



Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería

ISSN: 0718-3291

facing@uta.cl

Universidad de Tarapacá

Chile

Morales Varela, Alberto; Rojas Ramírez, Jorge Armando; Hernández Gómez, Luis Héctor; Morales González, Ángel; Jiménez Reyes, María Yanet

Modelo de un sistema de producción esbelto con redes de Petri para apoyar la toma de decisiones

Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 23, núm. 2, abril, 2015, pp. 182-195

Universidad de Tarapacá

Arica, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77236977004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Modelo de un sistema de producción esbelto con redes de Petri para apoyar la toma de decisiones

*Lean production system model with Petri nets to support for decision making*

Alberto Morales Varela<sup>1</sup>    Jorge Armando Rojas Ramírez<sup>1</sup>    Luis Héctor Hernández Gómez<sup>1</sup>  
Ángel Morales González<sup>1</sup>    María Yanet Jiménez Reyes<sup>1</sup>

Recibido 23 de abril de 2014, aceptado 25 de septiembre de 2014

*Received: April 23, 2014    Accepted: September 25, 2014*

### RESUMEN

En un mundo altamente dinámico, debido a los cambios tecnológicos, económicos, políticos y sociales en el entorno, se ha reconocido que los sistemas productivos desempeña un papel fundamental en la competitividad de una organización. En esta investigación se plantea la integración del pensamiento esbelto en la gestión de un sistema de producción mediante la técnica de simulación de eventos discretos empleando redes de Petri como metodología de apoyo en el proceso de toma de decisiones. La toma de decisiones en un sistema productivo esbelto es un proceso complejo, esto debido a sus características estáticas (estructurales), dinámicas (operacionales) y los desperdicios que se presentan. En el trabajo se diseñan un conjunto de estructuras que representan distintas fases en un proceso productivo de neumáticos y se demuestra que un modelo empleando la metodología de redes de Petri ayuda a tener una eficaz y eficiente toma de decisiones para la eliminación de desperdicios, esto gracias a las propiedades para modelar eventos discretos y analizar el comportamiento dinámico del sistema. Finalmente la fase de simulación permite analizar un conjunto de parámetros a través de un indicador sistémico OEE (Eficiencia General de los Equipos), y demostrar que la implementación en conjunto de métodos, técnicas y herramientas esbeltas genera sinergia en el sistema.

Palabras clave: Sistema de producción, producción esbelta, redes de Petri, simulación de eventos discretos, eficiencia general de los equipos.

### ABSTRACT

*In a highly dynamic world, due to technological, economic, political and social changes in the environment, it has been recognized that the production systems play a critical role in the competitiveness of an organization. In this research the authors propose the integration of lean thinking in managing a production system using the technique of discrete event simulation using Petri nets as the support methodology in the process of decision making. Decision making in a lean production system is a complex process because it has static (structural) and dynamic (operational) characteristics and a set of waste presented in it. This paper presents the design of a set of structures that represent different stages in a production process of tires and that is it possible to prove that the design of a model, using the methodology of Petri nets, helps to have an effective and efficient decision making for waste disposal, this thanks to the properties of such nets to model discrete events and analyse the dynamic behaviour of the system. Finally the simulation allows analysing a set of parameters through a systemic indicator OEE (Overall Equipment Efficiency) and demonstrate that the implementation of methods, techniques and tools proposed in the lean production theory generate synergy in the system.*

*Keywords: Production system, lean production, Petri nets, discrete event simulation, overall equipment effectiveness.*

---

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería en Sistemas. ESIME Unidad Zacatenco. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F.  
E-mail: am\_varela@prodigy.net.mx; jrojasr@ipn.mx; luishector56@hotmail.com; amorales@ipn.mx;  
maria.jimenez.reyes@gmail.com

## INTRODUCCIÓN

La producción esbelta es una teoría fundamental para el mejoramiento de la productividad y la competitividad de las empresas de manufactura y servicios. La globalización de mercados exige a las organizaciones mantener estándares de clase mundial en sus procesos, entendiendo que toda ventaja competitiva es temporal y existe la necesidad de someterse a constantes procesos de adaptación por parte de todos los miembros de la red de valor.

La adopción de paradigmas de producción, aplicación de metodologías, técnicas y herramientas a través del tiempo han mostrado tener una tendencia hacia el reduccionismo y se han enfocado a resolver situaciones específicas, aunado a lo anterior han dejado de considerar en determinados momentos el factor humano, considerado como uno de los desperdicios descritos en la teoría de producción esbelta.

Estableciendo que los sistemas de producción no solo responden a las restricciones cuantitativas bien definidas, sino también a las variaciones cualitativas que el factor humano introduce en su operación, y que la identificación y eliminación de desperdicios (entendido como desperdicio toda aquella actividad que no agrega valor, pero sí un costo y trabajo) requieren la implementación de un proceso continuo y sistemático a través de un modelo. Se identifica que uno de los problemas fundamentales al que se enfrentan las organizaciones es la necesidad de diseñar procesos con base en una visión sistémica que les permita identificar características emergentes y mejorar toda área de oportunidad en el sistema, a través de mejoras tecnológicas, económicas, sociales y políticas en sus procesos de gestión y producción.

La aportación de esta investigación es ofrecer una solución a la problemática mencionada, mediante la propuesta de un modelo sistémico a los responsables de la gestión de sistemas productivos, que caracterice un conjunto de estructuras a través de redes de Petri, el cual puede ser empleado como una herramienta que apoya en el proceso de estudio, análisis y toma de decisiones, para la mejora estratégica del sistema, empleando métodos, técnicas y herramientas eficientes propuestas en la teoría de producción esbelta.

El modelo permite identificar los diferentes tipos de relación que pueden establecerse entre los elementos y la sensibilidad que las variables tienen mediante la interacción y evolución a través del tiempo. Lo antes mencionado se obtiene en función del conjunto de decisiones estratégicas a través de las cuales se va a configurar la estructura productiva de la organización, estas incluyen el conjunto de decisiones tendentes a la mejora continua, mediante la elección, configuración y distribución de los factores productivos fijos y variables, instalaciones, sistemas de información, recurso humano y materiales, para que la capacidad de creación de valor, como medida de eficiencia del sistema productivo, sea la máxima posible.

El trabajo parte definiendo conceptualmente la relación que existe entre la ciencia de sistemas y la cadena de suministro, posteriormente el diseño del modelo se ubica en el contexto del eslabón de manufactura.

## MARCO CONCEPTUAL

### **Análisis sistémico de la cadena de suministros**

En su acepción más amplia, la teoría general de sistemas se presenta como una forma sistemática y científica de aproximar y representar la realidad [1]. Al mismo tiempo, juega un papel muy importante en la investigación para orientar los análisis desde una perspectiva holística e integradora [3].

Hasta la aparición de la teoría de sistemas, los diferentes planteamientos formulados para el estudio de las organizaciones se realizaban desde una concepción limitada al entenderla como un sistema cerrado. Sin embargo, una concepción integral de dicho planteamiento rompió con este paradigma tradicional introduciendo el concepto de sistema abierto [4-5]. Desde esta perspectiva el estudio de las organizaciones supone una necesaria interrelación entre el sistema estudiado y su entorno, de tal manera que se asume la existencia de una serie de relaciones de interinfluencia constante e intercambio continuo de elementos [6-7].

Desde el punto de vista sistémico, una cadena de suministro se define como un sistema integrado por diversas empresas relacionadas entre sí, que trabajan en armonía con el propósito de alcanzar objetivos comunes tanto de la organización como

de sus integrantes, que mantienen una constante dinámica de interacción con su medio ambiente [9].

En la Figura 1 se muestran los elementos principales que conforman una cadena de suministro, se encuentran por una parte los procesos de transformación, abastecimiento y almacenamiento tanto de insumos como de productos terminados, y por otra, los de distribución, colocación y entrega final del producto [9–10].

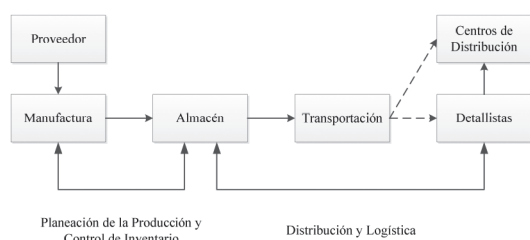


Figura 1. Proceso de cadena de suministro.

## Producción esbelta

El paradigma de producción esbelta está basado en su totalidad en el Sistema de Producción de Toyota (TPS), nació en Japón y fue concebido por los grandes gurús, entre ellos: Sakichi Toyoda, Kiichiro Toyoda, Eijy Toyoda, Taiichi Ohno, Shigeo Shingo y W. Edwards Deming.

En 1990 James P. Womack, Daniel T. Jones y Daniel Roos, del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) analizaron la evolución de los sistemas de gestión de producción, y a través de esto definen un conjunto de principios y conceptualizan el paradigma de producción esbelta.

Producción esbelta es un paradigma que tiene como base un proceso continuo y sistemático de identificación y eliminación de desperdicios [11]. Establece una filosofía de gestión enfocada a la creación de valor, para poder entregar el máximo valor para los clientes, utilizando para ello los mínimos recursos necesarios. Esta eliminación sistemática se lleva a cabo mediante trabajo con equipos de personas bien organizados y capacitados [12].

La creación de valor se focaliza en la reducción de los ocho tipos de desperdicios en productos manufacturados eliminando el desperdicio, mejorando la calidad y reduciendo el tiempo de producción y el costo [13].

Se han identificado ocho tipos de desperdicios que no agregan valor al proceso de manufactura, estos desperdicios son: sobreproducción, inventario, reparación y rechazos, movimientos innecesarios, procesamiento incorrecto, tiempo de espera y talento humano [14-15]. En la Tabla 1 se clasifican los métodos, herramientas y técnicas que se proponen en la teoría de producción esbelta, con el objetivo de eliminar los desperdicios.

Tabla 1. Metodologías, herramientas y técnicas en Producción Esbelta.

Herramientas básicas	Kaizen
	VSM (Value Stream Mapping)
	5 S's
	Andon
Herramientas para mejorar la efectividad	TPM (Total Productive Maintenance)
	Manufactura Celular
	SMED
Herramientas para mejorar la calidad	Herramientas de Calidad (Herramientas Estadísticas)
	Soifuku
	Poka Yoke
	Jidoka
	8 D's
Herramientas para el control de materiales y producción	Six Sigma
	Kanban
	Heijunka
	Takt Time
	Shojinka

## METODOLOGÍA

Un proyecto de simulación es de naturaleza dinámica, para llevarla a cabo se proponen las siguientes fases, estas son descritas en [24]:

1. Formulación del problema.
2. Diseño del modelo conceptual.
3. Recolección de datos.
4. Construcción del modelo.
5. Validación del modelo.

## Redes de Petri

El modelo se desarrolló empleando la metodología de redes de Petri (RdP). Una RdP es un grafo orientado en el que intervienen dos clases de nodos, llamados lugares y transiciones, unidos por arcos orientados, de manera alternada. Un lugar puede tener un número positivo o nulo de marcas [16].

Las RdP proporcionan una herramienta matemática y gráfica de modelado para la descripción formal de sistemas de eventos discreto, tienen un alto potencial descriptivo y permiten una representación clara de sistemas cuya dinámica se caracteriza por la concurrencia, sincronización, exclusión mutua y conflictos, facilitando con ello la descripción y la elaboración de modelos, así como la posterior implantación de sistemas [24]. Como herramienta gráfica, las RdP son empleadas como una representación de los sistemas, utilizando marcas para simular la dinámica y las operaciones concurrentes; como herramienta matemática, las RdP permiten obtener modelos gobernados por el comportamiento del sistema [17].

### Definición formal

Una red de Petri generalizada es una cuádrupla  $R = \langle P, T, \alpha, \beta \rangle$  tal que:

$P$  es un conjunto finito y no vacío de lugares.

$T$  es un conjunto finito y no vacío de transiciones.

$P \cap T = \Phi$ ; es decir, lugares y transiciones son conjuntos disjuntos.

$\alpha: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  es la función de incidencia previa

$\beta: T \times P \rightarrow \mathbb{N}$  es la función de incidencia posterior.

### Definición gráfica

Una RdP se representa esquemáticamente por lugares y transiciones en una gráfica orientada. Tal como se observa en la Figura 2, los lugares se representan por circunferencias y las transiciones por barras. Existe un arco que va del lugar  $p_i$  a la transición  $t_j$  si y sólo si  $\alpha(p_i, t_j) \neq 0$ . Análogamente, existe un arco que va de la transición  $t_k$  al lugar  $p_i$  si y sólo si  $\beta(t_k, p_i) \neq 0$ . Cada arco se etiqueta con un entero natural,  $\alpha(p, t)$  o  $\beta(t, p)$ , que se denomina ponderación del arco. Por convención, un arco no etiquetado posee una ponderación unitaria [18].

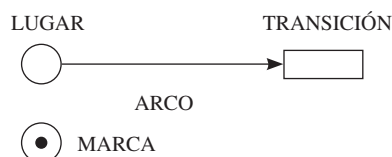


Figura 2. Identificación de componentes en una red de Petri.

## MODELO DEL SISTEMA

El diseño del modelo consiste en la propuesta de un conjunto de estructuras que caracterizan los

desperdicios identificados a través de la teoría de producción esbelta, los cuales se presentan en diferentes etapas de un sistema productivo. El modelo tiene como objetivo identificar y representar componentes, flujos de información y flujos de materiales a través del formalismo de RdP, y eliminar aquellos desperdicios mediante la reconfiguración de la red.

La reconfiguración está en función de un conjunto de indicadores de desempeño. Estos permiten evaluar el desempeño de la red de forma global y permiten tener una visión para decidir si la mejora establecida es una propuesta viable.

### Descripción del sistema de producción de neumáticos

El sistema en estudio es una planta de producción de neumáticos localizada en Ciudad de México. El proceso debe garantizar que cada neumático reúna los más altos estándares de calidad, motivo por el que la presente investigación integra el paradigma de producción esbelta al proceso. De forma breve, el proceso se describe a través de las siguientes etapas:

1. El caucho natural y sintético es cortado en piezas pequeñas y sometido a calentamiento, con la finalidad de simplificar y acelerar el proceso de mezcla.
2. Esta mezcla, que consiste en el recorte longitudinal, molienda, es realizada después de añadir varios aditivos como azufre, óxido de zinc y carbón negro.
3. En este punto el caucho puede ser procesado en una de las cinco formas diferentes de producción para manufacturar uno de los tres tipos de productos que forman parte del neumático.

Estos 3 elementos son:

- a) Alerón. Los alerones son producidos colocando el caucho mezclado en un estrujador para formar tiras de caucho que luego son cortados a las longitudes deseadas, y endurecidos en una prensa de curado para formar los alerones.
- b) Cámaras. Ya que las propiedades físicas del caucho usado para producir las cámaras difieren del caucho usado para producir los neumáticos

y los alerones, se requerirá de un proceso adicional. El caucho mezclado es pasado a través de un colador antes que sea colocado en la mezcladora de rodillos. Después de mezclado, un estrujador forma las tiras de caucho que son unidas y prensadas para formar la cámara del neumático.

### c) Neumáticos.

La línea de manufactura de neumáticos contempla las siguientes fases:

- i. Huella o banda de rodadura: El caucho mezclado es alimentado en un estrujador para formar la huella o banda del neumático. Después de este proceso, la huella o banda es enviada a la máquina formadora de neumáticos.
- ii. Capas: El material usado como la capa de los neumáticos es una tela engomada hecha del caucho y cordones de nylon en una calandria de rodillos múltiples. Después que cada capa de este material es cortada en un ángulo específico, es enviado a la máquina formadora de neumáticos.
- iii. Listones: Los listones en forma de anillo usados para formar los listones de las llantas son hechos automáticamente por una serie de máquinas que usan alambres recubiertos de caucho para formar lazos que son envueltos con la tela de nylon de caucho producida en el paso anterior. Luego los listones son enviados a la máquina formadora de neumáticos.
- iv. Ensamble: La tela de nylon engomada, los listones, y la huella o banda son colocados, en ese orden, en la máquina formadora de neumáticos. Las capas de la tela de nylon engomada son envueltas con los listones en dirección opuesta para formar el centro del neumático. La banda de rodadura es colocada alrededor del perímetro externo del centro del neumático y doblado conjuntamente formando el neumático verde.
- v. Curado: El neumático verde es colocado en una prensa de curado que suministra calor, vapor y presión para formar el neumático vulcanizado.
- vi. Acabado: Los neumáticos son pulidos, recortados, balanceados, inspeccionados y envueltos, completando de esta manera el proceso.

Una vez definida la lógica de operación del sistema, se desarrolla un modelo empleando la metodología

de RdP. Tal como se muestra en la Figura 3, se representa el sistema de producción de una planta de neumáticos, se emplean transiciones determinísticas, estocásticas y temporizadas que son identificadas en la Tabla 4 del Anexo 1. Este modelo se basa en eventos discretos, los cuales tienen como objetivo identificar a sistemas en donde los eventos que cambian el estado del mismo ocurren en instantes espaciados en el tiempo [19].

En este trabajo se presenta el diseño de tres redes que representan el comportamiento de un sistema TPM (*Total Productive Maintenance*), un sistema SMED (*Single Minute Exchange of Die*) y un sistema Kanban. Las tres redes son integradas en la línea de producción de cámaras en las fases de tamizado, laminado, estrujado, revestido, montaje y prensado. Estas fases son identificadas en la red principal de la Figura 3, a través de los lugares p19, p20, p21, p22, p23 y p24.

### Red de Petri de un sistema TPM

Uno de los sistemas importantes en que se basa el Kaizen es el TPM. El objetivo del mantenimiento de máquinas y equipos es conseguir un determinado nivel de disponibilidad de producción en condiciones de calidad exigible, a mínimo costo y con la máxima seguridad para el personal que las utiliza [20].

La estructura que se propone representa una operación de manufactura y el comportamiento del sistema cuando ocurre una falla en cualquiera de las máquinas o equipos. Este comportamiento se representa incorporando de manera repetida la estructura que se muestra en la Figura 4 en diferentes etapas dentro del sistema de producción.

Con el objetivo de mostrar la relación que existe entre el sistema y el modelo; observar cómo el disparo de una transición puede representar una operación del sistema; cómo la ejecución de la operación cambia el marcado; y cómo éste refleja el nuevo estado del sistema, se muestran las fases de construcción de la estructura básica de sistema TPM.

La RdP de la Figura 5 corresponde a la ejecución de una operación. Existe una transición al inicio, t1, en espera de ser habilitada externamente, con la generación de una señal para iniciar la operación.



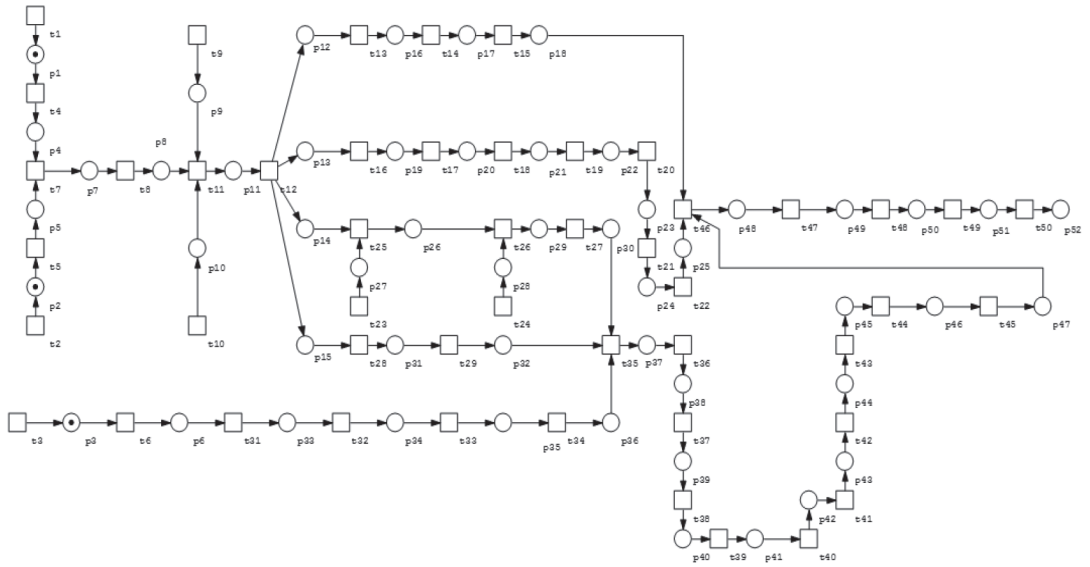


Figura 3. Red de Petri de una planta de producción de neumáticos.

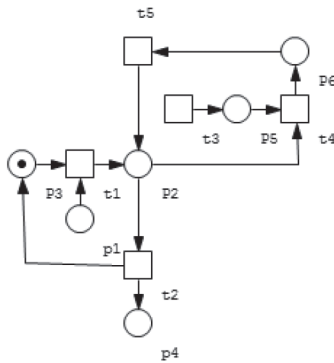


Figura 4. Modelo TPM mediante el uso de redes de Petri.

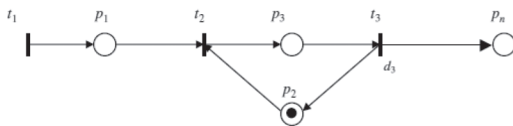


Figura 5. RdP de operación elemental en espera.

Después del disparo de  $t_1$ , el marcaje de la red cambia, como se indica en la Figura 6, al ser ocupado por una marca el lugar  $p_1$ .

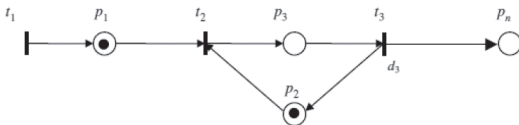


Figura 6. RdP de operación elemental al iniciar.

Es posible entonces que la red evolucione hacia la activación de  $p_3$  (una marca en este lugar), puesto que  $t_2$  está habilitada, ya que también hay una marca en  $p_2$ . Ésta señala la disponibilidad de la máquina para la operación. Entonces, de acuerdo con la regla de disparo, cambia el marcaje de la RdP: las marcas de  $p_1$  y  $p_2$  desaparecen, para aparecer una en  $p_3$ , como se observa en la Figura 7. La ausencia de marca en  $p_2$  indica que ahora la máquina ya no está libre para nuevas solicitudes de operación.

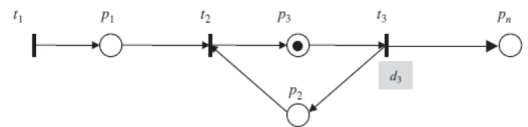


Figura 7. RdP de operación elemental.

El fin de la operación está regido por la temporización ( $d_3$ ) de la transición  $t_3$ . Terminada su duración, desaparece la marca de  $p_3$ , vuelve a aparecer una marca en  $p_2$  (indicando la disponibilidad del recurso) y se genera una marca en el lugar de salida  $p_n$ , como se muestra en la Figura 8. El flujo puede volver a iniciarse en  $t_1$ , para la ejecución de un nuevo ciclo.

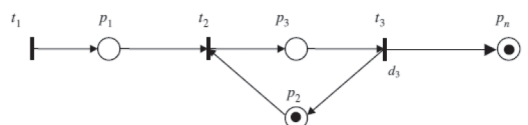


Figura 8. RdP de operación elemental al finalizar.

Para la siguiente fase del ejemplo, se muestra el comportamiento del sistema cuando una falla se presenta en el proceso. Las RdP permiten representar en el sistema la aparición de fallas y la acción de reparación, como se indica a continuación. Se representa el sistema susceptible a fallas de la máquina, mediante la RdP de la Figura 9, en la que el lugar  $p_5$  activo indica que la falla se manifiesta, la transición  $t_5$  indica la ejecución de la reparación, y el lugar  $p_6$  el estado de reparación.

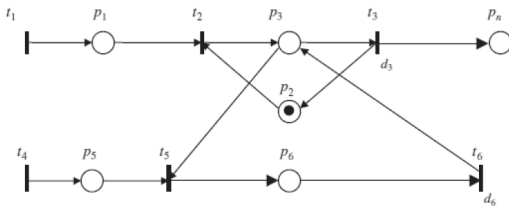


Figura 9. RdP de la operación con falla.

La transición  $t_4$  genera, en un instante determinado, la aparición de la falla. El lugar  $p_5$  se activa con una marca, de modo que en el momento de iniciarse la ejecución de la operación en  $p_3$ , se dispara la transición  $t_5$ . El marcaje de la red cambia entonces, únicamente con una marca en  $p_6$ , como se ilustra en la Figura 10, se representa que la reparación se está llevando a cabo, con una duración de  $d_6$ . Pasado este tiempo, la transición  $t_6$  se dispara y se restablece la fase de operación, en  $p_3$ , para finalizar el ciclo de manera normal, entregando un producto terminado en el lugar  $p_n$ .

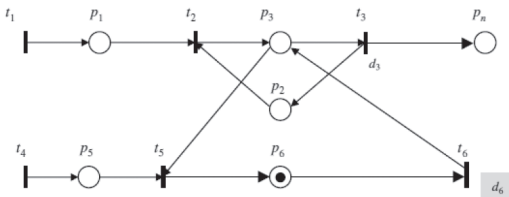


Figura 10. RdP de la operación de la reparación.

### Red de Petri de un sistema SMED

SMED es un concepto el cual introduce la idea de que en general cualquier cambio de máquina o inicialización de proceso debería durar no más de 10 minutos, de ahí la frase *single minute*. Se entiende por cambio de herramientas el tiempo transcurrido desde la fabricación de la última pieza válida de una serie hasta la obtención de la primera pieza correcta de la serie siguiente.

Tabla 2. Lugares y Transiciones de la Red TPM.

Elemento	Descripción
$t_1$	Inicio del programa de producción
$t_2$	Inicio de la operación normal
$t_3$	Término de la operación
$t_4$	Aparición de una falla
$t_5$	Suspensión de la operación
$t_6$	Término de la reparación de máquina
$p_1$	Producción en espera
$p_2$	Máquina disponible
$p_3$	Operación en ejecución
$p_n$	Salida de producción normal
$p_5$	Máquina en falla
$p_6$	Máquina en reparación

La estructura que se propone se muestra en la Figura 11, esta representa el proceso de cambio de un producto en una fase de la línea de manufactura dentro del sistema; cuando se requiere llevar a cabo el cambio, la transición  $t_{11}$  se sensibiliza, para que así la máquina en operación realice el paro y se lleve a cabo la reconfiguración del sistema, el lugar  $p_5$  indica que el proceso de cambios se está llevando a cabo, finalmente la transición  $t_3$  se sensibiliza y el marcaje evoluciona al lugar  $p_6$ , el cual representa e indica que la reconfiguración ha sido llevada a cabo con éxito, de esa forma el sistema comienza la producción de un nuevo producto.

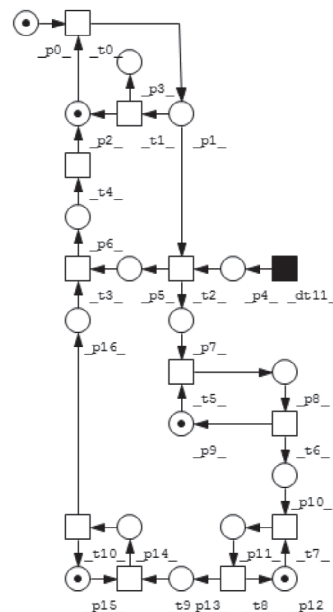


Figura 11. Modelo SMED mediante el uso de redes de Petri.



### Red de Petri de un sistema Kanban

El sistema *pull* es un sistema de comunicación que permite controlar la producción, sincronizar los procesos de manufactura con los requerimientos del cliente y apoyar fuertemente la programación de la producción [21]. En la Figura 12 se propone una estructura que representa un sistema kanban. Se proponen dos tipos, un kanban de retiro identificado por el lugar *p22* y un kanban de producción identificado por los lugares *p19*, *p20* y *p21* [22].

La Figura 12 muestra tres estaciones de trabajo, están conformadas por una operación de maquinado, un depósito de piezas para cada estación y las etapas de flujo de materiales, de manera breve se describe el proceso; cuando existe demanda, se envía una orden de kanban de retiro al almacén, al mismo tiempo se envía una orden de kanban de producción para dar inicio a los procesos de manufactura, en caso de no existir producto en inventario, se envía una orden directamente para comenzar producción al inicio del proceso. La demanda es representada mediante una transición fuente, encargada de generar la demanda de forma aleatoria.

### SIMULACIÓN Y RESULTADOS

El éxito de los paradigmas de producción modernos, tales como producción esbelta, depende en gran medida de la medición precisa y el análisis de los datos de producción.

La validación de la RdP está en función de un indicador de desempeño global, capaz de monitorear y mejorar la efectividad de un proceso productivo. Este indicador es el OEE (*Overall Equipment Effectiveness*).

El OEE es una herramienta de medición de eficiencia en una línea de producción o un equipo, se expresa como un porcentaje del producto de tres parámetros fundamentales de la producción: la disponibilidad, la eficiencia y la calidad, tal como se indica en la ecuación (1).

$$OEE = (\text{Disponibilidad}) \times (\text{Rendimiento}) \times (\text{Calidad}) \quad (1)$$

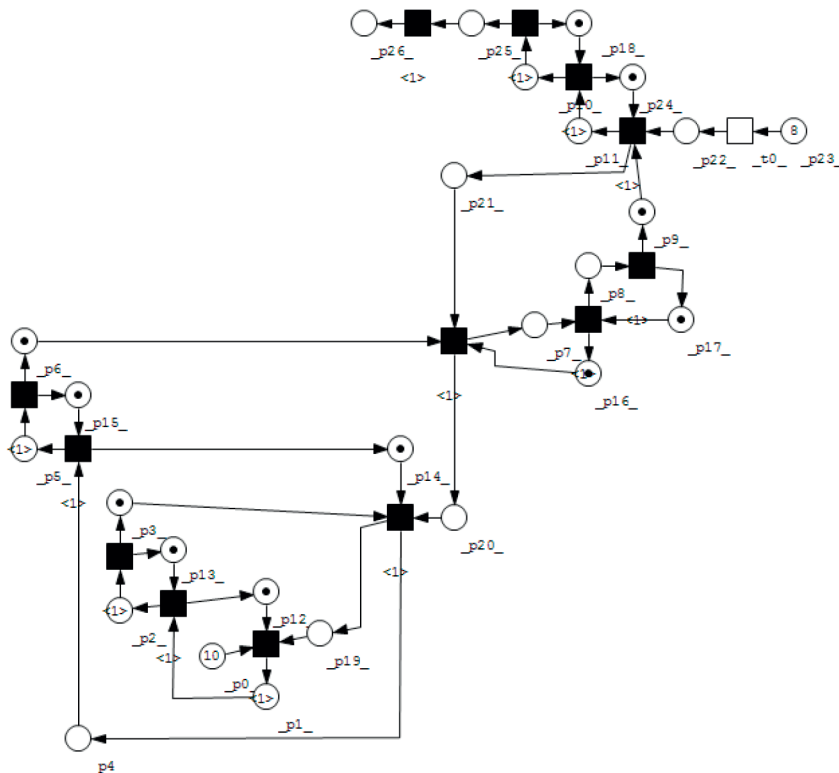


Figura 12. Modelo Kanban mediante el uso de redes de Petri.

La Disponibilidad es la medida como el cociente entre el Tiempo Productivo y el Tiempo Disponible, para un periodo de producción determinado.

El Rendimiento es medido como el cociente entre la Producción Real y la Capacidad Productiva, para un periodo de producción determinado.

La Calidad es medida como el cociente entre la Producción Buena y la Producción Real.

La investigación busca integrar las estructuras desarrolladas a lo largo de todo el sistema productivo. Con el objetivo de ejemplificar cómo se desarrolla el proceso de validación de la red; las tres RdP esbeltas presentadas son integradas en la línea de producción de cámaras. El análisis se lleva a cabo través de un proceso de simulación mediante el uso del software Snoopy, desarrollado por investigadores de la Universidad de Brandeburgo [23]. Las redes expuestas contienen transiciones estocásticas con el objetivo de simular posibles eventos, como son: fallas de equipo y de piezas defectuosas. Por otro lado contienen transiciones temporizadas con el objetivo de simular el tiempo en que los equipos se mantienen sin operar.

A continuación se presenta el cálculo del desempeño de la red haciendo uso del indicador OEE, en el proceso de validación se considera un turno de trabajo de 24 horas, con una capacidad productiva de 2.500 piezas. Las gráficas presentadas se obtienen a través del análisis estocástico de la red de Petri, haciendo uso del módulo redes de Petri híbridas del software Snoopy.

### Disponibilidad en la línea de producción

La disponibilidad se analiza a través de la gráfica de la Figura 13, mediante los lugares d1, d2, d3, d4, d5 y d6, en esta se muestran las paradas que existieron en el proceso, estas debido a factores como: tiempo de arranque y fallas. Los datos que se muestran en la Tabla 3, se obtienen a través del análisis de un conjunto de transiciones temporizadas haciendo uso del software.

Siendo el tiempo productivo en el proceso de 1.410 minutos y el tiempo total de 1.440 minutos, se aplica la ecuación que corresponde al indicador de disponibilidad, a través de esto, se obtiene como resultado un 97,9% de disponibilidad en el equipo.

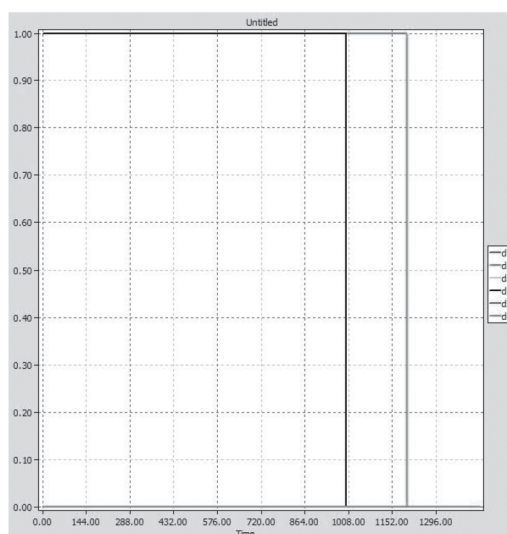


Figura 13. Disponibilidad en el proceso.

$$\text{Disponibilidad} = \frac{\text{Tiempo productivo real}}{\text{Tiempo disponible}} \quad (2)$$

$$\text{Disponibilidad} = 1.410/1.440=0,979$$

Tabla 3. Disponibilidad en máquinas.

Elemento Analizado	Tiempo no activo (minutos)
Máquina 1 (d1)	0
Máquina 2 (d2)	20
Máquina 3 (d3)	0
Máquina 4 (d4)	10
Máquina 5 (d5)	0
Máquina 6 (d6)	0

### Rendimiento en la línea de producción

Posteriormente se analiza el rendimiento, para lo que es importante conocer el ritmo de producción del proceso a través del *takt time*, tiempo para satisfacer la demanda del cliente, desarrollado mediante la aplicación de la ecuación (3).

$$\text{Takt time} = \frac{\text{Tiempo total disponible por día}}{\text{Demanda diaria}} \quad (3)$$

$$\text{Takt time} = (1440 \text{ min}) / (2500 \text{ piezas}) = 0,576 \text{ min/pieza}$$

Conocido el valor takt time y la capacidad de producción que corresponde a 2.500 piezas en 24 horas, la media de producción resulta de 104

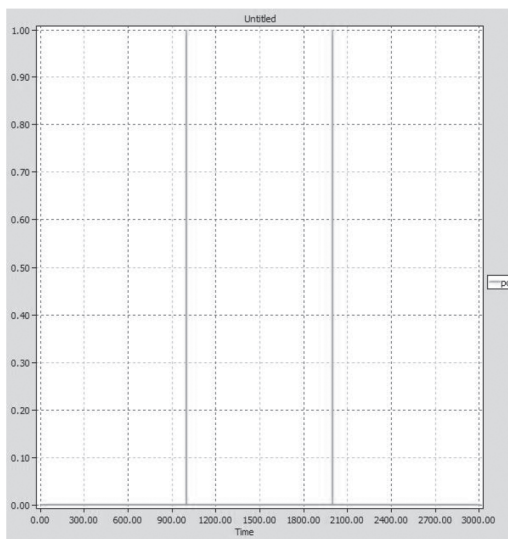


Figura 14. Calidad en el proceso.

piezas/hora. Teniendo el registro de 30 minutos de no disponibilidad durante el proceso, tenemos una producción de real de 2.447 piezas. Aplicando la ecuación (4), se obtiene que el rendimiento corresponde a un 97,8 %.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Producción real}}{\text{Capacidad productiva}} \quad (4)$$

$$\text{Rendimiento} = 2.447 / 2.500 = 0,978$$

#### Calidad en la línea de producción

El siguiente paso es conocer la calidad en el proceso, está la analizamos a través de la gráfica en la Figura 14, mediante el lugar pc, en ellas se muestran que existieron dos piezas con baja calidad; obteniendo un nivel de calidad del 98,88%.

Finalmente la ecuación (5) muestra el valor de OEE obtenido, este corresponde a un 95,55% y su interpretación se lleva a cabo mediante la evaluación propuesta en la teoría OEE, la cual sustenta que la etapa validada, al encontrarse por encima del 95%, se traduce en un proceso de clase mundial.

$$\text{OEE} = (0,979) \times (0,978) \times (0,998) = 0,9555 = 95,55\% \quad (5)$$

Un valor OEE del 100% en la práctica es muy difícil de alcanzar, sin embargo es un parámetro referente para definir sistemáticamente procesos de mejora continua.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la técnica de modelado de sistemas productivos a través de RdP híbridas, con el objetivo de estudiar el comportamiento y apoyar en la toma de decisiones en el orden de mejorar estratégicamente el sistema mediante la integración del paradigma de producción esbelta.

Las RdP, por su naturaleza gráfica y formal, muestran ser una herramienta que permite una descripción fácilmente comprensible de un sistema, para modelar comportamientos que incluyen secuencias, concurrencia, paralelismo y toma de decisiones. Las alternativas de operación en sistemas de producción que pueden ser modeladas a través de ellas son bastante extensas y descriptivas. Un aspecto importante por resaltar es que las RdP gracias a sus propiedades nos permiten tomar en cuenta variables críticas, que a través de otro tipo de modelo podríamos olvidar considerar.

El impacto que tienen las redes de Petri en relación a un sistema productivo esbelto, se da en función de la capacidad que tienen las redes en modelar la complejidad de un sistema de estas características; teniendo la capacidad de representar elementos a través de lugares y eventos a través de transiciones. Las RdP permiten representar los diversos escenarios que se presentan en un sistema productivo; permiten identificar variables críticas, y conocer el comportamiento que conservará el sistema cuando los parámetros de una variable cambian.

Se ha validado una etapa de la RdP a través del indicador OEE y con ello se ha demostrado que la implementación correcta de métodos, herramientas y técnicas esbeltas generan sinergia en el sistema y en función de ello beneficios. La validación a través de tres parámetros fundamentales (disponibilidad, rendimiento y calidad) ayuda a calcular la efectividad productiva mediante un solo indicador y proporciona el detalle de las causas raíz de las pérdidas productivas, siendo éste el punto de partida de la mejora de productividad de la planta.

Es importante destacar que no todas las metodologías, técnicas y herramientas utilizadas en producción esbelta tendrán el mismo éxito al ser implantadas. Esto dependerá en gran medida de diferentes aspectos

de tipo social, económico, cultural, político, factores como son el tipo de industria, y en forma muy particular en cómo se estudie, analice e implemente el paradigma.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, CONACYT, COFAA IPN y al Departamento de Ciencias de Computación de la Universidad de Tecnología de Cottbus por las facilidades brindadas en el uso de software Snoopy Petri nets.

### REFERENCIAS

- [1] E. Jiménez y S. Hernández. "Marco Conceptual de la Cadena de Suministro: Un Nuevo Enfoque Logístico". SCT. México. 2002.
- [2] J.P. van Gigh. "Teoría General de Sistemas". Trillas. México. 2006. ISBN: 9682475899.
- [3] A. Morales, A. Morales y J. Rojas. "Alternativas de Modelos de Cadena de Suministro con Enfoque Sistémico". CNIES. México. 2012.
- [4] C. Chandra and J. Grabis. "Supply Chain Configuration: Concepts, Solutions, and Applications". Springer. New York, USA. 2007. ISBN: 9780387251905.
- [5] L. von Bertalanffy. "Teoría General de los Sistemas". Fondo de Cultura Económico. México. 2006. ISBN: 9789681606275.
- [6] J.R. Stock and D.M. Lambert. "Strategic Logistics Management". McGraw-Hill. Boston. 2001. ISBN: 9780975994900.
- [7] K.E. Maani and R.Y. Cavana. "System Thinking, System Dynamics: Managing Change and Complexity". Pearson Education. New Zealand. 2007. ISBN: 9781877371035.
- [8] W. Ríos. "Ingeniería de Sistemas". Serie Publicaciones Docentes. Universidad de Chile. Chile. 2001.
- [9] SupplyChainCouncil. Supply Chain Operations Reference (SCOR®) Model: Overview. 8 de Abril de 2014. URL: <http://supply-chain.org>
- [10] D.M. Lambert. "Supply Chain Management: Processes, Partnerships, Performance". Supply Chain Management Institute. Florida. 2008. ISBN: 9780975994900.
- [11] J.P. Womack, D.T. Jones and D. Ross. "The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production". Free Press. New York, USA. 2007. ISBN: 9780743299794.
- [12] Y. Juárez, J. Rojas, J. Medina y A. Pérez. "El Enfoque de Sistemas para la Aplicación de la Manufactura Esbelta". Científica ESIME. Vol. 15, pp. 35-42. 2011.
- [13] L. Socconini. "Lean Manufacturing". Norma. Mexico. 2008. ISBN: 9789700919324.
- [14] A. Villaseñor y E. Galindo. "Manual de Lean Manufacturing". Limusa. México. 2009. ISBN: 9789681869755.
- [15] J. Magalhaes. "Los 7 Desperdicios de la Manufactura Esbelta". Sistemas de Producción y Manufactura Esbelta. 2010.
- [16] R. David and H. Alla. "Petri Nets for Modeling of Dynamic Systems: A Survey". Automática. Vol. 30, pp. 175-202. 1994.
- [17] M. Silva. "Las Redes de Petri en la Automática y la Informática". Editorial AC. Madrid. 2002. ISBN: 9788472880450.
- [18] V. Padmavathimetta. "Modelling y Simulation of SNP Systems Using Petri Nets". PhD Computer Science and Engineering, Thapar University. Patiala, India. 2012.
- [19] R. David and H. Alla. "Discrete, continuous and Hybrid Petri Nets". Heidelberg: Springer. Berlín, Alemania. 2010. DOI:10.1142/S0218126698000079.
- [20] A. Casanova and L. Cuatrecasas. "Lean Supply Chain Management". Profit. Barcelona, España. 2011. ISBN: 9788415330516.
- [21] Y. Sugimori, K. Kusunoki, F. Cho and S. Uchikawa. "Toyota Production System and Kanban System Materialization of Just in Time and Respect for Human System". International Journal of Production Research. Vol. 15, pp. 553-564. 2007. DOI: 10.1080/00207547708943149.
- [22] P. Thomas, A. Thomas and S. Belmokhtar. "Petri Net Control of a Kanban Loop". International Conference on Industrial Engineering and Systems Management. 2011.
- [23] M. Heiner, M. Herajy, F. Liu, C. Rohr and M. Schwarick. "Snoopy: A Unifying Petri Net Tool". Applications and Theory of Petri Nets. Vol. 7347, pp. 398-407. 2012. DOI: 10.1007/978364231131422.
- [24] I. Flores, J. Figueras, A. Guasch, M.A. Mújica, M. Narciso y M.A. Piera. "Modelos de Simulación usando Simo y Redes de Petri". UNAM. Facultad de Ingeniería. México. 2013. ISBN: 9786070246890.

## ANEXO 1

Tabla 4. Lugares y Transiciones de la Red Total.

Lugar	Función	Transición	Función
p1	Suministro	t1	Transición Fuente
p2	Suministro	t2	Transición Fuente
p3	Suministro	t3	Transición Fuente
p4	Materia Prima: Caucho Natural	t4	Inicio de Suministro de Materia Prima 1
p5	Materia Prima: Caucho Sintético	t5	Inicio de Suministro de Materia Prima 2
p6	Materia Prima: Cordones de Nylon	t6	Inicio de Suministro de Materia Prima 3
p7	Corte del Fardo	t7	Inicio de Operación p7
p8	Laminado	t8	Fin de Operación p7 Inicio de Operación p8
p9	Materia Prima: Químicos Azufres	t9	Transición Fuente
p10	Materia Prima: Carbón Negro	t10	Transición Fuente
p11	Mezcla Intensiva	t11	Inicio de Mezcla Intensiva
p12	Transporte a Estrujado de Alerón	t12	Fin de Mezcla Intensiva Orden de Transporte a Línea de Ensamble Final
p13	Transporte a Tamizado	t13	Inicio Operación p16
p14	Transporte a Producción de Listones	t14	Fin de Operación p16 Inicio de Operación p17
p15	Transporte a Estrujado de Llanta	t15	Fin de Operación p17 Transporte p18
p16	Estrujado Alerón	t16	Inicio Operación p19
p17	Prensado	t17	Fin de Operación p19 Inicio de Operación p20
p18	Producto Terminado: Alerón	t18	Fin de Operación p20 Inicio de Operación p21
p19	Tamizado	t19	Fin de Operación p21 Inicio de Operación p22
p20	Laminado	t20	Fin de Operación p22 Inicio de Operación p23
p21	Estrujado	t21	Fin de Operación p23 Inicio de Operación p24
p22	Revestido	t22	Fin de Operación p24 Orden de Transporte a Línea de Ensamble Final
p23	Montaje	t23	Transición Fuente
p24	Prensado	t24	Transición Fuente
p25	Producto Terminado: Cámaras	t25	Inicio Operación p26
p26	Producción de Listones	t26	Fin de Operación p26 Inicio de Operación p29
p27	Materia Prima: Alambre	t27	Fin de Operación p29 Orden de Transporte a Línea de Ensamble de Llanta
p28	Materia Prima: Cordones	t28	Inicio Operación p31
p29	Envoltura	t29	Fin de Operación p31 Inicio de Operación p32
p30	Producto Terminado: Listones de Alambre	t30	Fin de Operación p32 Orden de Transporte a Línea de Ensamble de Llanta
p31	Estrujado	t31	Inicio Operación p33
p32	Bandas de Llanta	t32	Fin de Operación p33 Inicio de Operación p34
p33	Calandrado	t33	Fin de Operación p34 Inicio de Operación p35
p34	Corte	t34	Fin de Operación p35 Inicio de Operación p36
p35	Bobinado	t35	Fin de Operación p36 Orden de Transporte a Línea de Ensamble de Llanta Inicio Operación p37
p36	Cordones de Llanta	t36	Inicio Operación p38
p37	Construcción de la Llanta	t37	Fin de Operación p38 Inicio de Operación p39
p38	Proceso Llanta Verde	t38	Fin de Operación p39 Inicio de Operación p40
p39	Apertura	t39	Fin de Operación p40 Inicio de Operación p41
p40	Esparcido de Polvo	t40	Fin de Operación p41 Inicio de Operación p42
p41	Bladder	t41	Fin de Operación p42 Inicio de Operación p43

Lugar	Función	Transición	Función
p42	Prensa de Curado	t42	Fin de Operación p43 Inicio de Operación p44
p43	Inflado	t43	Fin de Operación p44 Inicio de Operación p45
p44	Recorte	t44	Fin de Operación p45 Inicio de Operación p46
p45	Balanceo	t45	Fin de Operación p46 Orden de Transporte a Línea de Ensamble Final
p46	Inspección	t46	Ensamble de Componentes p18, p25 y p47
p47	Producto Terminado: Llanta	t47	Fin de Operación p48
p48	Ensamble de los 3 Componentes Principales	t48	Orden de Transporte a Almacén
p49	Transporte de Producto Terminado	t49	Orden de Distribución
p50	Almacén	t50	Obtención del Producto por un Cliente Final
p51	Distribución	t51	Inicio de Operación en MH1 Condición del sensor $\pi 1$
p52	Cliente Final	t52	Fin de Operación en MH1 Almacenaje de pieza en Alm 1.
p53	Materia Prima	t53	Regreso del Manipulador a Posición Inicial Avance a la Siguiente Etapa del Proceso Detección de Inventario
p54	Proceso 1: Revestido	t54	Toma de pieza de Alm1 Inicio de Operación en MH2
p55	Almacén 1	t55	Fin de Operación en MH2 Almacenaje de pieza en Alm 2
p56	Proceso 2: Montaje	t56	Regreso del Manipulador a Posición Inicial Avance a la Siguiente Etapa del Proceso Detección de Inventario
p57	Almacén 2	t57	Toma de pieza de Alm2 Inicio de Operación en MH3
p58	Proceso 3: Prensado	t58	Fin de Operación en MH3
p59	Producto terminado: Cámaras	t59	Condición del sensor $\pi 2$ Avance a la Siguiente Etapa del Proceso
p60	Máquina 1 Disponible	t60	Transición Fuente: Generador de Fallas Indicador de Falla en MH1
p61	Espacio en Almacén 1	t61	Transición Fuente: Generador de Fallas Indicador de Falla en MH2
p62	Máquina 2 Disponible	t62	Transición Fuente: Generador de Fallas Indicador de Falla en MH3
p63	Espacio en Almacén 2	t63	Inicio de Reparación en MH1
p64	Máquina 3 Disponible	t64	Fin de Reparación en MH1 Restablecimiento del Sistema en MH1
p65	Robot Disponible	t65	Inicio de Reparación en MH2
p66	Procesamiento de Falla	t66	Fin de Reparación en MH2 Restablecimiento del Sistema en MH2
p67	Operación de Reparación de MH1	t67	Inicio de Reparación en MH3
p68	Procesamiento de Falla	t68	Fin de Reparación en MH3 Restablecimiento del Sistema en MH3
p69	Operación de Reparación de MH2	t69	Señal de Estado de Producción
p70	Procesamiento de Falla	t70	Transición Fuente: Generador de Fallas
p71	Operación de Reparación de MH3	t71	Transición Fuente: Generador de Fallas
p72	Inspección Operación 1	t72	Transición Fuente: Generador de Fallas
p73	Inspección Operación 2	t73	Inicio de Inspección Operación 1
p74	Inspección Operación 3	t74	Inicio de Inspección Operación 2
p75	Control Visual Falla 1	t75	Inicio de Inspección Operación 3
p76	Control Visual Falla 2	t76	Orden de Retiro del Proceso
p77	Control Visual Falla 3	t77	Orden de Kanban de Producción Inicio de Operación de Manufactura
p78	Indicador de Flujo: Pieza en MH1	t78	Fin de Operación de Manufactura Orden de Movimiento
p79	Indicador de Flujo: Pieza en MH2	t79	Llegada a Almacén
p80	Indicador de Flujo: Pieza en MH3	t80	Orden de Kanban de Producción Inicio de Operación de Manufactura
p81	Indicador Visual de Producción	t81	Fin de Operación de Manufactura Orden de Movimiento
p82	Reporte de Calidad en Operación 1	t82	Llegada a Almacén
p83	Reporte de Calidad en Operación 2	t83	Orden de Kanban de Producción Inicio de Operación de Manufactura



Lugar	Función	Transición	Función
p84	Reporte de Calidad en Operación 3	t84	Fin de Operación de Manufactura Orden de Movimiento
p85	Depósito de Piezas Rechazadas	t85	Llegada a Almacén
p86	Control Visual Mala Calidad 1	t86	Orden de Kanban de Retiro Inicio de Operación de Manufactura
p87	Control Visual Mala Calidad 2	t87	Fin de Operación de Manufactura Orden de Distribución
p88	Control Visual Mala Calidad 3	t88	Llegada de Producto a Cliente
p89	Almacén	t89	Transición Fuente: Generador de Demanda
p90	Operación de Manufactura	t90	Orden de Kanban de Retiro
p91	Máquina Disponible	t91	
p92	Flujo de Material	p103	Transporte Disponible
p93	Transporte Disponible	p104	Inventario
p94	Inventario	p105	Flujo de Material
p95	Operación de Manufactura	p106	Transporte Disponible
p96	Máquina Disponible	p107	Distribución
p97	Flujo de Material	p108	Cliente
p98	Transporte Disponible	p109	Registro de Demanda
p99	Inventario	p110	Kanban de Producción
p100	Operación de Manufactura	p111	Kanban de Producción
p101	Máquina Disponible	p112	Kanban de Producción
p102	Flujo de Material	p113	Kanban de Retiro