etapa se realiza el análisis del modelo mediante simulación para observar su comportamiento en diferentes entornos y validar su funcionamiento con el sistema real.

Se depura el modelo por medio de simplificación de procesos (reducir lugares y transiciones) que no afecten el modelo; por medio de simulación se realizan análisis de los diferentes escenarios que podrían presentarse en el sistema real y se procede a las correcciones pertinentes después de cada escenario corrido.

El análisis y la depuración inicia en el esquema general donde se puede observar el comportamiento general del sistema, aquí se valida el comportamiento del sistema a un nivel macro y se compara con el real.

Luego se realizan corridas del modelo para verificar y validar cada uno de los módulos que lo componen.

Se debe verificar que el modelo cumpla con reglas de comportamiento para que sea una representación válida, algunas reglas requieren que la red tenga:

- Alcanzabilidad.
- Vivacidad.
- Repetitividad.
- Limitada, etc.

En [12] encontramos mayor información acerca de estas reglas.

5 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Este capítulo presenta dos ejemplos de aplicación de los planteamientos propuestos. El primero concibe un modelo de un sistema de producción de vehículos de transporte de caña azúcar de una empresa ubicada en la ciudad de Palmira – Valle del Cauca. Un segundo ejemplo representa un proceso de producción de agua potable de la planta Puerto Mallarino, la cual se encuentra ubicada en la ciudad de Cali- Valle del Cauca.

5.1 MODELO SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE DE CAÑA

Actualmente, el sector productivo cuya materia prima es basada en la caña de azúcar es el eje central de la economía en el Valle del Cauca, Colombia. Según [49] «En Colombia, en el año 2013 se produjeron 2,12 millones de toneladas de azúcar a partir de 21,56 millones de toneladas de caña. De alcohol carburante se produjeron 387 millones de litros, destinados a la mezcla con gasolina en una proporción E8 (8% etanol, 92% gasolina)». Por lo anterior, este sector tiene un importante impacto en la economía nacional.

Un sistema involucrado directamente con este sector es el de los transportes de caña, ya que estos son los encargados de mover la materia prima desde los lugares de cosecha hasta la planta.

En la ciudad de Palmira - Valle del Cauca se encuentra una empresa productora de este tipo de vehículos, el objetivo del presente ejemplo es representar el proceso productivo de vehículos transportadores de caña de azúcar.

5.1.1 Recolección de información del sistema

Inicialmente, se realizan visitas a la planta con el fin de reconocer sus instalaciones, identificar los diferentes productos que se desarrollan al interior de la planta, observar su distribución, identificar equipos y personal vinculados al proceso.

En las Figura 5.1 y Figura 5.2 se pueden apreciar algunos de los productos que la empresa produce.



Figura 5.1. Semi remolque ZAF HD 32
Tomado de: Zafras, <http://www.zafras.com/sitio/>



Figura 5.2. Autovolteo ZAF 10.
Tomado de: Zafras, <http://www.zafras.com/sitio/>

También se obtuvo un esquema de la distribución de las áreas en la empresa (ver Figura 5.3). Este esquema se pudo realizar gracias a recorridos en planta e información dada por personal de la empresa.

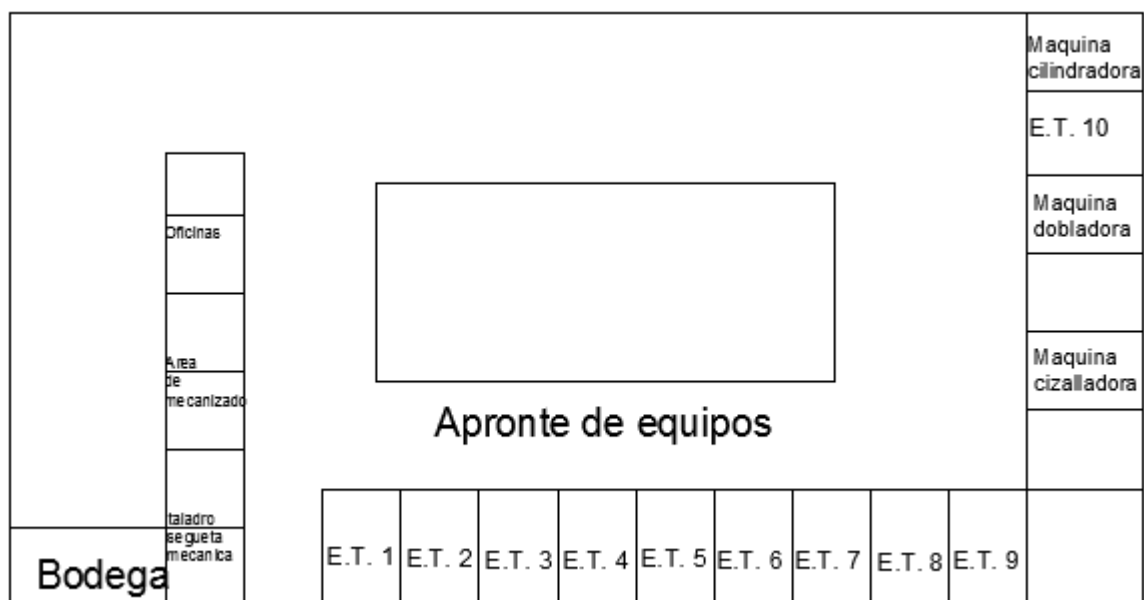


Figura 5.3. Distribución de etapas de la empresa.
Tomado a partir de visitas a la planta

Se tomaron datos de las diferentes áreas que componen el proceso (ver Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Áreas del proceso productivo.

AREA
Administrativa
Mecanizado
Bodega
Cortadora
Dobladora
Cilindradora
Espacios de trabajo (E.T.)

Para el proceso de adquisición de información se realizaron visitas que fueron guiadas por personal experto en el tema de construcción de estas estructuras; durante las visitas se realizaron registros fílmicos y de audio. También se obtuvo planos de productos y diagramas de producción.

5.1.2 Definición de variables y comportamiento del sistema

Desde un enfoque general el proceso de producción, sin importar la referencia, está compuesto por:

- Corte y dobles.
- Armado de chasis.
- Armado de canasta.
- Armado de estructura de volteo.

El proceso productivo inicia con la solicitud de la construcción de un producto donde se genera una orden de producción por parte del área administrativa, esa orden se remite a las diferentes áreas donde se encuentran los trabajadores encargados de la construcción.

Al recibir la orden de producción, cada área, que ya posee conocimiento de las tareas que debe ejecutar, inicia su labor. El proceso general se describe en la Figura 5.4.

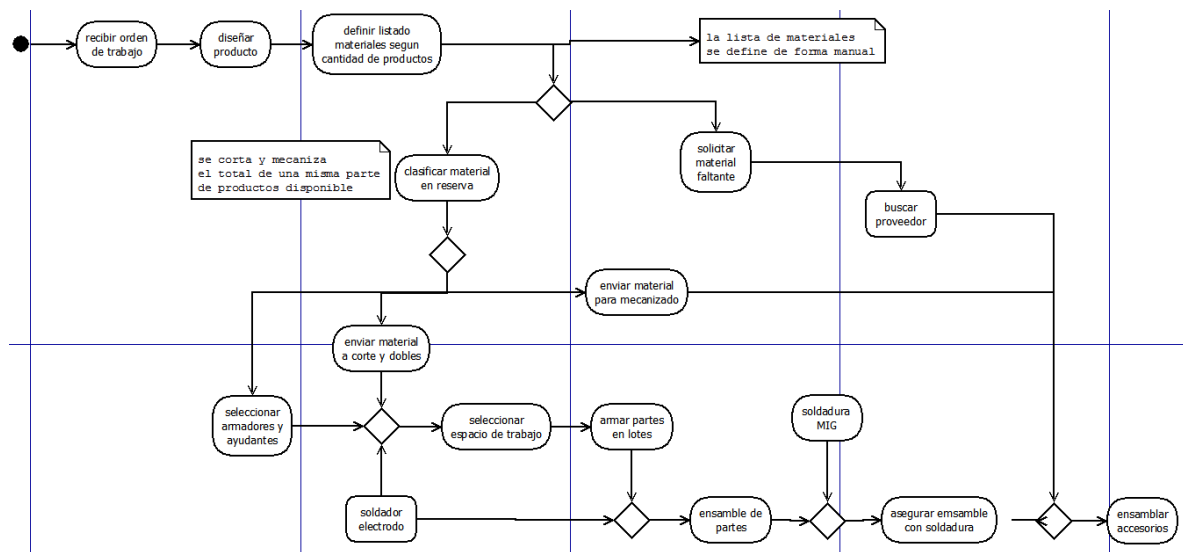


Figura 5.4. Diagrama general del proceso de producción.

Las etapas de corte, doblado y mecanizado inician con el proceso productivo, en estas etapas es donde se generan las piezas que posteriormente se unirán; cuando se ha llevado a cabo el corte y los dobles de las partes que constituyen el producto, se da inicio al proceso de armado.

En el proceso de armado se destacan dos subprocesos ejecutados por los trabajadores, uno donde se realiza un pre-armado de los componentes y otro donde se dividen en grupos de trabajo para realizar el armado final o el ensamble total.

Durante el pre-armado, los operarios se encargan de construir los laterales y las vigas principales del transporte, al igual que los soportes de la estructura de volteo. Cuando se trata de una determinada cantidad de la misma referencia, los laterales se construyen en una sola **estación de trabajo** (de ahora en adelante E. T.), mientras que las vigas principales toman un espacio independiente en otra E. T.

En esta etapa, todos los trabajadores interactúan para armar laterales, vigas y soportes; cuando estas partes se encuentran terminadas, inicia el proceso de armado donde se dividen en equipos de trabajo para que cada equipo tome un producto y se dedique al armado total del producto.

Al inicio de esta nueva etapa se construye el chasis del vehículo, este está compuesto por las vigas principales; cada chasis tiene un E. T. asignado, cuando el chasis está completamente armado, se inicia la siguiente etapa.

En esta nueva etapa se procede a transportar los laterales derecho e izquierdo que componen la canasta de transporte de caña, estos son movidos por medio de un montacargas desde el lugar donde fueron armados hasta el E.T. donde se encuentra el respectivo chasis.

El chasis es movido temporalmente fuera del E.T. para ubicar y armar sobre este la estructura de la canasta, al inicio se ubican los dos laterales sobre el chasis, se procede luego a ubicar y fijar los travesaños de la canasta, con esto se tendrá completamente armada la estructura de la canasta (ver Figura 5.5), al terminar la estructura de la canasta se procede a mover todo el conjunto en el E.T.



*Figura 5.5. Estructura de canasta armada.
Tomada de la empresa de producción del equipo de transporte*

En la siguiente etapa se construye la estructura encargada de unir la canasta al chasis, esta es denominada estructura de volteo. El objetivo de esta estructura es servir de pivote para que la canasta gire al momento del vaciado de la caña de azúcar (ver Figura 5.6), ya sea para el transporte de cosecha que son automáticos (autovolteo) o para las canastas que transportan la caña hasta el ingenio.

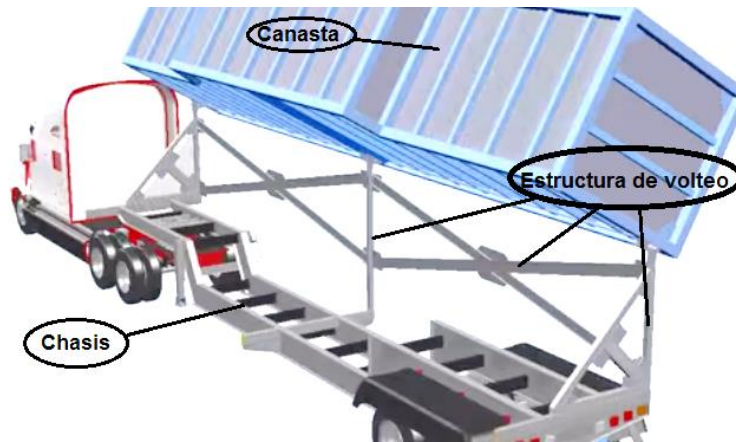


Figura 5.6. Componentes generales de estructura de un transporte de caña.
Tomado de: Canal de Colomcarga2, remolque cañero presentación.
<https://www.youtube.com/watch?v=i4FApFYaCG8>

Después de ensamblar la estructura de soporte del giro de la canasta, se procede a ubicar los forros de la canasta que son láminas dobladas que se sueldan a la estructura de la canasta (ver Figura 5.7).



Figura 5.7. Forros de canasta de tren cañero
Tomada de la empresa de producción del equipo de transporte

Con los forros ya ubicados, se procede a pintar y montar rines, ruedas, luces y demás accesorios para tener al final el producto terminado.

El proceso productivo se puede resumir de forma general en las siguientes etapas:

Se modelara el proceso desde el enfoque de las etapas de armado del producto, para esto se tiene como variables:

- Orden de trabajo o producción
- Referencia del producto.
- Cantidad de productos a producir según orden de trabajo.
- Espacio de trabajo E.T. asignado para cada producto.

Con estas variables y la información recolectada del proceso se procede a iniciar la siguiente etapa del modelo.

Como simplificación para realizar el modelo de los lugares denominados estación de trabajos E.T., serán tomados como recursos es decir se modelaran como marcas que se consumen al momento de utilizar el recurso.

5.1.3 Modelo estructural

Al tener las variables a manejar dentro del sistema y después de localizar la posición de las etapas del proceso de producción, se desarrolla un levantamiento estructural del modelo.

En el proceso de armado de los laterales y el chasis se debe asignar los E.T. que se utilizarán, normalmente estos espacios son asignados por el supervisor de la planta o por los armadores; para este caso se utilizará un agente inteligente que simulará dicha actividad, este agente tendrá la tarea de asignar los E.T. para armar un producto, debe tener en cuenta que la distancia entre chasis y laterales sea menor, con el fin de garantizar una producción con movimientos cortos de los componentes del producto.

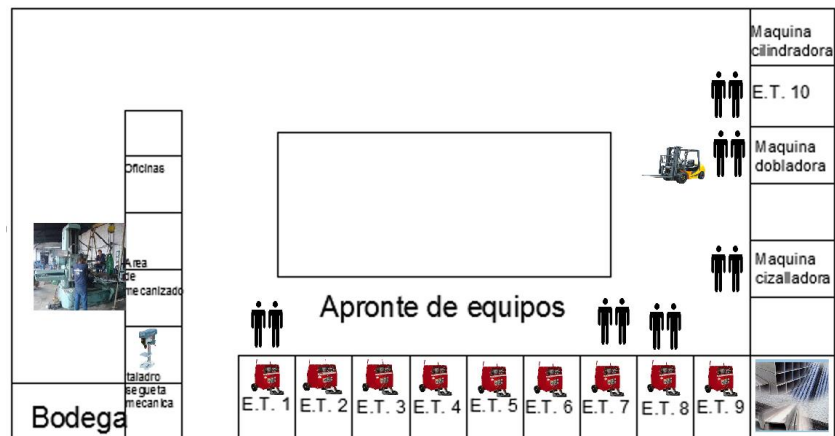


Figura 5.8. Modelo estructural de proceso productivo

5.1.4 Modelado conceptual y funcional

En esta etapa se definen todas las relaciones funcionales de cada proceso, donde se describe como es el flujo de variables y las operaciones llevadas a cabo en cada etapa y componente del sistema, En la Figura 5.9 se presenta un ejemplo de diagrama de actividades de la planta.

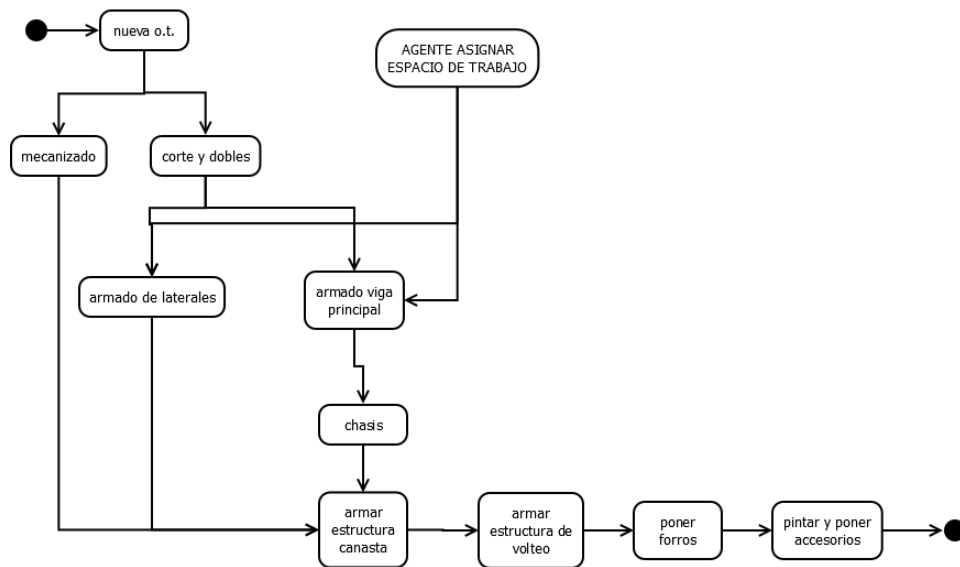


Figura 5.9. Actividades por etapas del sistema.

Algunas relaciones funcionales se basan en la orden de trabajo (O. T.), ya que al generar una orden se inicia el proceso y esta O.T. estará ligada al proceso hasta el final cuando el producto es terminado.

El proceso de producción, en general, es similar para la mayoría de las referencias, es decir, su estructura o flujo de operación es el mismo; por lo tanto, se define un solo modelo general para el flujo del proceso (ver Figura 5.10).

Con este modelo general del proceso, se hace necesario una variable que define las E.T. que ocupan las O. T. Por lo tanto, en un determinado instante podemos ver en el modelo un estado donde se esté trabajando con dos referencias distintas, pero estas operaciones son llevadas a cabo en ubicaciones diferentes, por lo tanto la variable «l» (lugar) será quien establezca la E.T. donde se encuentra dicho proceso (ver Figura 5.11).

En resumen, en el modelo no se manejan las E.T. como lugares o transiciones sino como variables incluidas en las marcas.

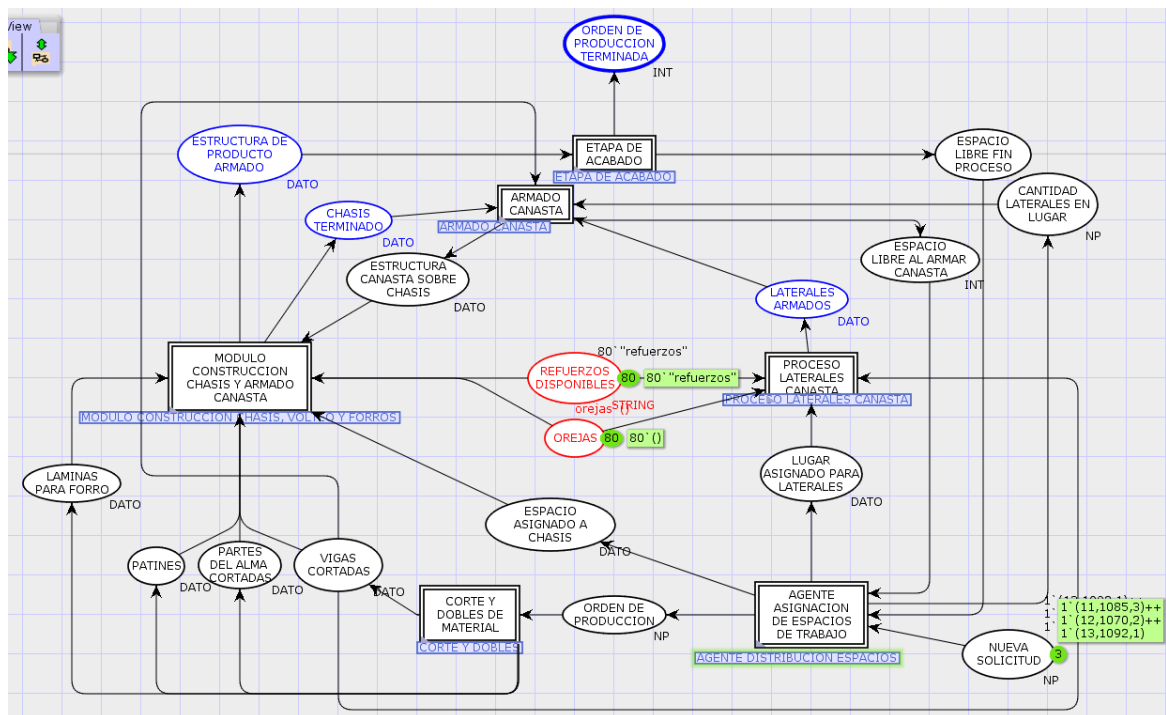


Figura 5.10. Modelo general de producción.

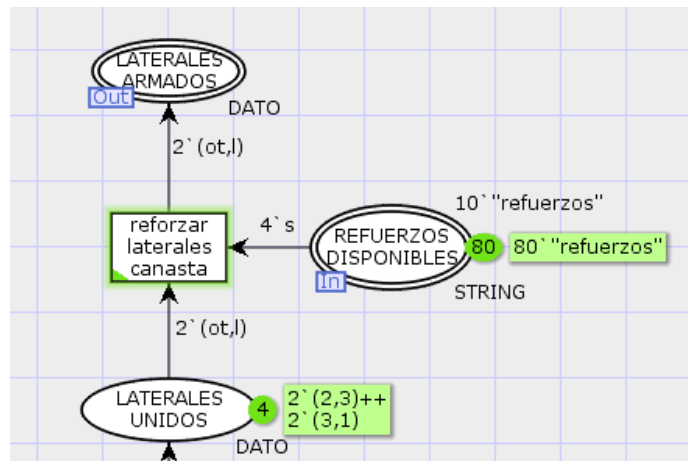


Figura 5.11. Ejemplo de estado similar para dos productos donde el proceso es llevado en diferente E.T.

En la Figura 5.11 se aprecia como en el estado «LATERALES UNIDOS» tenemos 2 marcas con los valores (2,3) y 2 marcas con valores (3,1). Lo que representan estas marcas se especifica en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Descripción de marcas en un lugar o estado.

MARCA	Primer valor	Segundo valor	Tercer valor
2` (2,3)	2` representa cantidad de recursos en ese estado, en este caso dos laterales unidos	(2, Representa la O. T. a la cual pertenecen esos laterales.	,3) representa el lugar o la E.T. donde están ubicados esos laterales, es decir, En la E.T. 3.
2` (3,1)	2` representa cantidad de recursos en ese estado, en este caso dos laterales unidos	(3, Representa la O. T. a la cual pertenecen esos laterales.	,1) representa el lugar o la E.T. donde están ubicados esos laterales, es decir, En la E.T. 3.

Por efectos de espacio, se procederá a presentar el proceso ejecutado por el agente encargado de asignar las estaciones de trabajo (E.T.) disponibles para la ejecución de los trabajos. Este agente posee un estado interno donde se encuentran registradas las E.T. que posee el sistema, ante la llegada de una O. T. este agente se activa y procede a asignar los respectivos espacios para el armado de laterales y chasis.

Este agente está en capacidad de discriminar cuántos productos se solicitan de una misma referencia y de asignar los espacios disponibles para cumplir con la O. T.

Este agente tiene conocimiento de los espacios que se habilitan al terminar determinadas labores y se actualiza, de forma tal que permite asignar los espacios liberados a los productos que estén pendiente por asignación de E.T. (ver Figura 5.12).

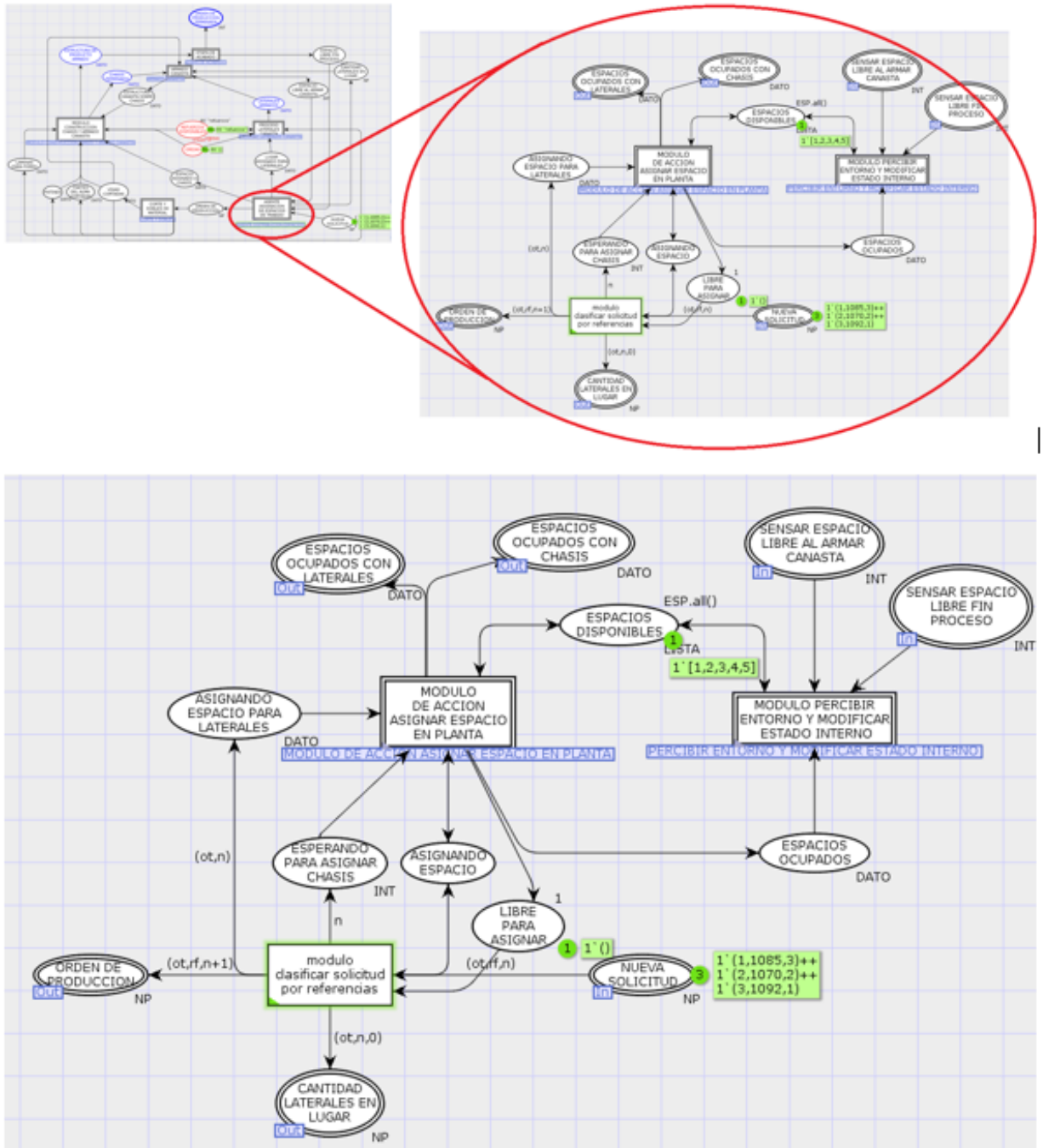


Figura 5.12. Modelo agente asignar estaciones de trabajo.

[illegible]

Para un producto se debe asignar una E.T. para el armado de los laterales y una E.T. para el armado de chasis, si se tienen varios productos de una misma referencia, entonces, se debe asignar una E.T. para fabricar todos los laterales de dicha referencia, a la vez, se asigna una E.T. por cada chasis requerido, por ejemplo:

47

El módulo «MÓDULO PERCIBIR ENTORNO Y MODIFICAR ESTADO INTERNO» es encargado de supervisar las E.T. que quedan libres durante el proceso y guardar dicho registro en su memoria para, posteriormente, asignarlo cuando se necesite dicho espacio en la producción de otra O. T.; los espacios liberados son guardados en orden accedente para que al momento de asignarlos las etapas de armado queden próximas con el fin de reducir las distancias entre ellas, este módulo es presentado en la Figura 5.14.

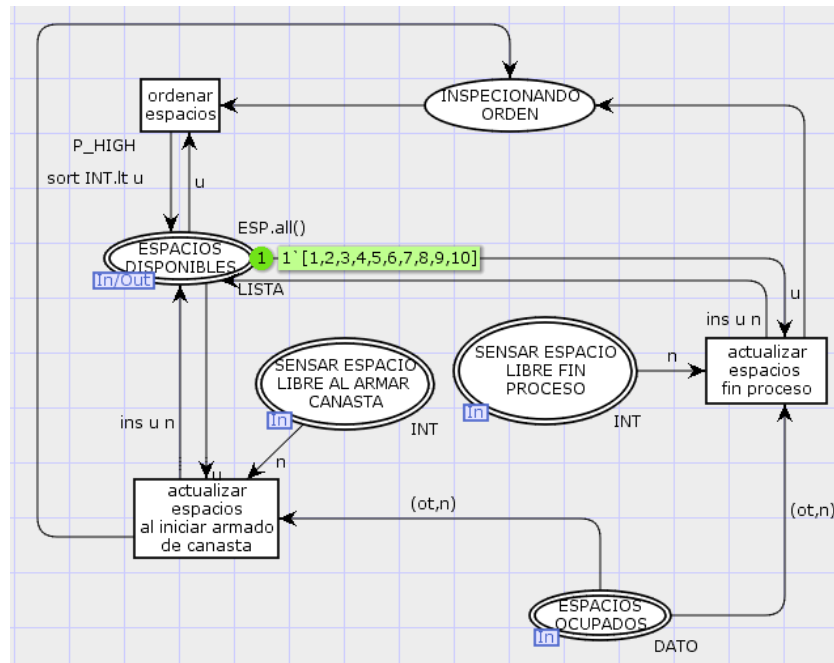


Figura 5.14. Modelo de MÓDULO PERCIBIR ENTORNO Y MODIFICAR ESTADO INTERNO

En la Figura 5.12 y Figura 5.15 se aprecia el lugar denominado «NUEVA SOLICITUD», es un lugar de entrada al agente que asigna los espacios. Este es un lugar que contiene un marcado inicial con los valores (ot,rf,n) que representan respectivamente las O.T. entrantes, las referencias requeridas y la cantidad de productos requerida.

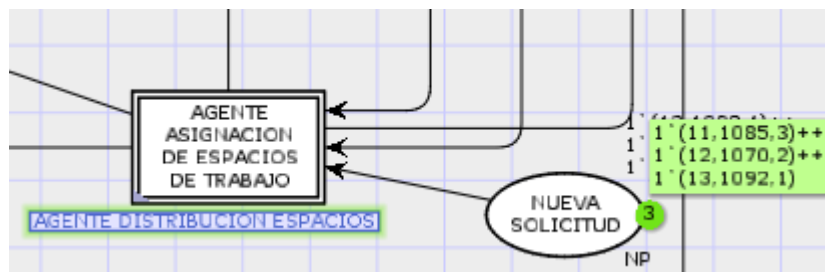


Figura 5.15. Estado inicial del proceso, nueva solicitud de producto.

Al finalizar cada producto el lugar «ORDEN DE PRODUCCIÓN TERMINADA» contendrá el número de O. T. y la cantidad de productos para dicha orden; el número de marcas representa el número de productos correspondiente a una O. T. (ver Figura 5.16). Compare este resultado con los valores iniciales de la Figura 5.15.

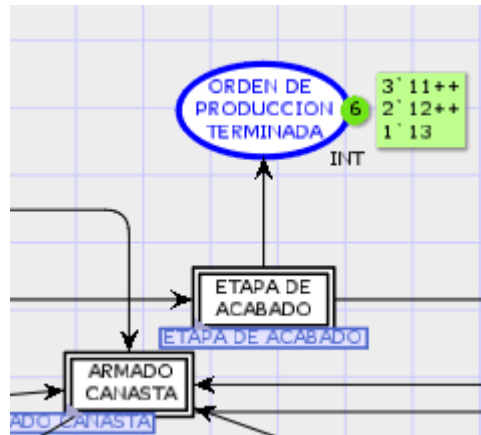


Figura 5.16. Productos terminados según O. T.

5.1.5 Análisis del modelo

Para el análisis de este modelo se realizaron diferentes corridas del esquema general para observar su comportamiento y compararlo con el desarrollado por el sistema real, se corrigen las fallas que se presentan durante las simulaciones hasta obtener el resultado requerido, luego se procede a validar el comportamiento de los diferentes módulos que componen el sistema, se busca que el orden de activación de dichos módulos sea el establecido en los requerimientos funcionales del sistema.

Se verifica cada módulo mediante simulación para que cumpla con las propiedades especificadas en la sección 4.5.

El comportamiento funcional del modelo estuvo acorde a los requerimientos del sistema real y todos los módulos fueron verificados para evitar bloqueos o disparos sin acotamiento entre otras propiedades.

Se anexa el modelo desarrollado para este sistema junto al documento.

5.2 MODELADO DE LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA EN PUERTO MALLARINO CALI – VALLE DEL CAUCA



Figura 5.17 Planta Puerto Mallarino.

Tomada de: manual de operaciones puerto mallarino, 2011.

La Planta de Potabilización de Agua Puerto Mallarino abastece a casi el 60% de la población de Cali, cerca de 2.000.000 de usuarios dependen de esta planta para suplir su necesidad de agua potable [50], [51].

5.2.1 Recolección de información de la planta

El modelo representará el comportamiento del sistema en un proceso normal de operación, un esquema general de la planta se muestra en la Figura 5.18.

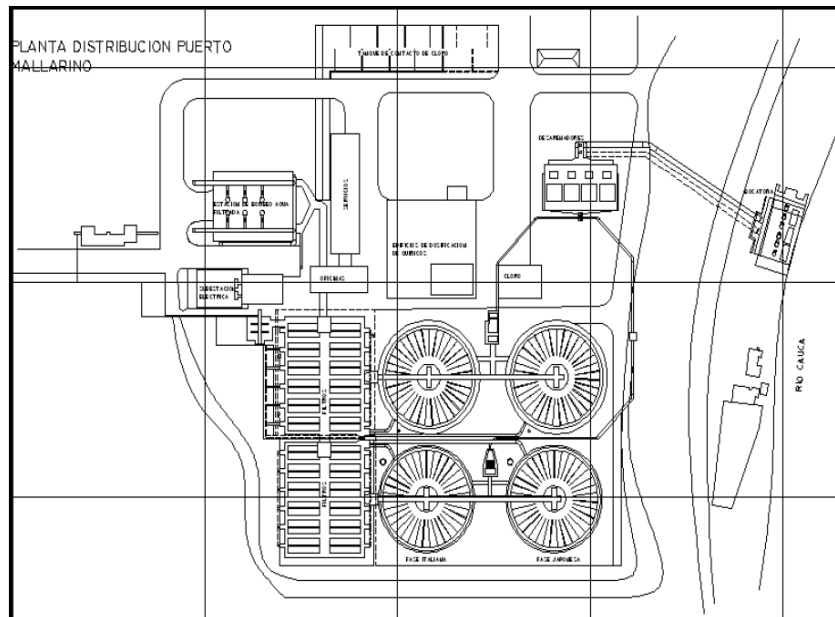


Figura 5.18 Esquema de planta de potabilización.
Tomada de: manual de operaciones Puerto Mallarino, 2011.

El proceso de potabilización inicia en la bocatoma junto al Río Cauca donde unas rejillas denominadas rejillas gruesas detienen el paso de residuos sólidos gruesos (ver Figura 5.19).



Figura 5.19 Entrada bocatoma.
Tomada de: manual de operaciones Puerto Mallarino, 2011.

Luego, el agua es bombeada a la etapa de desarenado (ver Figura 5.20), se cuenta con dos estructuras para este proceso; en esta etapa se aplica carbón activado para eliminar olores y sabores desagradables del agua.

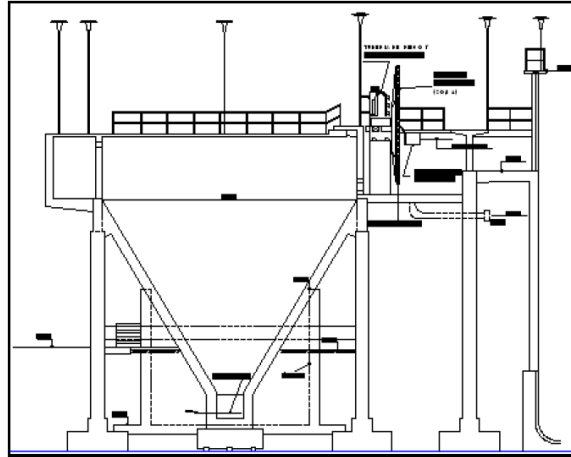


Figura 5.20 Estructura Desarenador.
Tomada de: manual de operaciones Puerto Mallarino, 2011.

Posteriormente, el agua es enviada a través de las CADICAS (Cámara de Distribución de Caudales) a los reactores (ver Figura 5.21), donde se lleva el proceso de clarificación de agua mediante el uso de cloruro férrico, este actúa como coagulante que permite agrupar las partículas en suspensión que se encuentran en el agua y luego, en un proceso de filtrado con lodos, estas partículas agrupadas son atrapadas, esto permite la limpieza o la clarificación del agua.



Figura 5.21 Reactores.
Tomada de: manual de operaciones Puerto Mallarino, 2011.

Luego, el agua clarificada continúa a los filtros rápidos que retienen las partículas pequeñas que no lograron ser capturadas en el proceso anterior (ver Figura 5.22).



Figura 5.22 Filtros rápidos para agua clarificada.
Tomada de: manual de operaciones Puerto Mallarino, 2011.

Al salir de los filtros rápidos se realiza el proceso de cloración del agua, esto permite descontaminar el agua de agentes dañinos. Al finalizar el proceso se aplica cal para estabilizar el pH del agua y luego, el agua es bombeada a los usuarios.

5.2.2 Definición de variables y comportamiento del sistema

Las siguientes son las variables relevantes en el sistema, según su ubicación en la planta de tratamiento de agua potable, que deben ser consideradas en el modelo:

Tabla 5.3. Etapas y variables del sistema.

Ubicación	Variable
<i>Estación Milán</i>	○ Nivel. ○ Turbiedad. ○ Oxígeno disuelto. ○ Conductividad
<i>Bocatoma</i>	○ pH. ○ Nivel. ○ Turbiedad. ○ Oxígeno disuelto. ○ Conductividad

<i>Desarenador</i>	○ Turbiedad. ○ Caudal.
<i>CADICAS</i>	○ pH. ○ Nivel.
<i>Reactores</i>	○ Turbiedad. ○ Nivel de Lodos.

Con los datos anteriores se procede a realizar el análisis de las variables para establecer relación entre estas y cómo afectan el proceso de clarificación y potabilización del agua.

Como se describió anteriormente, las variables importantes del proceso por cada etapa serán los datos de entrada y salida de cada subproceso llevado a cabo en la planta, aquí se establecen los rango de operación de la planta y de los equipos, también se toman valores reales de los históricos registrados en procesos anteriores para analizar cuál es la variación de los parámetros dentro del proceso.

Debido al comportamiento complejo de las variables que componen el agua y que su variación depende de factores que son altamente complejos, se simplificara el modelo de forma tal que solo se tenga en cuenta la variación de estos parámetros en función de los cambios climáticos, más específicamente dependerá de la cantidad de días lluviosos, esta simplificación con afecta la calidad del modelo ya que se busca modelar un escenario donde la planta reciba caudales con parámetros dentro de lo estados normales y esta simplificación se ajusta al requerimiento del sistema.

5.2.3 Modelo estructural

Al tener las variables a manejar dentro del sistema se procede a ubicar la posición de los equipos y dispositivos involucrados en el proceso de producción, se desarrolla un levantamiento estructural del modelo, es decir, se divide el sistema en módulos o etapas y se realiza un gráfico que describa dichas etapas, es útil apoyarse en gráficos que describan los flujos o actividades de forma general para posteriormente realizar los levantamientos estructurales por cada módulo, (ver Figura 5.23 y Figura 5.24)

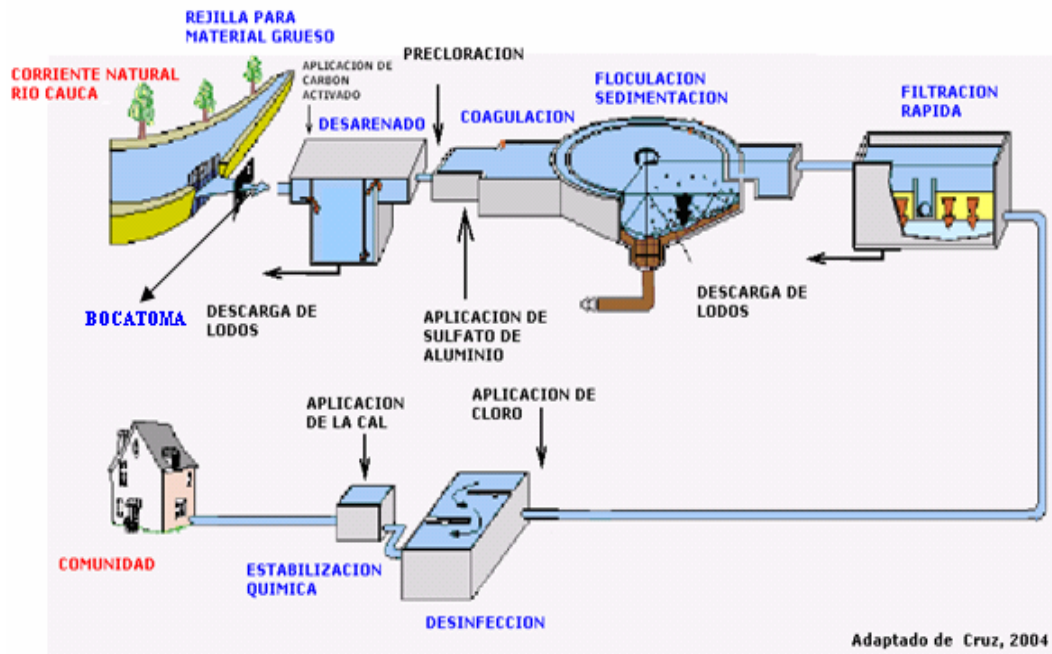


Figura 5.23 Modelo estructural general del proceso productivo de agua potable planta Puerto Mallarino. Tomada de: manual de operaciones Puerto Mallarino, 2011.

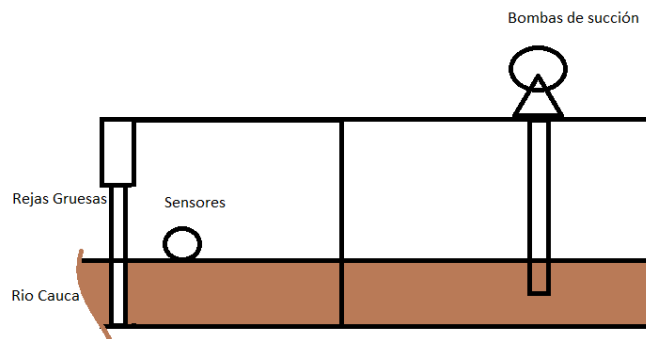


Figura 5.24 Modelo Estructural de bocatoma

5.2.4 Modelado conceptual y funcional

Luego de desarrollar el levantamiento estructural, se procede a desarrollar el modelo conceptual del sistema, para esto se utilizan diagramas de flujo, casos de uso, etc. Donde el desarrollo de este tipo de diagramas puede ser llevado a cabo con la ayuda de diagramas UML (*unified modeling language*), en la Figura 5.25 se presenta un ejemplo de diagrama de flujo de las zonas donde se toman las variables del agua de la planta de potabilización de Puerto Mallarino.

Posteriormente se utiliza CpnTools (herramienta de modelado) y se ubican las etapas del sistema que son representadas mediante transiciones, ya que dichas transiciones durante los refinamientos contendrán subredes que representarán los subprocesos llevados a cabo en cada etapa. Estos módulos o etapas son ubicados en el orden en que aparecen en el modelo estructural (ver Figura 5.23), cada etapa se une mediante lugares y arcos con etapas relacionadas (ver Figura 5.26).

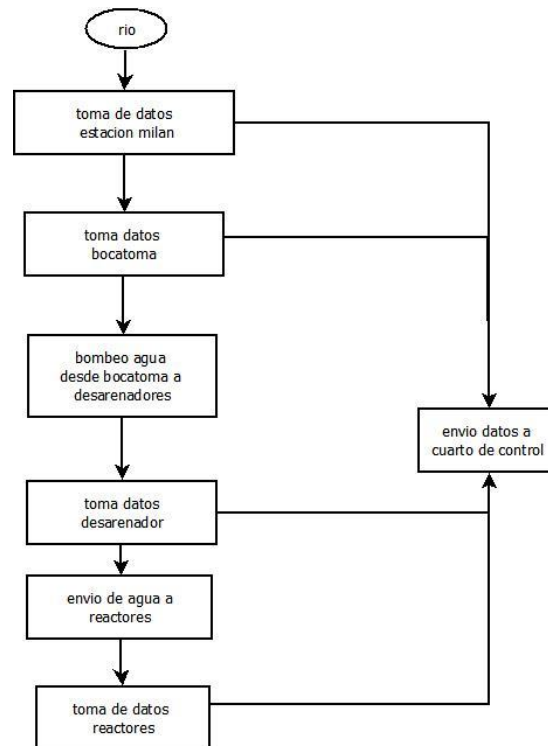


Figura 5.25. Diagrama de flujo a nivel macro planta Puerto Mallarino

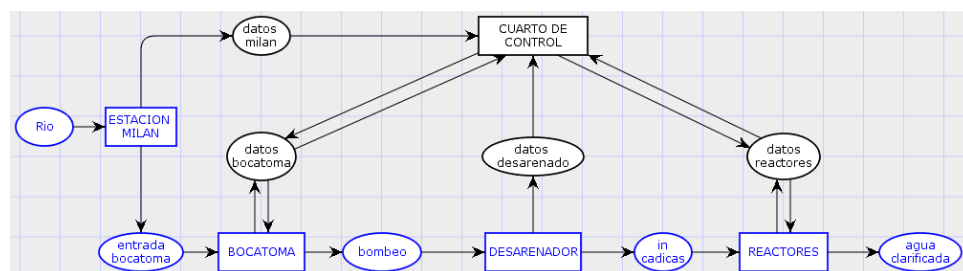


Figura 5.26. Levantamiento conceptual inicial.

Luego del levantamiento inicial se procede a realizar un refinamiento de cada módulo, se definen lugares de entrada y de salida mediante los cuales cada etapa intercambiará recursos o información con otras etapas (ver Figura 5.27, Figura 5.28 y Figura 5.29). Nótese que en el modelo los lugares y transiciones de color azul representan el paso de agua por cada etapa del proceso de purificación desde la estación Milán hasta la etapa de agua clarificada y filtrada.

El modelo inicial puede presentar cambios a medida que se avanza en la construcción del modelo funcional, debido a la aparición de nuevos lugares para modelar comportamientos necesarios para que el modelo se comporte como el real.

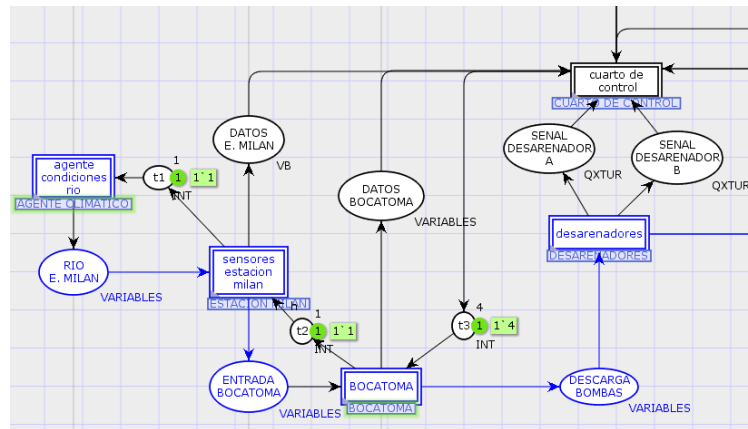


Figura 5.27. Esquema conceptual refinado del modelo, primera etapa.

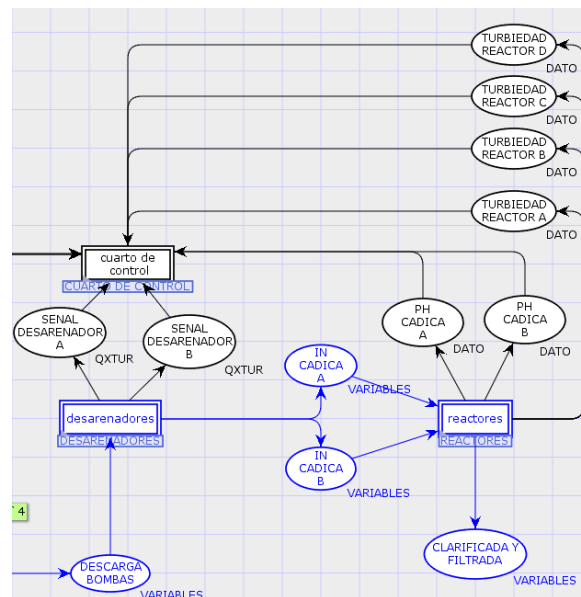


Figura 5.28. Esquema conceptual refinado del modelo, segunda etapa.

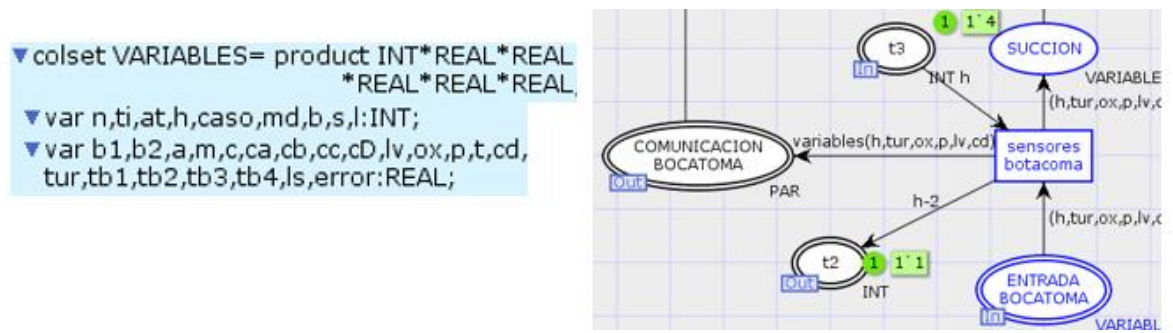


Figura 5.30. Colores y variables definidas para propiedades del agua.

Por efectos de espacio se anexan algunos modelos de las etapas de **agente condiciones río**, **bombeo desde bocatoma** y **desarenado**. Figura 5.31, Figura 5.32 y Figura 5.33.

En la Figura 5.31 se observa en el esquema general a la transición **agente condiciones río**, esta transición contiene una subred del mismo nombre que define un proceso interno, a la vez esta subred contiene otra subred denominada **AGENTE RÍO**, es decir, AGENTE RÍO es subred de AGENTE CONDICIONES RÍO. En este caso AGENTE CONDICIONES RÍO define el tipo de mes que se modelará (hablando en términos de meses lluviosos), el cual puede ser mes lluvia alta, media, baja o tiempo seco; luego de seleccionar la condición climática del mes, esta red asigna un número de días de lluvia alta, media, baja y sin lluvia, todos los valores asignados a los días de lluvias son tomados de datos estadístico según el IDEAM ver [13].

Una vez clasificados el tipo de mes, los días y los tipos de lluvias, los datos son enviados a la subred AGENTE RÍO, que es la encargada de modelar el comportamiento de las variables fisicoquímicas del río, dichos comportamientos fueron modelados mediante funciones matemáticas que se adaptan a valores reales basados en datos históricos recopilados en la planta. Luego, AGENTE RÍO entrega las variables que posteriormente serán detectadas en la estación MILÁN y así inicia el proceso de purificación de agua.

Luego de pasar por la estación MILÁN, la cual tiene como función de sistema de alerta temprana, el río continuó a la siguiente etapa denominada BOCATOMA; este módulo recopila los valores de las variables del agua a la entrada de la planta y las envía al cuarto de control, en esta red también se tiene la subred AGENTE ENCENDER BOMBAS que modela la labor del operario al encender el número de bombas necesario para cumplir con el caudal requerido, considera el número de

bombas que se tiene disponible y el valor del caudal requerido (ver Figura 5.32). La función de este agente es tomar el valor máximo de cada bomba y restarlo al valor que se solicita, cuando resta el valor de la bomba automáticamente la bomba seleccionada es encendida, de esta forma resta los valores de las siguientes bombas al valor remanente hasta cumplir con el caudal.

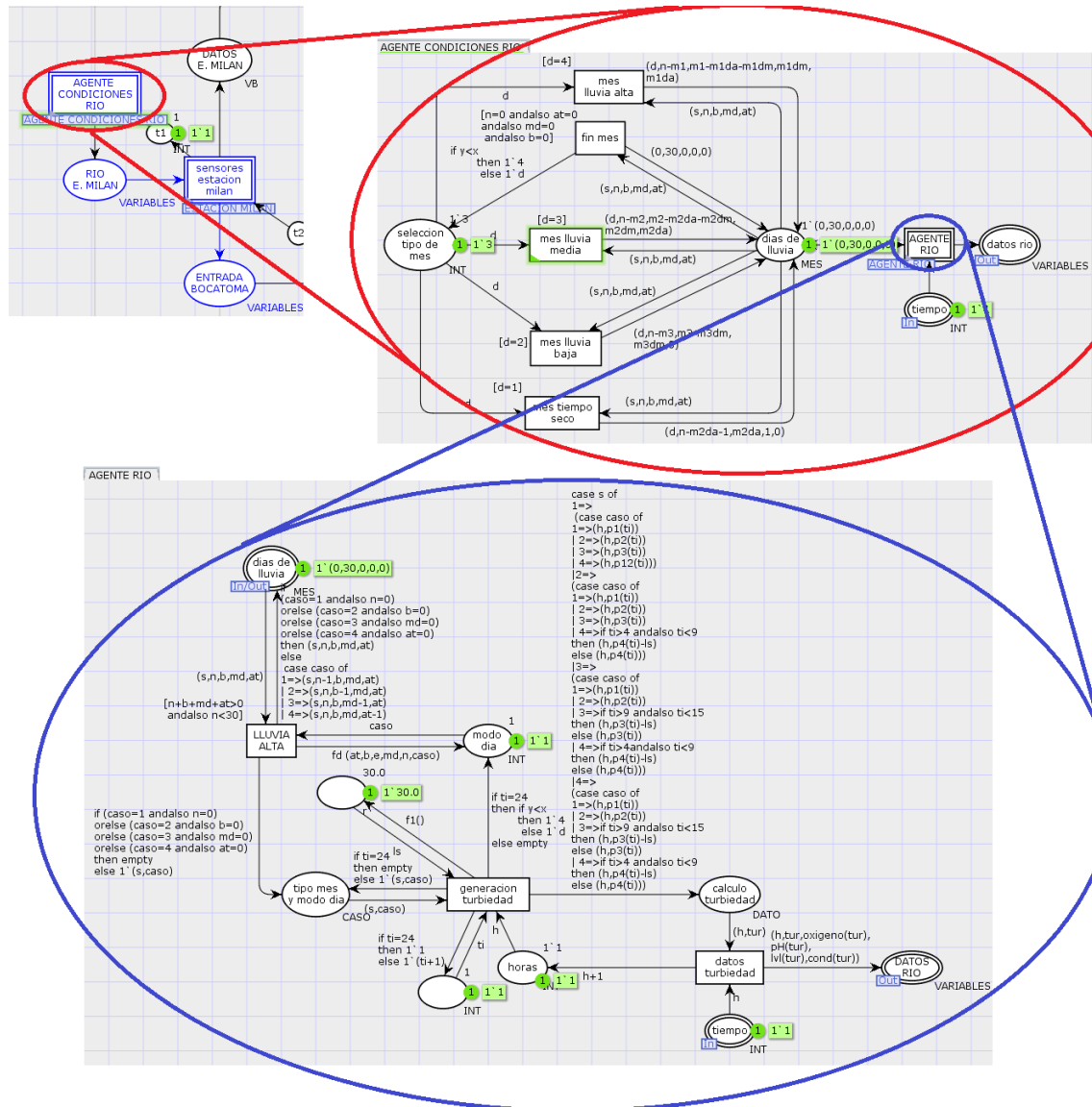


Figura 5.31. Modelo de AGENTE CONDICIONES RÍO y AGENTE RÍO.



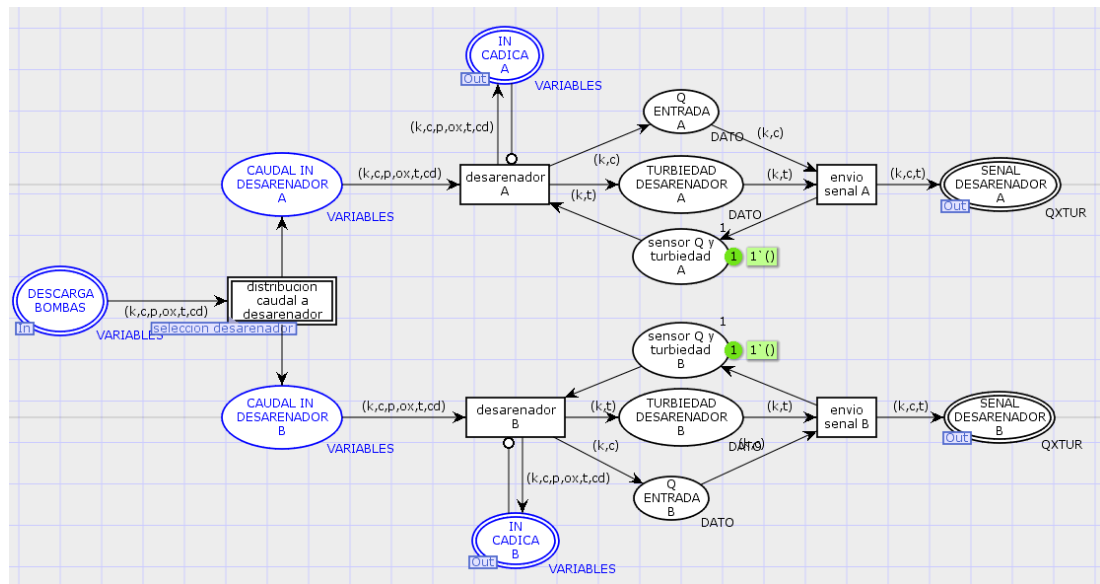


Figura 5.33. Modelo estación de desarenado.

5.2.5 Análisis del modelo

En esta etapa, el modelo es validado comparando los datos obtenidos del Sistema real vs datos del modelo (ver Figura 5.34 y Figura 5.35). Todas las propiedades del modelo son verificadas para asegurar que esté libre de bloqueos y que todas sus etapas sean alcanzables. El modelo permite generar datos de turbiedad de forma variable, tal como se manifiesta la turbiedad del Río Cauca en diferentes épocas del año.

Estos datos generados son tomados por medio de monitores que permiten el manejo de datos pues extraen dicha información y la envían a un archivo de manejo de datos, con esto se logra manejar la información y observar su comportamiento en el tiempo; además, los datos extraídos se pueden utilizar para el análisis de fallas en el Sistema, ya que las fallas pueden ser representadas con valores erróneos insertados de forma aleatoria para que una herramienta de análisis de falla evalúe el Sistema.

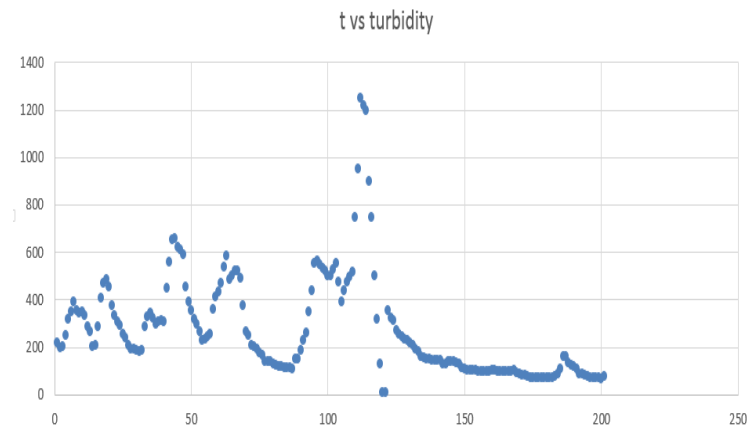


Figura 5.34. Datos del sistema real.

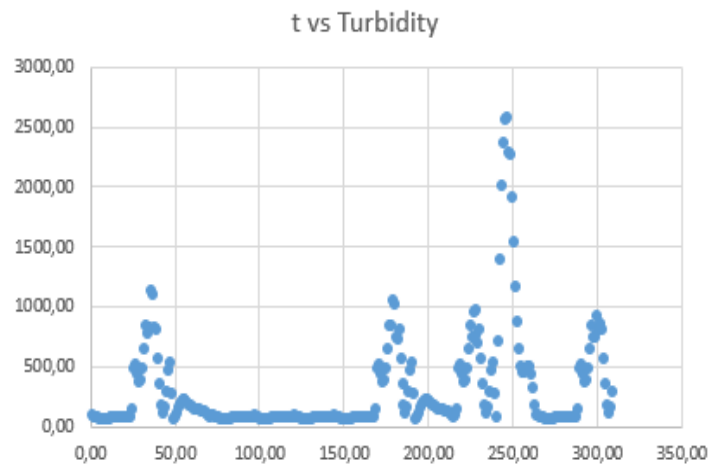


Figura 5.35. Datos obtenidos con el modelo.

Anexo al documento: programa y modelos de los sistemas desarrollados.

6 CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación integra herramientas y métodos que de forma estructurada permiten modelar Sistemas Distribuidos. Así, al integrar la herramienta de modelado CPN y un enfoque de orientación de agentes, se representan y simulan procesos que tienen cierto grado de inteligencia. De esta forma el abordaje planteado permite representar un sistema de forma modular y distribuida el cual involucra el comportamiento de un experto en un área específica.

Al considerar que los planteamientos presentados fueron implementados en dos ejemplos de aplicación con arquitecturas diferentes (reactiva y deliberativa), se infiere que la propuesta de modelado es independiente del tipo de arquitectura definida para el sistema de agente. Así, la arquitectura reactiva planteada para el agente desarrollado para el primer modelo, permite emular políticas de decisión aplicadas a la distribución de espacios de trabajo que se encuentren libres, la estrategia de control de estas decisiones están encaminadas a utilizar de manera eficiente estos espacios, donde, se tuvo en cuenta la menor distancia de transporte de materiales al momento de iniciar la etapa de ensamble. Por otra parte, la arquitectura deliberativa para el segundo modelo, permite emular la generación de variables por parte de un sistema natural, en este caso el río Cauca, con el fin de tener un generador de datos que alimente al modelo con los datos del río y de esta forma modelar el proceso de flujo de variables en el proceso de potabilización, este tipo de modelo abre posibilidades a múltiples proyectos que pueden ser aplicados al proceso de potabilización, por ejemplo proyectos de diagnóstico de fallas donde el modelo sirva como base para realizar las pruebas experimentales del programa de diagnóstico antes de implementar en un sistema real.

TRABAJOS FUTUROS

Implementación de la metodología para generar modelos de sistemas productivos que sirvan para desarrollar programas de alertas tempranas. Para esto, se recomienda la integración de otras herramientas de modelado como por ejemplo las redes Bayesianas o lógica difusa para considerar el diagnóstico de la falla

Implementar el enfoque de agentes en otras etapas del proceso de producción de agua potable, por ejemplo en la etapa de dosificación de químicos para el proceso de coagulación y sedimentación.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. E. Meyers and M. P. Stephens, *Diseño de instalaciones de manufactura y manejo de materiales*. Pearson Educación, 2006.
- [2] B. W. Niebel and A. Freivalds, *Ingeniería industrial: métodos, estándares y diseño del trabajo*. Alfaomega, 2004.
- [3] P. Leitão and F. Restivo, “AN AGILE AND COOPERATIVE ARCHITECTURE FOR DISTRIBUTED MANUFACTURING SYSTEMS,” in *IASTED International Conference on Robotics and Manufacturing*, 2001, pp. p.188–193.
- [4] F. Aguayo, M. MARCOS, M. SÁNCHEZ, and J. LAMA, *Sistemas Avanzados de Fabricación Distribuida*. 2007.
- [5] A. Rosado Muñoz, “SISTEMAS INDUSTRIALES DISTRIBUIDOS: Una filosofía de automatización,” in *Apuntes de Teoría*, Valencia España, pp. 3–17.
- [6] E. Villani, “Modelagem e Análise de Sistemas Supervisórios Híbridos,” Escola Politecnica da Universidade de Sao Paulo, 2004.
- [7] K. Jensen and L. M. Kristensen, *Coloured Petri Nets, Modelling and Validation of Concurrent Systems*, 1st ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [8] M. P. Fanti, “Petri net approaches to deadlock modeling and resolution in automated manufacturing,” *IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, vol. vol.3, p. 6, 2002.
- [9] K. Jensen, L. M. Kristensen, and L. Wells, “Coloured Petri Nets and CPN Tools for modelling and validation of concurrent systems,” *Int. J. Softw. Tools Technol. Transf.*, vol. 9, no. 3–4, pp. 213–254, Mar. 2007.
- [10] R. Zurawski and M. Zhou, “Petri nets and industrial applications: A tutorial,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 41, no. 6. pp. 567–583, 1994.
- [11] M. Silva, E. Teruel, R. Valette, and H. Pingaud, “Petri nets and production systems,” *Lect. Petri nets II ...*, vol. 0452, 1998.
- [12] T. Murata, “Petri nets: Properties, analysis and applications,” *Proc. IEEE*, vol. 77, no. 4, pp. 541–580, Apr. 1989.

- [13] R. Gaeta, "Efficient discrete-event simulation of colored Petri nets," *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 22, no. 9, pp. 629–639, 1996.
- [14] CPN Group. AIS group., "software de Redes de Petri Coloridas cpn tools." [Online]. Available: <http://cpntools.org/download>.
- [15] O. Tarabuta, "Workflow optimization and advanced control of systems based on Petri Nets," in *System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2012 16th International Conference on*, 2012, p. 1,6.
- [16] M. Wooldridge, *Multiagent Systems A Modern Approach to Distributed Moder Approach to Artificial Intelligence*, The MIT Pr. London, England: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [17] J. Celaya, "Modeling and analysis of multi-agent systems using petri nets," *Syst. Man ...*, vol. 4, no. 10, pp. 981–996, 2007.
- [18] D. Carranza and J. Rodríguez, *Sistemas inteligentes artificiales y su aplicación en ingeniería*, no. 1. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín: Imprenta Universidad Nacional, 1997.
- [19] E. Alvarez, J. Marañón, and J. Ríos, "Aplicación del paradigma de los Agentes Inteligentes a los sistemas de producción.," *IV Congr. Ing. ...*, 2001.
- [20] F. Huan and W. Lili, "Colored petri net based multi-agents dynamic task allocation modeling and analysis," *2nd Int. Conf. Inf. Sci. Eng.*, pp. 1080–1083, Dec. 2010.
- [21] J. Zeng, H. W. Ngan, J. Liu, J. Wu, and X. Yu, "Colored Petri Nets Modeling of Multi-agent System for Energy Management in Distributed Renewable Energy Generation System," in *2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 2010, pp. 1–5.
- [22] D. Weyns and T. Holvoet, "A Colored Petri Net for a Multi-Agent Application," *Components, Objects and Agents, MOCA'02*, no. i, 2002.
- [23] J. S. Litt, E. Wong, M. J. Krasowski, and L. C. Greer, "Cooperative multi-agent mobile sensor platforms for jet engine inspection - concept and implementation," *IEMC '03 Proceedings. Manag. Technol. Driven Organ. Hum. Side Innov. Chang. (IEEE Cat. No.03CH37502)*, no. 3, pp. 716–721, 2003.

- [24] A. W. L. Yao, Z. Ji, and H. T. Liao, "A petri nets-based process planning system for wastewater treatment," *Asian J. Control*, vol. 12, no. 3, pp. 281–291, Mar. 2010.
- [25] Su Jindian, Guo Heqing, and Yu Shanshan, "A coloured Petri net model for composite behaviors in multi-agent system," in *2008 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems*, 2008, pp. 677–680.
- [26] Quan Bai, Minjie Zhang, and Haijun Zhang, "A Coloured Petri Net Based Strategy for Multi-Agent Scheduling," in *Rational, Robust, and Secure Negotiation Mechanisms in Multi-Agent Systems (RRS'05)*, 2005, pp. 3–10.
- [27] M. Nassar and J. Melo, "Modeling and Analysing of the Material Entry Flow System in a Pickling Line Process Using Petri Net," *ABCM Symp. Ser. Mechatronics*, vol. 3, pp. 444–453, 2008.
- [28] D. Ernst and L. Kim, "Global production networks, knowledge diffusion, and local capability formation," *Res. Policy*, vol. 31, no. 8–9, pp. 1417–1429, 2002.
- [29] F. S. Caparrini, "Sistemas Multiagente y Simulación," 2013. [Online]. Available: <http://www.cs.us.es/~fsancho/?e=57>.
- [30] J. Garcia and F. Junqueira, "A procedure for modeling and analysis of service-oriented and distributed productive systems," ... *Eng. 2008 ...*, pp. 941–946, 2008.
- [31] J. Méndez, "Inteligencia Artificial.," *Técnicas, métodos y ...*, 2008.
- [32] L. Diego and M. Soto, "Simulación de un sistema de manufactura flexible con redes de Petri coloreadas," vol. 23, pp. 47–62, 2010.
- [33] S. Arregocés, Y. Moreno Ortiz, and C. A. Montilla M., "DISEÑO , SIMULACIÓN , CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UNA CELDA DE MANUFACTURA FLEXIBLE," in *First International Conference on Advanced Mechatronics, Design, and Manufacturing Technology - AMDM 2012*, 2012, no. 2, pp. 1–6.
- [34] C. A. Robles Silva and D. C. Jaimes B, "Revision bibliografica de las tecnicas que relacionan la logica de programación de red de petri con la logica de programación de escalera para la implementación de sistemas automatizados de control," Universidad Pontificia Bolivariana, 2011.
- [35] C. Girault and R. Valk, *Petri nets for systems engineering: a guide to modeling, verification, and applications*. Hamburg Germany: Springer-Verlag, 2003.

- [36] A. Meneses Viveros, "Petra: Herramienta para la modelación y simulación de Redes de Petri," Universidad de puebla mexico, 2002.
- [37] G. D. ZAPATA MADRIGAL, "Diseño de Automatismo Secuenciales para Controladores Lógicos Programables.," Universidad Nacional de Colombia, 2007.
- [38] A. University, "Industrial Use of cpntools," *DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE*, 13-Nov-2014. [Online]. Available: <http://cs.au.dk/cpnets/industrial-use/>.
- [39] L. Murillo, "Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables," *Tecnol. en Marcha*, vol. 21, pp. 102–125, 2008.
- [40] G. Coulouris, J. Dollimore, and T. Kindberg, *Sistemas distribuidos*, 3 edición. Addison wesley, 2001.
- [41] R. Morales and J. Méndez, *Inteligencia artificial: técnicas, métodos y aplicaciones*, 1st ed. Madrid España: Mc Graw Hill, 2008.
- [42] M. Wooldridge, *An Introduction to MultiAgent Systems*, 2da ed. great britain: John Wiley & Sons, 2009.
- [43] P. Maes, "The agent network architecture (ANA)," *ACM SIGART Bull.*, vol. 2, no. 4, pp. 115–120, Jul. 1991.
- [44] M. Doblaré Castellano, *Sobre el Modelado en Biomecánica y Mecanobiología*. 2005.
- [45] Q. Zhang and S. J. Stanley, "Real-Time Water Treatment Process Control with Artificial Neural Networks," *J. Environ. Eng.*, vol. 125, no. 2, pp. 153–160.
- [46] T. Miguel, G. Emilio, R. Leonardo, E. Del, and A. Del, "Modelado y Diagnóstico de Fallos por Medio de Redes De Petri de un Sistema de Envasado de Líquidos," 2006.
- [47] M. A. Trigos Martínez and J. L. Landínez Salazar, "Sistema de Envasado de Líquidos Modelado con Redes de Petri y Simulado con LabView y DSC," *ITECKNE*, vol. 8, no. 2, pp. 147–155, Dec. 2011.
- [48] H. Fang, L. Wang, and Y. Yin, "The Application of Property Preservation by Petri-Net-Based Refinements in the Modeling of Multi-Agents Cooperation," in *2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment*, 2010, pp. 1–4.

- [49] Asocaña, “El Sector Azucarero Colombiano en la actualidad,” 2012. [Online]. Available: <http://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>. [Accessed: 01-Jun-2015].
- [50] J. Beron, F. Idrobo, J. Latorre, “optimizacion del funcionamiento de plantas de potabilizacion de agua mediante la utilizacion de cloruro ferrico,” in *Avances en investigación y desarrollo en agua y saneamiento para el cumplimiento de las metas del milenio*, 21st ed., R. T. Ines, Luis D. Sanchez, A. Galvis, R. Jhonny, and I. Sanabria, Eds. Cali, Colombia: Universidad del Valle, 2007, p. 577.
- [51] EMCALI, *Manual de operación de la planta de potabilización de agua Puerto Mallarino*, vol. 1. 2011, pp. 1–279.