

# Reducción del desperdicio «espera» en líneas de ensamble mediante el uso de heurísticas y escenarios de simulación



## WAITING WASTE REDUCTION IN ASSEMBLY LINES USING HEURISTICS AND SIMULATION SCENARIOS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5833> | Recibido: 07/05/2013 • Aceptado: 10/06/2013

José Alfredo Jiménez-García<sup>1</sup>, Javier Yáñez-Mendiola<sup>2</sup>,  
 José Martín Medina-Flores<sup>2</sup>, Efrén Mezura-Montes<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Guanajuato. Avda. Universidad Norte, s/n - 38483 Cortazar, Gto. (México). Tfno: +01 461 4414307. [jjimenez@upgto.edu.mx](mailto:jjimenez@upgto.edu.mx)

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Celaya. Dpto. Ingeniería Industrial. Avda. Tecnológico y A. García Cubas, s/n - 38010 Celaya, Gto. (México). Tfno: +01 461 611 75 75

<sup>3</sup> CIATEC (PICYT. Programa Interinstitucional en Ciencia y Tecnología). Omega #201 Industrial Delta - 37545 León de los Aldama, Gto. (México). Tfno: +01 477 7100011

<sup>4</sup> Universidad Veracruzana. Dpto. de Inteligencia Artificial. Sebastián Camacho #5, Centro - 91000 Jalapa Ver. (México). Tfno: +52 228 8172957

### ABSTRACT

• In this paper we propose a methodology based on clusterizations, simulation and a heuristic assignment with the purpose of identifying forklift drivers which will send materials from the various storages throughout the production cells and thereby reduce waiting times due to material shortages in manufacturing plants that operate under Lean Manufacturing philosophy. Several clusters were compared, which were, obtained through empirical methods, hierarchical clustering methods and the Hungarian method.

To implement and validate the proposed methodology, a simulation model was used, representing the production system for constant velocity joints, which consists of stores, productive cells and forklift drivers to send materials. In this model the performance of each of the clusters was tested and the loss percentage due to material shortage in each cell was calculated, depending on the cluster. Through the proposed methodology was possible to analyze the performance of different clustering strategies and determine which one is more efficient without the need of compromising business productivity.

• Key Words: simulation, clusters, waiting period due to material shortage, Lean Manufacturing.

### RESUMEN

En este trabajo se propone una metodología basada en clústeres, simulación y una heurística de asignación con la finalidad de identificar carretilleros encargados de entregar materiales desde los distintos almacenes hacia las células de producción y con esto reducir los tiempos de espera por falta de suministro en plantas manufactureras que operan bajo la filosofía de *Lean Manufacturing*. Se compararon varios clústeres, obtenidos mediante métodos empíricos, el método de análisis clúster jerárquico y el método Húngaro.

Para implementar y validar la metodología propuesta se utilizó un modelo de simulación, representativo de un sistema de fabricación de transmisiones homocinéticas para vehículos, el cual consta de almacenes, células de producción y carretilleros encargados del suministro materiales. En el modelo de simulación se puso a prueba el funcionamiento de cada uno de los clústeres y se calcularon los porcentajes de esperas por falta de suministro en cada célula.

Mediante la metodología propuesta fue posible analizar el funcionamiento de diferentes estrategias para formar clústeres y determinar cuál de ellas es más eficiente sin tener la necesidad de poner en riesgo la productividad de la empresa.

**Palabras Clave:** simulación, clústeres, esperas por falta de suministro, Lean Manufacturing.

### 1. INTRODUCCIÓN

El *Lean Manufacturing* es una de las iniciativas que gran cantidad de las principales industrias manufactureras de todo el mundo tratan de adoptar con el fin de seguir siendo competitivas [1]. De acuerdo con Shah se identifican 22 prácticas “lean” que se pueden clasificar en 4 categorías como son Justo a Tiempo (JIT, por sus siglas en inglés), Gestión de la Calidad, Mantenimiento Productivo y Gestión de Recursos Humanos. Dichas prácticas están asociadas con un mejor rendimiento en la fabricación, las empresas que no las implementan, están en desventaja con relación con las empresas que sí lo hacen [2].

Por otra parte Cusumano menciona que la filosofía del *Lean Manufacturing* presenta ciertas limitaciones como son la necesidad de producir lotes pequeños y entregas frecuentes de materiales [3]. Sin embargo, se ha demostrado que aplicando herramientas de *Lean Manufacturing* es posible eliminar desperdicios como son: inventarios, transportes, esperas, sobreproducción, reprocesos y movimientos. [4]. Dos formas importantes de estos desperdicios

son una excesiva obra en curso (WIP por sus siglas en inglés) y los atrasos innecesarios en tiempo de flujo. Estos desperdicios se pueden reducir aplicando técnicas de flujo de producción definidas dentro de la categoría JIT [1,2]. Cuando se aplican las técnicas de flujo mencionadas no se pone atención a un efecto secundario que se manifiesta al intentar reducir cada vez más los tamaños de lote, la obra en curso y los tiempos de cambio de utillajes. En este trabajo se consideran dichos efectos, los cuales se presentan cuando las células se quedan sin material por falta de suministro, una vez que se termina el cambio de utillajes. Para que las células puedan trabajar, todos los materiales deben ser entregados justo a tiempo, o de lo contrario, la célula detendrá su flujo de producción debido a la falta de suministro. Se tiene evidencia de un trabajo donde se propone un novedoso esquema de suministro consistente en entregar los materiales cuando se está realizando el cambio de utillajes, justo en el momento en que se necesitan con la finalidad de reducir al mínimo la cantidad de obra en curso [5].

Ohlmann destaca la importancia de realizar proyectos relacionados con el Lean Manufacturing y propone la solución del cálculo de rutas de vehículos con ventana temporal (VRPTW, por sus siglas en inglés) en una empresa que opera bajo principios "lean". En su trabajo considera una red de suministro donde se recogen materiales y se entregan a un conjunto de depósitos que siguen esos principios, siendo el objetivo mantener el WIP lo más bajo posible y una producción nivelada. El problema lo resuelve mediante una estrategia de dos fases, en la primera establece un plan de rutas donde establece la frecuencia de visita de los vehículos proveedores y sus rutas y en la segunda fase define el momento exacto de la visita para mantener un programa nivelado [6].

En relación al trabajo que se presenta en esta investigación, hasta donde llega el conocimiento de los autores, no se tiene evidencia de trabajo similar, aunque se tiene cierta similitud con el problema del cálculo de rutas de vehículos, ya que los carretilleros deben tomar materiales de los distintos almacenes para entregarlos a los clientes (células de producción). En este trabajo todos los elementos se ubican dentro de la misma planta. Dada la complejidad que genera el hecho de tener  $n$  almacenes,  $r$  carretilleros y  $c$  células, se propone que los carretilleros encargados de la entrega de materiales se limiten a entregarlos sólo a las células a las que fueron asignados, a lo que denominamos *clúster*, lo que reduce el número de combinaciones posibles que existe para entregar los materiales.

Existen diferentes métodos para la obtención de un *clúster*: Jain realizó un análisis exhaustivo de los diferentes métodos [7], Bhattacharyya realizó un trabajo para clusterizar considerando diferentes números de datos [8], Goldelberbeg propuso un método de clusterización jerárquica para agrupamiento de datos basado en el método Húngaro, donde se podía definir con anticipación el número de clústeres [9]. El método Húngaro fue propuesto originalmente Kuhn en 1955, los pasos para su aplicación se pueden encontrar en [10] y se ha aplicado exitosamente a problemas relacionados con la asignación de recursos [11,12]. Los resultados de las asignaciones pueden someterse a modelos de simulación, para validar su funcionamiento. Actualmente la aplicación de simulación es parte clave en la toma de decisiones [13]. En proyectos relacionados con Lean Manufacturing se recomienda aplicar simulación antes

de tomar las decisiones, pues con ello se han logrado buenos resultados [14-15]. En este trabajo se propone aplicar diferentes estrategias de clusterización y analizar su funcionamiento en un modelo de simulación para solucionar uno de los efectos secundarios al implementar el Lean Manufacturing y que en la literatura especializada no ha sido atendido, como lo es la *espera por falta de suministro de material*. La aportación de este trabajo es una metodología que integra diferentes herramientas como son simulación y diferentes métodos de clusterización para resolver el problema de suministro de materiales en empresas que operan en ambientes de Lean Manufacturing.

## 2. METODOLOGÍA

El presente trabajo propone un método que servirá para analizar la conveniencia de realizar abastecimiento de materiales aplicando diferentes métodos de *clusterización*. A continuación se plantean las etapas de la metodología propuesta, más adelante se pone en práctica en una situación real:

Etapas 1. Definición del problema.

Etapas 2. Elaboración del VSM de la planta.

Etapas 3. Construcción del modelo de simulación del sistema real.

Etapas 3.1 Verificación del modelo de simulación.

Etapas 3.2 Validación del modelo de simulación.

Etapas 3.3 Determinación del periodo *warm-up*.

Etapas 4. Definir clústeres mediante métodos diferentes.

Etapas 5. Someter cada uno de los clústeres en el modelo de simulación y medir su funcionamiento.

### 2.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA A RESOLVER

Se tienen  $n$  almacenes de donde se toman los materiales, se tienen  $c$  células de producción cada una de ellas encargadas de producir una familia de productos, se tienen  $r$  carretilleros encargados de tomar materiales de los diferentes almacenes y transportarlos hacia la célula de producción que lo requiera. Cada célula de producción tiene cierto programa que hay que cumplir, dicho programa se encuentra registrado en la caja *heijunka*. En el vocabulario del *Toyota Production System* para un sistema productivo, *heijunka* significa nivelación de la producción, que en la práctica sugiere producir pequeñas cantidades de todos los modelos de productos [6]. Todos los materiales deben de estar en el momento justo de iniciar la producción del modelo de cierto producto de acuerdo a su pro-

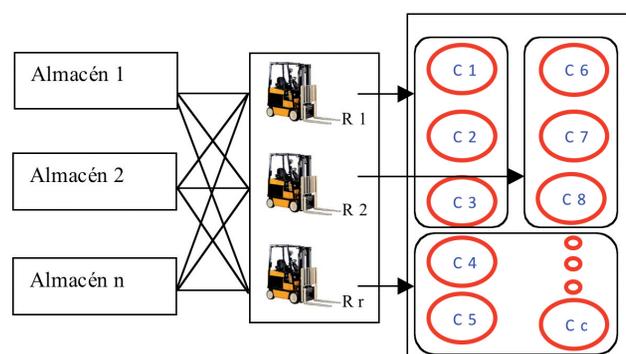


Fig. 1: Esquema de abastecimiento de materiales con  $n$  almacenes,  $r$  carretilleros y  $c$  células

gramación y después del cambio de modelo de producto. Si hace falta un material, la célula quedara en espera por falta de suministro de materiales. El problema consiste en encontrar el *clúster* (conjunto de células a suministrar por cada carretillero) que minimice las esperas por falta de suministro. Para su entendimiento ver Fig.1.

**2.2. MAPA DEL FLUJO DE VALOR**

El mapa del flujo de valor (VSM, por sus siglas en inglés) es una colección de todas las actividades que agregan y que no agregan valor que requiere un producto (o un grupo de productos que usan los mismos recursos) a través de los flujos principales, empezando desde la materia prima y terminando con el cliente. El VSM contribuye en gran medida a reducir el tiempo de entrega y el WIP [1], se construye con la finalidad de detectar áreas de oportunidad para eliminar desperdicios. En la metodología servirá para identificar y destacar las áreas de oportunidad en busca de mejorar el flujo del producto y reducir las esperas por falta de suministro.

**2.3. MODELO DE SIMULACIÓN**

Un modelo de simulación permite poner en práctica cada uno de los experimentos, en este caso cada experimento consiste en la definición de un escenario que a su vez consiste en una asignación que está compuesta por diferentes *clústers*. La simulación es una poderosa herramienta que sirve para analizar el comportamiento de sistemas en diferentes circunstancias, identificando posibles cambios y sus consecuencias [13]. Para asegurar el éxito en la implementación de proyectos relacionados con el *Lean Manufacturing*, Grimard y Standridge recomiendan hacer uso de la simulación antes de implementar los cambios propuestos [14, 15]. Para la construcción del modelo de simulación se recomiendan los pasos propuestos por Harrell [16]. En relación a la verificación y validación, Sargent presenta un conjunto de técnicas que se adaptan a diferentes tipos de sistemas [17]. En la construcción del modelo de simulación, se utilizó el *software Promodel*, debido a su gran capacidad para simular sistemas de producción discretos. Sin embargo pueden usarse otro *software* que cumple el mismo propósito como son *Arena, Quest, Taylor, etc.*

**2.4. MÉTODO HUNGARO DE ASIGNACIÓN**

El método Húngaro es una heurística que fue propuesta originalmente por Kuhn en 1955 cuyo propósito es resolver

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ se asigna a } j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

$$\text{sa: } \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad \forall(i, j)$$

(1)

el problema de asignación [10-12]. El problema de asignación que se menciona en este trabajo se puede expresar matemáticamente como se muestra en la Ec. (1).

Dónde:  $x_{ij}$  es la asignación del carretillero  $i$  a la célula  $j$ ,  $c_{ij}$  es el porcentaje de espera por falta de suministro al asignar el carretillero  $i$  a la célula  $j$ . La función objetivo nos indica la suma de los porcentajes de las esperas por falta de suministro en todas las células; en otras palabras, el objetivo es minimizar el porcentaje de tiempo que duran las células paradas debido a la falta de suministro. La restricción 1 asegura que solo un carretillero sea asignado a una célula y la segunda restricción asegura que solo una célula sea asignada a un carretillero. Para la solución del problema de asignación mediante el método Húngaro se utilizó el software de investigación operativa *Win QSB*.

**2.5. CLUSTERIZACIONES**

El análisis de *clúster* (agrupación) es la colección de un grupo de patrones basados en su similitud. Se propone realizar un análisis de clúster jerárquico (ACJ), ya que es una herramienta exploratoria diseñada para definir las agrupaciones naturales (conglomerados o clústeres) dentro de un conjunto de datos. Es el más útil cuando se desea agrupar un número pequeño de objetos. El criterio básico para cualquier agrupación es la distancia. Los objetos que estén cerca uno del otro pertenecerían al mismo conglomerado o clúster, y los objetos que estén lejos uno del otro pertenecerán a distintos clústeres [7, 9]. La distancia entre células, será el criterio para definir los clúster mediante ACJ, de manera que pertenecerán al mismo clúster las células que se encuentren lo más cercanas entre sí.

Adicional al ACJ, se propone aplicar el método Húngaro de asignación para definir un clúster y además se permitirá la participación de personal experimentado conocedor del sistema para plantear diferentes clústeres, tomando como criterio su propia experiencia.

**3. RESULTADOS**

La metodología propuesta se aplicó a una empresa dedicada a la fabricación de transmisiones homocinéticas para el sector de la automoción de diferentes marcas tales como Ford, VW, Nissan, Hyundai, GM, entre otras. Dicha empresa cuenta con tres almacenes, denominados Mecanizados, Misceláneos y Plásticos. Además cuenta con 4 carretilleros, encargados de tomar los materiales de los almacenes y entregarlos a las células de producción. Se cuenta con 20 células de producción, aunque solo se programan 16, dependiendo de la demanda de los clientes. A continuación se desarrolla cada una de las etapas:

*Etapas.* **Definir problema.** El problema consiste en definir las agrupaciones de células (clústeres) a las que les dará servicio el carretillero 1, el carretillero 2, el carretillero 3 y el carretillero 4, de tal manera que todas sean atendidas y que el tiempo de espera por falta de suministro sea mínimo o cercano al mínimo, respetando las restricciones dadas por un programa nivelado de producción (registrado en la caja *heijunka*) y manteniendo al mínimo el WIP.

*Etapa 2. Elaboración del VSM de la planta.* Para la construcción del VSM, se tomó papel y lápiz y se realizó un recorrido de puerta a puerta, desde la recepción de materiales hasta el almacén de los productos terminados [18]. El VSM estado actual de la empresa, se puede observar en Fig.2, donde se identifican mediante el símbolo “explosiones-kaizen” las actividades necesarias para poder alcanzar el estado futuro. El VSM estado futuro se observa en la Fig.3.

*Etapa 3. Construcción del modelo de simulación del sistema real.* En la Fig.4 se puede observar el layout del modelo de simulación construido con el software *Promodel*. Las características del modelo conceptual son las siguientes: se tienen tres almacenes, cuyos nombres asignados por la empresa son Mecanizados, Misceláneos y Plásticos, en los que se ubican los componentes del ensamblado según su tipo y características. Los carretilleros deben tomar los materiales en el momento que se necesitan, justo cuando se está llevando a cabo el cambio de modelo y entregarlos en la célula que fue asignado, esto con el fin de reducir el WIP, y además llevan el lote de producto terminado al área nombrada *safe launch* para ser inspeccionado. Es ahí donde termina su trabajo.

Cuando la célula de producción termina un cambio de utillajes y le suministraron las partes necesarias para producir el lote que tiene programado en la caja *heijunka*, puede iniciar su producción. Sin embargo si hace falta cualquier material, ya sea mecanizados, misceláneos o plásticos, entonces la célula

estará en espera por falta de suministro. El modelo de simulación construido con el software *Promodel*, permite correr los escenarios sugeridos. Cada escenario consiste en una asignación, en total se proponen 6 diferentes. Cuatro asignaciones son los clústeres sugeridos por los supervisores de la empresa, una asignación es la obtenida por el método ACJ y una más es el obtenido por la heurística del método Húngaro.

Dentro de cada asignación se definen cuatro clústeres, debido a que son cuatro los carretilleros que han de ser asignados a las células. El modelo de simulación permitirá determinar cuál será el funcionamiento de la célula sin tener que probarlo en el sistema real [13-15].

*Etapa 3.1 Verificación del modelo de simulación.* Verificación es determinar si el modelo funciona como se tiene previsto [16]. Se aplicó una técnica de depuración que el mismo software *Promodel* ofrece. En la Fig.5 se presenta una imagen del depurador del software, destacando el error, el cual indica que hace falta definir la salida de la entidad denominada *BATCHE\_L12*. La verificación se realizó al tiempo de construcción del modelo y cada vez que se le agregaban elementos se realizaba una corrida para depurarlo.

*Etapa 3.2 Validación del modelo de simulación.* La validación es determinar si el modelo de simulación es una representación significativa y exacta del sistema real [16]. Se aplicaron algunas técnicas sugeridas por Harrell y Sargent [16-17] tales como animación y validación con datos históricos. La animación consiste en darle seguimiento a las partes mientras

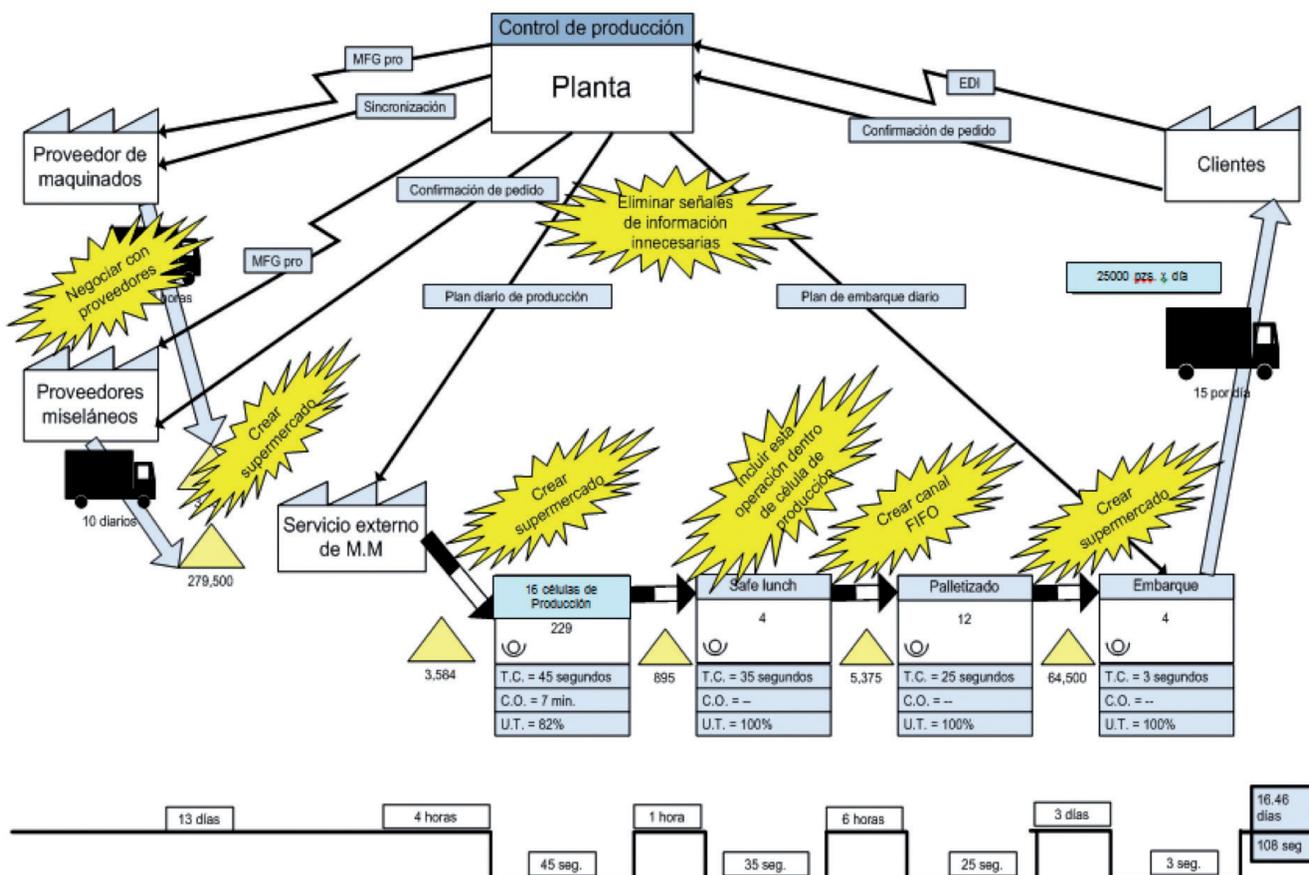


Fig. 2: VSM estado actual y sus “explosiones kaizen”

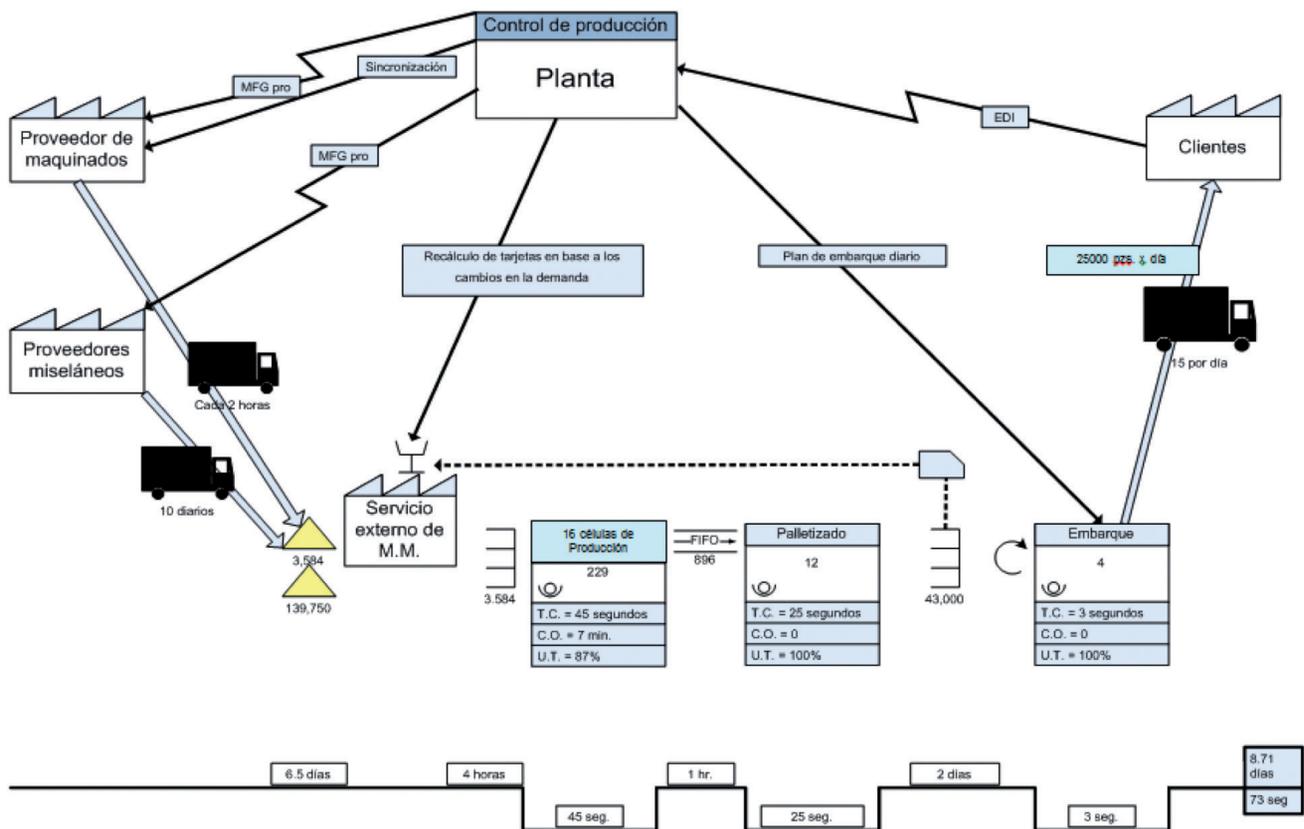


Fig. 3: VSM estado futuro

se ejecuta la simulación. La validación con datos históricos consiste en utilizar los mismos datos recolectados para construir el modelo de simulación y compararlos contra las salidas del modelo conceptual. Los parámetros más importantes que se cotejaron fueron los tiempos de cambio de utillajes, los productos terminados y las esperas por falta de suministro.

Con relación a la animación, se corrió el modelo, se ob-

servaron los movimientos de los carretilleros y se validó que efectivamente suministran materiales a la célula que fue asignado y que los movimientos realizados por el mismo fueran lógicos dentro del modelo. También se validó que entregaran todas las partes que la célula necesita, y nos aseguramos que las células realicen los ensambles una vez que tienen todas las partes que componen la transmisión homocinética.

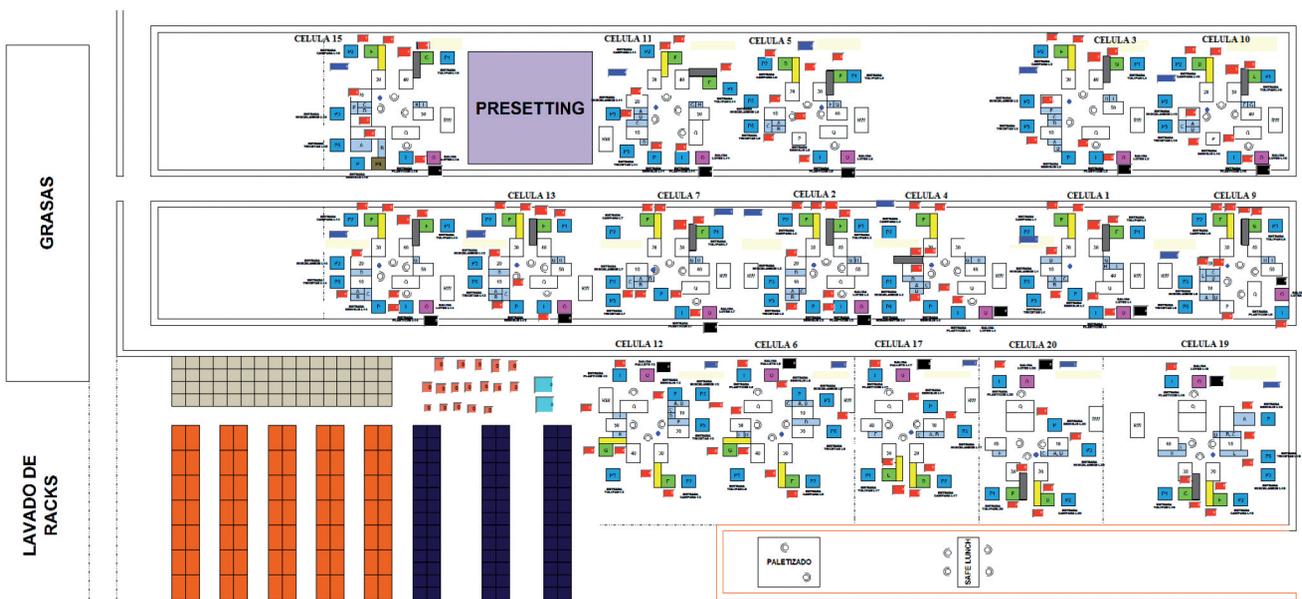


Fig. 4: Modelo de simulación con el software Promodel

Con respecto a la validación con datos históricos, se realizó una comparación de datos proporcionados por la empresa, de acuerdo al funcionamiento del sistema real. Estos valores se compararon contra el intervalo de 95% de confianza obtenido por los resultados de 15 réplicas simuladas. Los resultados se encuentran en la Tabla 1, donde se puede apreciar que el valor del funcionamiento del sistema real, cae dentro del intervalo de confianza, lo que indica que el modelo de simulación tiene un comportamiento estadísticamente semejante al sistema real.

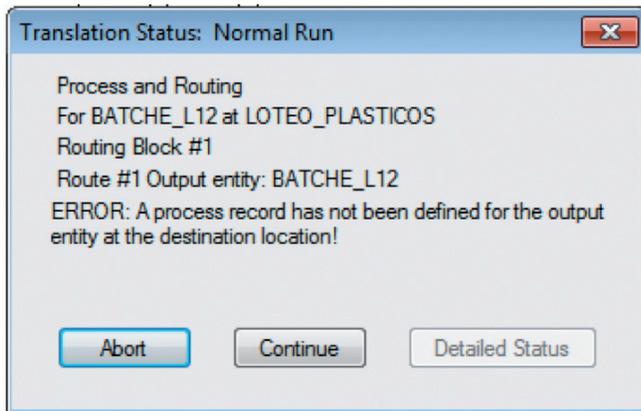


Fig. 5: Verificación mediante depurador del software Promodel

*Etapa 3.3 Determinación del periodo warm-up.* Debido a que se tiene un repentino inicio de la simulación, el desempeño del sistema simulado no es representativo del correspondiente sistema real tanto no haya alcanzado su régimen estable. Por consiguiente los datos obtenidos durante el periodo inicial de operación deben excluirse del análisis. Esto se logra definiendo un periodo de warm-up [16].

En este problema, la simulación inicia con un sistema vacío, se estabiliza en el momento en que todas las células han recibido al menos el suministro del primer lote de materiales para iniciar su operación. Una vez que todas las células han sido suministradas por primera vez, se determina que el sistema se encuentra en estado estable. Por esta situación se corrieron 15 réplicas iniciales, para determinar el tiempo en el que todas las células han sido suministradas y han podido iniciar operaciones. En el modelo de simulación se definió una variable que cuenta desde 0 hasta 16, donde 0 indica que ninguna célula ha iniciado operaciones y el 16 indica que todas las células han iniciado el ensamble de al menos el primer lote. Una vez que la variable indica 16, el sistema operará en estado estable. A continuación en la Fig.6, se muestran 15 tiempos en valores mínimos en los que el sistema ha alcanzado su estado estable. El valor mayor de los mínimos es 17.431,8 segundos (290,53 minutos o 4,84 horas); de esta manera se establece

CELULA	CAMBIO DE MODELO		PRODUCCIÓN		ESPERAS POR FALTA DE SUMINISTRO	
	PROMEDIO DE TIEMPO DE CAMBIO DE UTILAJES DEL SISTEMA REAL (Minutos)	INTERVALO DE CONFIANZA SIMULACION (Minutos)	PROMEDIO DE PRODUCCION SISTEMA REAL (piezas producidas por día)	INTERVALO DE CONFIANZA SIMULACION (piezas producidas por día)	PORCENTAJE PROMEDIO DE ESPERAS POR FALTA DE SUMINISTRO SISTEMA REAL (%)	INTERVALO DE CONFIANZA SIMULACION (%)
C1	18	15.92-29.16	1900	1888-1941	7.5	6.43-8.96
C2	21	13.71-24.23	1900	1917.1-1952.2	8.2	6.91-9.46
C3	15	14.78-21.96	1890	1885-1968.4	10.7	10.6-12.37
C4	17	13.26-19.6	1450	1423.1-1459.1	5.28	4.77-6.16
C5	18	17.71-36.36	1300	1299.5-1393.2	5.79	5.71-8.48
C6	16	12.73-18.02	1890	1873.1-1930.5	7.92	7.65-9.04
C7	15	11.12-16.27	1780	1761.2-1842.5	7.85	7.19-8.94
C9	14	13.78-20.5	1700	1638.2-1719.3	11.93	11.78-12.79
C10	18	15.46-30.84	1450	1424.7-1453.2	11.88	10.47-12.96
C11	18	18.04-27.38	1850	1811.7-1875.6	8.41	7.08-9.76
C12	18	15.45-30.84	1250	1207.6-1289.2	8.68	7.54-9.73
C13	25	19.06-27.59	1510	1501.3-1562.2	5.91	5.11-6.74
C15	21	16.1-23.24	1500	1497.3-1515.3	9.15	6.51-10.3
C17	65	44.84-82.77	1380	1350.9-1483.1	6.92	6.81-8.06
C19	22	17.37-26.03	1530	1505.3-1574.6	5.83	4.56-6.4
C20	18	15.102-23.83	1535	1530.9-1571	5.49	4.36-6.84

Tabla 1: Validación del tiempo de cambio de modelo, producción y esperas por falta de suministro del sistema real contra resultados de simulación

General Report (07-marzo - All Reps)						
General	Locations	Location States Multi	Location States Single	Resources	Resource States	
ASIGNACION Hungaro (ok).MOD (07-marzo - All Reps)						
Name	Replication	Number Observations	Minimum Value	Maximum Value	Avg Value	
Warm	1	14.00	17362.80	82229.40	50702.31	
Warm	2	15.00	16136.40	80812.20	49404.44	
Warm	3	16.00	14692.20	85252.80	50244.79	
Warm	4	15.00	14701.80	86394.00	50831.52	
Warm	5	16.00	14768.40	83737.80	48727.05	
Warm	6	15.00	16609.80	83398.20	49907.80	
Warm	7	14.00	15586.80	82450.80	48933.17	
Warm	8	15.00	15395.40	83029.20	49339.16	
Warm	9	15.00	15855.60	84202.80	49166.20	
Warm	10	15.00	17431.80	80964.60	49397.00	
Warm	11	15.00	15718.20	80875.20	49493.56	
Warm	12	14.00	16072.20	82259.40	47809.41	
Warm	13	15.00	15463.20	85540.80	51047.56	
Warm	14	14.00	16968.00	84793.80	50507.44	
Warm	15	15.00	17130.60	85700.40	52104.04	

Fig. 6: Tiempo en segundos donde las 16 células han sido suministradas y han iniciado la producción de su primer lote

cada fila aparezcan 16 células diferentes, con la finalidad de no duplicar asignaciones, donde el mismo rutero aparezca en dos ocasiones asignado a la misma célula.

Para definir la quinta asignación, los resultados de la simulación de los 4 primeros escenarios, fueron utilizados para mejorar el funcionamiento del sistema, introduciendo la matriz de porcentajes de esperas por falta de suministro obtenidos (ver Tabla 4) a una matriz del módulo de redes (*Network Modeling*) del software *Win QSB*, donde se resolvió el problema mediante el método Húngaro de asignación consiguiendo los resultados que se muestran en la Fig.7.

De acuerdo con los resultados arrojados por el software *Win QSB* (Fig.7) se presenta un resumen en la Tabla 3 con los clústeres bien definidos.

que cinco horas es un tiempo de warm-up razonable. El software de simulación Promodel se programa con un tiempo de corrida de 24 horas y se define un warm-up de 5 horas, por lo que el tiempo de simulación es de 29 horas.

*Etapas 4. Definir clústeres mediante diferentes métodos.* Para este estudio se sugiere que sean tres métodos: experiencia de supervisores, análisis de clúster jerárquico (ACJ) y heurística de método Húngaro, con el objetivo de reducir el tiempo en espera de las células por falta de suministro.

Con relación a la experiencia de supervisores de la empresa, se definen cuatro propuestas de asignación basadas en el conocimiento que tienen del sistema, conformadas cada una de cuatro clústeres. Por ejemplo, en la primera asignación el carretillero uno satisface al clúster compuesto por las células 19, 20, 5 y 10; el carretillero dos satisface al clúster compuesto por las células 7, 17, 11 y 4; el carretillero tres satisface al clúster conformado por las células 6, 12, 15 y 9; el carretillero cuatro satisface al clúster que contiene las células 1, 2, 3 y 13. Las cuatro asignaciones se muestran en la Tabla 2. El criterio para definir las asignaciones aparte de la experiencia, fue que dentro de cada asignación no se repitieran células y en

La sexta asignación se propone aplicando el análisis de clúster jerárquico (ACJ). Para ello se recolectó información acerca de la ubicación de cada célula dentro de la planta como se muestra en la Fig.8, ubicando la distribución de las células sobre un plano cartesiano, a través del cuadrante I, donde los almacenes que se encuentran ubicados en el origen y se tomaron como referencia asignándoles la posición (0,0). A partir de esta ubicación se definieron las distancias entre los almacenes y cada una de las células. Como herramienta de análisis estadístico se utilizó el software *Minitab* donde se introdujeron los valores de cada una de las ubicaciones de las células y aplicando el ACJ basado en distancias se obtuvieron los clústeres de la sexta asignación los cuales se pueden apreciar en el dendograma de la Fig.9, donde cada color representa un clúster.

De acuerdo al dendograma de la Fig.9, se aprecia que la sexta asignación se define de la siguiente manera: en color rojo, el clúster uno se compone de las células C1, C9, C3 y C10; en color verde, el segundo clúster está formado por las células C2, C4, C6, C17 y C12; en color amarillo, el clúster tres, está formado por las células C19 y C20; y finalmente, en color azul, el cuarto clúster está formado por las células C5, C11, C7, C13 y C15.

CARRETIILLERO	CELULAS															
	ASIGNACIÓN 1				ASIGNACIÓN 2				ASIGNACIÓN 3				ASIGNACIÓN 4			
1	19	20	5	10	4	15	13	9	20	17	1	6	11	2	3	7
2	7	17	11	4	20	2	19	6	9	10	13	3	20	15	1	5
3	6	12	15	9	11	1	3	12	4	5	7	2	19	10	17	13
4	1	2	3	13	5	17	10	7	15	11	19	12	12	4	9	6

Tabla 2: Asignaciones propuestas por supervisores con cuatro clústeres cada una

*Etapa 5. Someter cada uno de los clúster en el modelo de simulación y medir su funcionamiento:* Para obtener los porcentajes de espera por falta de suministro, se corrió el modelo de simulación desarrollado en el software *Promodel* con seis escenarios, representando cada escenario una asignación diferente. En la Tabla 4, se pueden observar los resultados para cuatro escenarios distintos correspondientes a las asignaciones 1, 2, 3 y 4, descritas en la Tabla 2. Interpretando los resultados, se puede observar que la asignación 1, está definida por el carretillero 1 quien suministra las células 5, 10, 12 y 19, las cuales tienen 4,79%, 11,95%, 10,32% y 4,50% en espera por falta de suministro respectivamente. Considerando la asignación 2, el carretillero 1 debe suministrar las células 4, 9, 13 y 15, dando como resultado 4,09%, 12,46%, 6,10% y 7,65% en esperas por falta de suministro respectivamente. Considerando la asignación 3, el carretillero 1 suministra las células 1, 6, 17 y 20, los porcentajes de espera por falta de suministro son de 6,57%, 3,77%, 5,97% y 3,68% respectivamente. En la asignación 4, el carretillero 1 suministra las células 2, 3, 7 y 11 y los porcentajes de espera por falta de suministro son 5,91%, 6,37%, 10,47% y 4,62% respectivamente. El resto de las filas de la Tabla 4, se interpreta de la misma manera que se hizo con la fila 1, donde se definen las esperas por falta de suministro cuando los carretilleros son: 2, 3 y 4. Cada asignación se distingue por colores, los cuales se identifican en la parte inferior de la Tabla 4.

Otra forma de interpretar la Tabla 4 es mediante el siguiente ejemplo: el valor de 4,79 que aparece en la fila 1, columna 5, significa que las esperas por falta de suministro que sufre la célula  $j = 5$ , cuando es suministrada por el carretillero  $i = 1$ , considerando la asignación 1, es de 4,79%. El resto de los valores que aparecen en la tabla se interpretan de la misma forma. Todos los valores nos indican las esperas por falta de suministro, que sufren las células, dependiendo del carretillero y la asignación de que se trate.

Finalmente, se sometió el sistema de suministro bajo un escenario donde los carretilleros fueron asignados a los clústeres de acuerdo al método de ACJ, dando origen a lo que

CLUSTER	CARRETILLERO	CELULA ASIGNADA	PORCENTAJE DE ESPERA POR FALTA DE SUMINISTRO
1	1	C20	3.68
	1	C5	4.79
	1	C3	6.37
	1	C12	10.32
2	2	C19	3.77
	2	C2	5.87
	2	C1	5.92
	2	C11	4.85
3	3	C4	4.35
	3	C17	5.86
	3	C15	7.46
	3	C7	8.12
4	4	C9	12.02
	4	C6	4.34
	4	C10	10.70
	4	C13	6
			6.53

Tabla 3: Asignación cinco con cuatro clústeres definidos por método Húngaro

05-05-2013	From	To	Assignment	Unit Cost	Total Cost	Reduced Cost
1	CARRETILLERO 1	CELULA 20	1	3.68	3.68	0
2	CARRETILLERO 2	CELULA 19	1	3.77	3.77	0
3	CARRETILLERO 3	CELULA 4	1	4.35	4.35	0
4	CARRETILLERO 4	CELULA 9	1	12.02	12.02	2.384186E-07
5	CARRETILLERO 1	CELULA 5	1	4.79	4.79	0
6	CARRETILLERO 2	CELULA 2	1	5.87	5.87	0
7	CARRETILLERO 3	CELULA 17	1	5.86	5.86	2.384186E-07
8	CARRETILLERO 4	CELULA 6	1	4.34	4.34	0
9	CARRETILLERO 1	CELULA 3	1	6.37	6.37	0
10	CARRETILLERO 2	CELULA 1	1	5.92	5.92	0
11	CARRETILLERO 3	CELULA 15	1	7.46	7.46	0.00
12	CARRETILLERO 4	CELULA 10	1	10.70	10.70	0
13	CARRETILLERO 1	CELULA 12	1	10.32	10.32	0
14	CARRETILLERO 2	CELULA 11	1	4.85	4.85	0
15	CARRETILLERO 3	CELULA 7	1	8.12	8.12	0
16	CARRETILLERO 4	CELULA 13	1	6	6	0
	<b>Total</b>	<b>Objective</b>	<b>Function</b>	<b>Value =</b>	<b>104.42</b>	

Fig. 7: Solución del problema mediante el método Húngaro en Win QSB

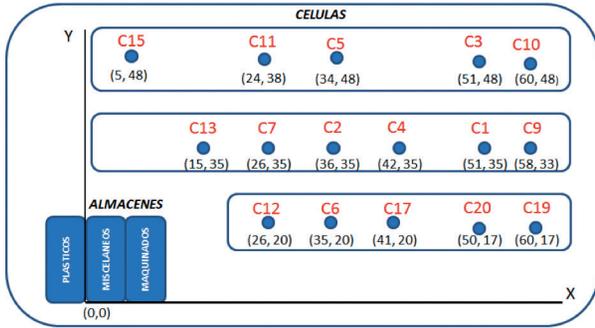


Fig. 8: Ubicación de las células en un plano cartesiano

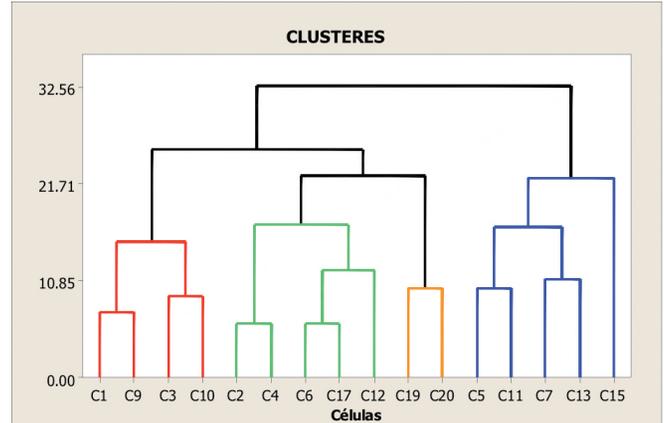


Fig. 9: Dendrograma que define la quinta asignación

identificamos como asignación 6. Al correr el escenario en el modelo de simulación se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 5 donde se aprecia que el promedio de esperas por falta de suministro es de 7,38%.

#### 4. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con los VSM's plasmados en las Fig.2 y Fig.3, es posible reducir el Lead Time (tiempo de entrega) de 16,46 a solo 8,71 días. Esto en gran medida se logra reduciendo el

WIP (obra en curso) y suministrando los materiales de acuerdo con los *clústeres* definidos por la heurística del método Húngaro. En los resultados que se presentan en la Tabla 6, se establece que si el abastecimiento se realizara de acuerdo con las asignaciones 1 a 6, en promedio, cada una de las células de producción tendrían esperas por falta de abastecimiento de alrededor del 7.895%, 7.28%, 7.96%, 7.46, 6.53 y 7.38% para las asignaciones 1, 2, 3, 4, 5, y 6 respectivamente.

CARRETIILLEROS	CELULAS															
	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	15	17	19	20
1	6.57	5.91	6.37	4.09	4.79	3.77	10.47	12.46	11.95	4.62	10.32	6.10	7.65	5.97	4.50	3.68
2	5.92	5.87	8.76	4.57	3.15	6.02	8.27	12.89	11.33	4.85	21.00	5.82	7.51	7.12	3.77	4.74
3	7.63	8.73	9.43	4.35	6.71	12.61	8.12	12.41	12.85	5.43	12.53	6.3	7.46	5.86	4.41	4.29
4	6.6	7.06	13.52	4.13	5.86	4.34	7.8	12.02	10.70	6.99	19.85	6.00	9.76	6.41	4.00	4.47
1	6.57	5.91	6.37	4.09	4.79	3.77	10.47	12.46	11.95	4.62	10.32	6.10	7.65	5.97	4.50	3.68
2	5.92	5.87	8.76	4.57	3.15	6.02	8.27	12.89	11.33	4.85	21.00	5.82	7.51	7.12	3.77	4.74
3	7.63	8.73	9.43	4.35	6.71	12.61	8.12	12.41	12.85	5.43	12.53	6.3	7.46	5.86	4.41	4.29
4	6.6	7.06	13.52	4.13	5.86	4.34	7.8	12.02	10.70	6.99	19.85	6.00	9.76	6.41	4.00	4.47
1	6.57	5.91	6.37	4.09	4.79	3.77	10.47	12.46	11.95	4.62	10.32	6.10	7.65	5.97	4.50	3.68
2	5.92	5.87	8.76	4.57	3.15	6.02	8.27	12.89	11.33	4.85	21.00	5.82	7.51	7.12	3.77	4.74
3	7.63	8.73	9.43	4.35	6.71	12.61	8.12	12.41	12.85	5.43	12.53	6.3	7.46	5.86	4.41	4.29
4	6.6	7.06	13.52	4.13	5.86	4.34	7.8	12.02	10.70	6.99	19.85	6.00	9.76	6.41	4.00	4.47
ASIGNACIÓN 1																
ASIGNACIÓN 2																
ASIGNACIÓN 3																
ASIGNACIÓN 4																

Tabla 4: Porcentaje de espera por falta de suministro considerando las cuatro asignaciones propuestas por los supervisores de la empresa

CLUSTER	CARRETIILLERO	CELULA ASIGNADA	PORCENTAJE DE ESPERA POR FALTA DE SUMINISTRO
1	1	C1	9.2
	1	C9	12.52
	1	C3	11.74
	1	C10	10.66
2	2	C2	6.68
	2	C4	4.71
	2	C6	6.86
	2	C17	3.1
	2	C12	12.44
3	3	C19	3.46
	3	C20	3.5
4	4	C5	6.57
	4	C11	7.08
	4	C7	7.79
	4	C13	4.23
	4	C15	7.46
PROMEDIO			7.38

Tabla 5: Asignación seis con cuatro clústeres definidos por agrupamiento jerárquico (ACJ)

Se puede observar que el mejor funcionamiento se obtuvo asignando carretilleros a los diferentes *clústeres* mediante el método Húngaro, por lo que se sugiere realizar la asignación mediante éste método. Al expresar la solución en términos de los resultados que le interesan a la empresa, significa que el carretillero 1, debe abastecer al clúster 1, compuesto por las células C20, C5, C3 y C12; el carretillero 2, debe abastecer el

ASIGNACIÓN	METODO	PORCENTAJE PROMEDIO DE PERDIDAS POR FALTA DE ABASTECIMIENTO
1	Sugerido por supervisor	7.895%
2	Sugerido por supervisor	7.28%
3	Sugerido por supervisor	7.96%
4	Sugerido por supervisor	7.46%
5	Húngaro	<b>6.53%</b>
6	ACJ	7.38%

Tabla 6: Promedio de esperas por falta de abastecimiento para cada clúster

clúster 2, integrado por las células C19, C2, C1 y C11; el carretillero 3, debe abastecer el clúster 3, formado por las células C4, C17, C15 y C7, finalmente, el carretillero 4 debe abastecer el clúster 4, integrado por las células C9, C6, C10 y C13.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado una metodología para analizar diferentes alternativas de realizar suministro de materiales desde los almacenes hacia células de producción en empresas que operan bajo principios de *Lean Manufacturing* que permitió encontrar la mejor clusterización de células para suministro de materiales.

Los resultados de los seis escenarios propuestos permitió observar que la asignación de carretilleros a los diferentes clústeres mediante la heurística del método Húngaro, es la que nos proporciona esperas por falta de suministro en las células menores. La utilización de la simulación en proyectos de *Lean Manufacturing* ha permitido ahorrar grandes cantidades monetarias al permitirnos experimentar los diferentes escenarios en lugar de hacerlo directamente en el sistema real.

La metodología propuesta ha demostrado ser válida debido a que se sometió a diferentes pruebas sugeridas por Harrell y Sargent como son animación y validez con datos históricos, logrando con ello demostrar primeramente que el modelo de simulación se comporta fielmente como lo hace el sistema real. Posteriormente se realizó una validación inversa; las predicciones obtenidas con el modelo de simulación se aplicaron en el sistema real, logrando con ello validar que las predicciones del modelo de simulación, siguiendo la metodología propuesta, son confiables.

Con este trabajo se lograron definir clústeres mediante diferentes métodos con lo que se facilita el funcionamiento del sistema de suministro de materiales en una empresa que opera bajo los principios de la *Lean Manufacturing*. De otra manera sería sumamente complicado determinar la forma de entregar materiales en un sistema que cuenta con tres almacenes, cuatro carretilleros y 16 células. Para el caso estudiado, el número de combinaciones posibles, considerando la producción de 6 productos diferentes en una célula, 4 carretilleros y 3 almacenes se tendrían  $64^6 = 68.719.476.736$  formas diferentes para entregar los materiales (son 64 las formas diferentes para entregar los materiales para la producción del primer lote). Al clusterizar se reduce el número de combinaciones posibles de suministro y se facilita el trabajo de programar la entrega de materiales. En este caso cada carretillero tendría que hacer solo 72 entregas de materiales (1 carretillero x 3 almacenes x 4 células x 6 tipos de producto).

Los resultados de este trabajo se complementan con las tendencias de la filosofía lean, en donde se pretende reducir desperdicios mediante la aplicación de una gran cantidad de herramientas entre las que destacan reducir el WIP, reducir el tiempo de cambio de producto y producir lotes pequeños de diferentes tipos que pertenecen a familias de productos. La metodología que se propone es clave para implementar el *Lean Manufacturing* que se propone con éxito, facilitando la aplicación de herramientas relacionadas con la categoría JIT. Los resultados de este trabajo están limitados a aquellas empresas que operan

bajo principios de Lean Manufacturing y que tienen en su sistema de producción almacenes, carretilleros para el transporte de materiales y células de producción encargadas de elaborar familias de productos. No tiene sentido implementarlo en empresas que no aplican Lean Manufacturing.

Considerando que antes de la implementación del sistema de suministro que se propone, las esperas por falta de suministro en la empresa llegaban a ser hasta de 8%, se tiene una mejora de 1,47% (para el caso donde se definen los clústeres de acuerdo a los resultados del método Húngaro). Este 1,47% de mejora permite a la empresa tener una mayor capacidad de producción. Si se multiplica 24 horas por 1,47% y el resultado se convierte a segundos disponibles para producción, se tienen 1.270,08 segundos. Si consideramos un tiempo ciclo promedio de las células de producción de 45 segundos, se pueden producir 28,22 transmisiones homocinéticas adicionales por día en cada célula, en promedio.

Como sugerencia para trabajo futuro, se puede resolver el mismo problema explorando la gran cantidad de combinaciones posibles para suministrar materias primas mediante metaheurísticas, como son búsqueda tabú y algoritmos genéticos, las cuales son capaces de explorar gran espacio combinatorio y arrojar soluciones de buena calidad en tiempo razonablemente corto [19].

## AGRADECIMIENTOS

El presente estudio se desarrolló gracias al apoyo económico del CONACyT, a través de una beca No. 228973 para la manutención de mis estudios doctorales y al CIATEC, donde recibí cátedra en mi formación doctoral.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abdulmalek FA y Rajgopal J. "Analyzing de benefist of Lean Manufacturing and value stream mapping via simulation: a process sector case study". *International Journal of production economics*. Septiembre 2006. Vol. 107. p.223-236. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.09.009> .
- [2] Shah R y Ward PT. "Lean Manufacturing: context, practice bundles and performance". *Journal of operations management*. Marzo 2003. Vol. 21 No. 2, p. 129-149. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963\(02\)00108-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0272-6963(02)00108-0).
- [3] Cusumano MA. "The limits of lean". *Solan Management Review*. 1994. Vol. 35, No. 4. p. 27-32.
- [4] Padilla L. "Lean Manufacturing". *Revista Electrónica Ingeniería Primero*. Enero 2010. No.15. p.64-69. ISSN: 2076-3166
- [5] Jiménez-García JA, Medina-Flores JM, Yáñez-Mendiola J y et al. "Diagnostico en el surtimiento de materiales en líneas de ensamble de flechas de velocidad constante Utilizando Promodel". En: *Actas del 1er Congreso Internacional de investigación e innovación 2012*. Multidisciplinario, (26 y 27 de abril de 2012). ISBN: 978-607-95635.
- [6] Ohlmann JW, Fray MJ, Thomas BW. "Route Design for Lean Production Systems". *Transportation Science*. Agosto 2008. Vol. 42. No.3. p.352-370. DOI: <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.1070.0222>.
- [7] Jain AK, Murty MN, Flynn PJ. "Data clustering: a review", *ACM Computing Surveys*. Septiembre 1999. Vol. 31, No.3. p.264-323. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/331499.331504>.

- [8] Bhattacharyya DK. y Das A. "A new distributed algorithm for large data clustering". *IDEAL 2000*. LNCS 1983. p.29-34. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/3-540-44491-2\\_5](http://dx.doi.org/10.1007/3-540-44491-2_5) .
- [9] Goldberger J, Tassa T. "A hierarchical clustering algorithm based on the Hungarian method". *Pattern recognition letters*. Abril 2008. Elsevier. p.1632-1638. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2008.04.003> .
- [10] Kuhn HW. "The Hungarian method for the assignment problem". *ONR Logistics Project*. 1955. p.83-97. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68279-0\\_2](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-68279-0_2) .
- [11] Medina-Acosta GA, Delgado-Penin JA. "On the feasibility of a channel-dependent scheduling for the SC-FDMA in 3GPP-LTE (mobile environment) based on a prioritized bifacet Hungarian method". *EURASIP journal on Wireless Communications and Networking*. Septiembre 2011. p.1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/1687-1499-2011-71>.
- [12] Burkard RE. "A general Hungarian method for the algebraic transportation problem". *Discrete mathematics*. Septiembre 1977. p.219-232. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0012-365X\(78\)90055-9](http://dx.doi.org/10.1016/0012-365X(78)90055-9).
- [13] Villanueva-Castrillón J. "Simulación de procesos clave en la toma de decisiones". *DYNA Ingeniería e Industria*. Mayo 2008. Vol.83. No. 4. p.221-227.
- [14] Grimard C, Marvel JH. "Validation of the re-design of a manufacturing Work cell using simulation". *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*. p.1836-1391. ISBN:0-7803-9519-0
- [15] Standridge CR, Marvel JH. "Why lean needs simulation". *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*. p.1907-1913. ISBN: 1-4244-0501-7
- [16] Harrell C, Gosh BK y Bowden R. *Simulación Using Promodel 3a ed.* United States of America: Mc Graw Hill Hihger Education, 2000. 603p. ISBN: 0-07-234144-0.
- [17] Sargent RG. "Verification and validation of simulation models". *Proceedings of the 30th conference on Winter simulation*. Department of Electrical Engineering and Computer Science. 1998. p.121-130. ISBN: 0-7803-5134-7.
- [18] Castro-Lopez JD. "Metodología basada en herramientas de manufactura esbelta para mejorar el desempeño de la cadena de suministro". Director: Jiménez-García JA. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Celaya, Departamento de Ingeniería Industrial, Septiembre 2012.
- [19] Dero J, Siarry P, Michalewicz Z y et al., *Metaheuristics for Hard Optimization*, Springer, 2008. 372p. ISBN: 978-3-540-30966-6.