

Protocol: Material flow risk evaluation for layout design

Protocolo: Evaluación de los riesgos del flujo de material en el diseño de instalaciones

Aída Sáez Más^a y José P. García-Sabater^b

^a ROGLE, Dpt De Organización de Empresas, Universitat Politècnica de València, (Spain), adsems@upv.es

^b ROGLE, Dpt De Organización de Empresas, Universitat Politècnica de València, (Spain), jpgarcia@upv.es

Recibido: 2016-05-05 Aceptado: 2016-07-12

Abstract

The need of design new layouts or redesign current situation to manufacture new products has increased principally due to changes in customer demand, on both variety aspects and quantity (Lu, Shpitalni, and Gadh, 1999). The complexity increase is also associated with the traffic generated by material handling equipment. This situation can be described as unsafe for workers. Many authors defend that during layout design/redesign a risk analysis is necessary. In contrast others believe that material flow analysis should be a mainly task during this step. Therefore, in this research both considerations have been integrated. So that it is proposed a protocol to evaluate the risk generated by material flow with handling equipment in manufacturing plants. This methodology identify the process steps and propose dimensions, measurables, tools and suggestions in order to analyse and reduce risk correctly. All the above aspects are validated in a case study of a complex assembly plant in the automotive sector.

Keywords: *Material Flow Analysis (MFA), Discrete Event Simulation (DES), Risk management, Facility layout, Traffic engineering.*

Resumen

La necesidad de diseñar nuevos sistemas o de reconfigurar los presentes para producir nuevos productos se ha incrementado en gran parte debido a los cambios en la demanda de los clientes, tanto en aspectos de variedad como de cantidad de productos (Lu, Shpitalni, y Gadh, 1999). Este aumento en la complejidad lleva asociado un incremento del tráfico de carretillas en la zona de montaje, situación que se califica como poco segura para las personas. Numerosos autores defienden que durante el diseño/ rediseño de instalaciones es necesario realizar un análisis de los riesgos existentes. Otros en cambio creen que analizar el flujo de material debe ser una tarea prioritaria en esta etapa. Es por ello que en esta investigación se trata de integrar ambas consideraciones. Para ello se propone un protocolo de actuación para evaluar el riesgo que genera por el flujo de material mediante medios de manipulación en plantas de fabricación. Esta metodología identifica las diferentes etapas del proceso, proponen dimensiones de actuación para el flujo de material, medibles, herramientas y propuestas de mejora para su correcto análisis y reducción del riesgo. Todo esto se valida en un caso de estudio de una compleja planta de montaje del sector del automóvil.

Palabras clave: *Análisis del Flujo de Material (MFA), Simulación por eventos discretos (DES), Gestión del riesgo, Diseño de layout, Ingeniería del tráfico.*

1. Introducción

Una de las tareas prioritarias de los fabricantes con éxito, es diseñar un *layout* eficiente, que garantice costes bajos de manutención, mejore el flujo de material y reduzca los cuellos de botella (Banks, 1998), para así poder conseguir un mayor rendimiento de las infraestructuras (Sly, Grajo, y Montreuil, 1996). Además, una de las maneras de tener prevalencia competitiva es analizar y optimizar el flujo de material, el cual contribuye a la reducción de los costes en la compañía (Krolczyk et al., 2015).

En los procesos de diseño de sistemas industriales, los diseñadores optimizan aspectos socioeconómicos teniendo en cuenta los estándares y las normas de seguridad, sin embargo a pesar de la importancia del análisis de riesgos este se suele olvidar en el proceso del diseño, ya que conlleva un consumo de tiempo y de costes (Shahrokhi y Bernard, 2004). Esto resulta crítico, tanto para el riesgo de accidentes como la gestión de estos, ya que el diseño controla la posibilidad de accidentes y consecuencias en cadena (Tugnoli, Khan, Amyotte, y Cozzani, 2008a). Una falta de métodos que promuevan una efectiva implantación de un *layout* seguro exige al desarrollo de nuevas técnicas y métodos (Tugnoli, Khan, Amyotte, y Cozzani, 2008a).

Esta investigación surge de profundizar en el análisis del flujo de materiales utilizando medios de manutención móviles como un elemento clave en la toma de decisiones del diseño de *layout*. El propósito de este trabajo es aportar un protocolo para la evaluación de riesgos ligados al análisis del flujo de material mediante carretillas en plantas industriales de fabricación. Para ello se persigue alcanzar los siguientes objetivos:

- Proponer una metodología para la gestión del riesgo ligado al movimiento de material y al diseño en planta.
- Identificar y proponer consideraciones y medibles para cuantificar y evaluar el riesgo.
- Aplicar la metodología propuesta a un caso de estudio, para analizar el *layout* de una planta de montaje del sector del automóvil.

El resto del documento se estructura como sigue. En el segundo apartado se ha realizado una revisión de la literatura sobre el concepto de riesgo, la metodología de la gestión del riesgo y su relación con el diseño de *layout* y flujo de material. A continuación se propone la metodología de gestión de riesgos ligado al análisis del movimiento de material y al diseño de *layout*. Más adelante se aplica la metodología a un caso de estudio de una planta de montaje de motores de una fábrica de automóviles. Finalmente se concluye el documento con las conclusiones y futuras líneas de investigación.

2. Revisión de la literatura

2.1 Diseño de *layout* y el análisis del flujo de materiales

El diseño de *layout* implica la selección de la disposición de las máquinas y de la trayectoria de los medios de manutención (Iqbal y Hashmi, 2001). Para Sly (1996), el flujo de material es la actividad primaria que conduce al diseño de la fábrica, ya que los proyectos que no empiezan con exhaustiva evaluación del proceso y equipos, o no detallan la relación con el estudio del flujo de material, a menudo no llegan a ninguna solución. El coste que genera el movimiento de material y el sistema de manejo de materiales en las fábricas es significativo, lo que hace que su ubicación sea crítica (Sly, 1995b). Islier (1998) indicó que aproximadamente el 30-75% de los costes del producto se pueden atribuir a dichas actividades. Según

Ficko y Palcic (2013), un *layout* efectivo puede reducir estos costes de flujo de material y del sistema de manejo de materiales considerablemente.

La principal preocupación del problema de diseño de *layout* es encontrar una disposición óptima de una serie de instalaciones con ciertos criterios, cualitativos y cuantitativos (Ficko y Palcic, 2013; Mehrotra, N., Syal, M., and Hastak, 2005). El enfoque cualitativo incluye un análisis detallado del flujo de material basado en varias configuraciones de *layout*, y es el corazón de un análisis de *layout* industrial (Sly, 1995b). El enfoque cuantitativo se utiliza para asegurar que todos los demás criterios como son el ruido, la contaminación o la seguridad entre otros se están cumpliendo (Sly, 1995b). Algunos de estos factores y otros como la complejidad o la variación de la demanda tienen un impacto directo sobre el flujo de material, y deben ser considerados para tener un sistema de manejo de materiales y un *layout* eficiente (Longo, Mirabelli, y Papoff, 2005).

Es importante enfatizar que la mayoría de los metodologías tradicionales de estudios de diseño en planta, permitían analizar y evaluar varias posibilidades de configuración de *layout* utilizando herramientas cualitativas, como redes y nodos que representaban el flujo de material y los departamentos (Longo et al., 2005). Sin embargo en este trabajo de investigación nos interesa, no solo evaluar cualitativamente, sino cuantificar el flujo de material para evaluar los riesgos asociados.

El análisis del flujo de material (*Material Flow Analysis*, MFA) es una evaluación sistemática de los flujos y stocks de materiales dentro de un sistema (Brunner y Rechberger, 2004). El MFA se ha usado como sinónimo de cuantificar el flujo de material; en este sentido cuantificar representa solo uno de los múltiples pasos del análisis (Guo y Zhang, 2016). Esta metodología puede ilustrar no solo los tipos y cantidades de recursos fluyendo, sino también cómo el flujo de material está relacionado con la eficiencia del uso de los recursos y su impacto en el entorno (OECD, 2008). El MFA se puede utilizar como un instrumento para: evaluar los efectos de los procesos y bienes en los flujos de materiales, controlar los flujos de materiales con el fin de minimizar los impactos ambientales, así como economizar energía y materiales para un determinado grupo de actividades (Brunner y Rechberger, 2004). El análisis del flujo de material en una organización aporta mucha información sobre cómo de bien está organizado el sistema (Krolczyk et al., 2015).

Aunque en la mayoría de los casos las aplicaciones del MFA se han dado en el estudio de los flujos de materiales y energía en sistemas ambientales, el método se puede emplear fácilmente en otro tipo de sistemas (Scholz y Tietje, 2002). El MFA se puede aplicar también en industrias y zonas industriales, los resultados del MFA se han aplicado con éxito en la optimización de los flujos de materiales de procesos de producción (Díaz Gómez y Silva Leal, 2015). Krolczyk et al. (2015) también afirmaron que el MFA había sido satisfactoriamente utilizado en la industria para optimizar flujos de materiales de procesos de producción. Es por ello que numerosos autores han aplicado el análisis del flujo de material en sus investigaciones.

Longo et al. (2005) realizaron un análisis del flujo de material para una empresa de producción maderera. Con ayuda de la simulación por eventos discretos y algoritmos genéticos, los autores tratan de optimizar la configuración en planta. Delgado Sobrino, Holubek, Košťál, y Ružarovský (2014) realizan un análisis del flujo de material para ayudar en el análisis de diseño de *layout*, para ello utilizan la simulación como herramienta. Banerjee, Syal, y Hastak (2006) presentan un proceso de modelado cuantitativo y la evaluación de alternativas de *layout* para una planta de construcción de casas prefabricadas basándose en aspectos del flujo de material. Por otra parte McLean, Yates, y Landaeta (2014) proponen una solución para

evaluar diferentes alternativas de rediseño de una planta que asegure que mejora el flujo de material. Sendra, Gabarrell, y Vicent (2007) proponen el uso de indicadores, para analizar la eficiencia y rangos de materialización en áreas industriales. Krolczyk et al. (2015) presentan un análisis del actual estado del flujo de material de una empresa del sector del automóvil y proponen mejoras de optimización.

2.2 Gestión del riesgo

La palabra riesgo se define generalmente como “la posibilidad de lesiones o pérdidas resultante de la exposición a una fuente de peligro”, mientras que seguridad significa “libre de riesgo o peligro” (Misra, 2008a). Aunque se sabe que el riesgo no puede ser eliminado, sí puede y debe ser gestionado (Aven, 2008).

En la actualidad existe un gran empuje en la sociedad (y por ende en las empresas), para implementar la gestión de riesgos en las organizaciones. La idea de la gestión del riesgo es asegurar que se toman medidas adecuadas para proteger a las personas, el entorno y asesorar de las posibles consecuencias (Aven, 2008).

Numerosos autores han hablado sobre la gestión de riesgos y las etapas comprendidas en el proceso, entre ellos (Aven y Renn, 2010; Chapman, 2001; Claypool, 2011; Shahrokhi y Bernard, 2004). En base a la información recogida en estos trabajos se han seleccionado las siguientes etapas que Misra (2008b) define de la siguiente manera:

- *Risk identification*: El primer paso es identificar las fuentes de riesgo en el sistema.
- *Risk estimation*: El siguiente paso es determinar la naturaleza y el nivel de riesgo y aportar una medición de este.
- *Risk evaluation*: En esta etapa se emite un juicio sobre la aceptabilidad o no de las probabilidades de riesgo y las consecuencias resultantes y se identifican contribuciones para el riesgo en general.
- *Risk management*: Etapa en la que se toman las decisiones y esfuerzos para reducir el riesgo, desarrollando estrategias para gestionarlo y mitigarlo. Estas estrategias hacen referencia a trasladar el riesgo a otra zona, evitarlo y/o reducir los efectos negativos.
- *Risk monitor*: Este proceso hace referencia a la observación sistemática de los efectos de las opciones implementadas (Aven y Renn, 2010). Proporciona información sobre el estado de seguridad de la planta y así poder utilizarla en la toma de decisiones (Verma, Srividya, y Karanki, 2010).

Del análisis de la anteriormente citada información, se puede concluir que un análisis de riesgos incluye la identificación de las amenazas y peligros, análisis de las causas, el análisis de las consecuencias y descripción del riesgo (Aven, 2008), y que los principales objetivos del análisis del riesgo son evaluar el nivel de seguridad y compararlo de manera implícita o explícita con estándares; valorar el nivel de seguridad de la planta identificando las áreas más efectivas para realizar mejoras; y estimar el nivel de seguridad para las operaciones (Misra, 2008a).

El análisis de los riesgos permite minimizar el riesgo de los trabajadores y del entorno de las consecuencias en cadena que pueden ocasionar los accidentes (Pasman, Jung, Prem, Rogers, y Yang, 2009). Es por ello que cada vez más se requiere del trabajo de ingenieros para que aprueben la seguridad de nuevos productos y sistemas, especialmente de aquellos que pueden presentar riesgos potenciales, como por ejemplo las plantas industriales (O'Connor, 2008).

2.3 Gestión del riesgo en el diseño de layout y el análisis del flujo de materiales

La necesidad de diseñar nuevos sistemas o reconfigurar el actual se ha incrementado en gran medida, debido a los cambios en la demanda de los clientes, tanto desde los aspectos de cantidad de producto como de variedad (Sáez Más, García Sabater, Morant Llorca, y Maheut, 2016). Para Leveson (2004) estos cambios se deben principalmente al rápido avance de la tecnología y los cambios que conllevan, como cambios en la naturaleza de los accidentes, nuevos peligros y el aumento en la complejidad y las relaciones entre los subsistemas industriales; sin embargo las técnicas de ingeniería para sistemas seguros no han avanzado a la misma velocidad.

El diseño de *layout* implica diferentes aspectos que tienen que ser considerados al mismo tiempo: restricciones, costes, seguridad o disponibilidad de servicios (Tugnoli et al., 2008a). Según Shahrokhi y Bernard (2004) los objetivos más importantes durante el diseño suelen ser el económico y la optimización; la seguridad se considera más bien un criterio y no un objetivo, por lo que las metas en temas de seguridad no se definen.

Generalmente el análisis del riesgo se ha realizado después del proceso de diseño y la mayoría de las veces como análisis de accidentes después de que haya ocurrido (Shahrokhi y Bernard, 2004). Ya que conforme los sistemas se vuelven más y más complejos, las posibilidades de que todo funcione sin fallos y que no se pueda eliminar totalmente disminuye, pero sí existe la posibilidad de poder contener su impacto (Misra, 2008a).

Idealmente se ha discutido que la prevención de accidentes debería integrarse con la planificación del sistema de producción (Khan y Abbasi, 1998). Y es que el *layout* de las plantas industriales juega un papel importante a la hora de definir la seguridad en la distribución, y esta se debería implementar de manera efectiva en las primeras etapas del diseño (Tugnoli et al., 2008a). A pesar de la importancia, y de que tiene un gran potencial para la resolución de problemas relacionado con los peligros, al análisis del riesgo durante el diseño no se le ha prestado suficiente atención y los diseñadores creen que respetando leyes y estándares garantizan la prevención de accidentes (Shahrokhi y Bernard, 2004). Esto resulta crítico ya que el nivel de seguridad influye en la capacidad de que un acontecimiento accidental se propague dando como resultado la intensificación de la magnitud de las consecuencias (Cozzani, Tugnoli, y Salzano, 2007).

Actualmente algunos gerentes han entendido que las acciones de prevención, para crear espacios de trabajo seguros, pueden ser una ventaja competitiva, y anteponen la gestión de la seguridad como una prioridad (Shahrokhi y Bernard, 2004). La prevención de accidentes exige la excelencia en el rendimiento, lo que conduce a la alta fiabilidad de la planta y reduce las posibilidades de fracaso y el riesgo asociado. En consecuencia, mantener los niveles de fiabilidad y seguridad elevados, ayudan al sistema en la prevención de accidentes (Misra, 2008a). Incorporando medibles de seguridad en el diseño de *layout* la organización puede evitar pérdidas económicas generados por accidentes industriales (Moatari-Kazerouni, 2015).

Se concluye que durante el diseño de layout se debe de considerar tanto el flujo de materiales (y sus repercusiones económicas y de fiabilidad) como el riesgo asociado a este. Varios investigadores han propuesto metodologías que integran el riesgo con el diseño de layout con el análisis del flujo de materiales. Sin embargo, tal y como se aprecia en la tabla I, en la literatura no se han encontrado trabajos que consideren tanto el diseño del *layout*, como el análisis del flujo de materiales (MFA) y el riesgo asociado a este en plantas industriales. Es por ello que este trabajo propone una metodología para dar respuesta a este *gap*.

Tabla 1. Resumen de artículos relacionados con los temas clave del documento. Fuente: Elaboración propia.

| Author | Risk | Layout design | Material Flow Analysis | Simulation | Automotive |
|--|------|---------------|------------------------|------------|------------|
| Jithavech y Krishnan (2010) | x | x | | | |
| Krishnan, Jithavech y Liao (2009) | x | x | | | |
| Shahrokhi y Bernard (2004) | x | x | | | |
| Cozzani et al. (2007) | x | x | | | |
| Tugnoli et al. (2008a) | x | x | | | |
| Tugnoli, Khan, Amyotte y Cozzani (2008b) | x | x | | | |
| Moatari-Kazerouni (2015) | x | x | | | |
| Delgado Sobrino et al. (2014) | | x | x | | |
| Banerjee et al. (2006) | | x | x | | |
| Jerbi, Chtourou y Maalej (2010) | | x | | x | |
| Krolczyk et al. (2015) | | x | x | | x |
| Sly (1996) | | x | x | x | |
| Sly (1995b) | | x | x | x | |
| Longo, Mirabelli y Papoff (2005) | | x | x | x | |
| McLean et al. (2014) | | x | x | x | |

3. Propuesta de metodología para la gestión de riesgos asociados al flujo de materiales en plantas industriales

En este apartado se va a proponer la metodología y desarrollar cada una de las etapas, así como el material propuesto para realizar correctamente el análisis del flujo de material.

3.1 Propuesta de metodología

Se propone la siguiente metodología formado por un proceso de 5 etapas, que incluye *risk identification*, *risk estimation*, *risk evaluation*, *risk management* y *risk monitor* (figura 3) basado en la literatura anteriormente vista.

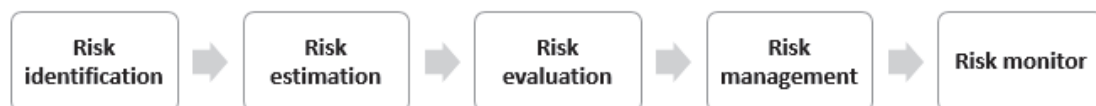


Figura 3. Proceso de gestión del riesgo propuesto

- *Risk identification*. El primer paso del proceso consiste en estudiar con detenimiento el sistema a evaluar, para conocer en detalle el flujo de material existente, la ruta seguida etc. y así poder identificar las fuentes de riesgo existentes.
- *Risk estimation*. Una vez detectado los riesgos se han de cuantificar para conocer el nivel de riesgo en el que se encuentra. En esta etapa será necesario definir los medibles apropiados.
- *Risk evaluation*. Con ayuda de los medibles y de los datos recogidos, se evalúan las zonas potenciales de riesgo. En base a los resultados se proponen alternativas de mejora, que serán estimadas y evaluadas de nuevo para comprobar que realmente ofrecen mejores resultados.

- *Risk management*. Una vez evaluadas y analizadas la situación actual y las alternativas de mejora, se seleccionan y proponen cuál/cuáles se recomienda implantar así como hallazgos y recomendaciones a estos. Estas recomendaciones se comprobarán con ayuda de las herramientas que se propondrán más adelante, con el fin de aportar recomendaciones fiables al cliente.
- *Risk monitor*. Durante la etapa de post-implantación se recomienda la monitorización, para comprobar cómo se está llevando a cabo la implantación. Del mismo modo que si se desea realizar pequeños cambios futuros, introduciendo las modificaciones en la evaluación se pueden ofrecer soluciones para mantener los niveles de seguridad. Por el contrario si los cambios son drásticos se recomienda volver a realizar el análisis completo.

3.3 Dimensiones relevantes

Para llevar a cabo la primera etapa, *risk identification*, se han identificado 5 dimensiones de actuación para la gestión del riesgo asociado al movimiento de material, como son la estructura de la zona, las condiciones del entorno, el movimiento del material las decisiones de gestión y el tipo de material. En los diseños de calidad el flujo de material se ha analizado previamente, consiguiendo movimientos cortos y controlados entre secciones, donde se intenta reducir el número de retrocesos, tipos de flujo y cruces entre ellos. Separar la evaluación de riesgos en 5 dimensiones permitirá conocer la causa que lo origina. A continuación se describe brevemente cada uno:

- Estructurales. Cada zona se evaluará en función de la estructura del pasillo de los medios de manutención y del personal, como por ejemplo el número de carriles o cruces de flujo.
- Decisiones de gestión. Actividad a la que se destine el pasillo, el tipo de flujo y medios de manutención utilizados.
- Movimiento de material. Este aspecto valorará el tráfico existente en el pasillo.
- Condiciones del entorno. Las condiciones del entorno de circulación tendrán un efecto a la hora de desarrollar las actividades, como por ejemplo una correcta señalización o el estado del pavimento.
- Tipo de material transportado. Según si se transporte en vacío o cargado, el modo de hacerlo, o el desplazamiento, se puede considerar que una sección es más o menos peligroso para los trabajadores.

3.3 Propuesta de cuestionario y su uso

Se ha propuesto un cuestionario como medio para cuantificar el riesgo durante la etapa de *risk estimation*. En éste, se abordan diferentes consideraciones en cada dimensión, las cuales recibirán una puntuación según sus características. A continuación se describe el cuestionario (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.2**):

- Estructurales. Describe las características del pasillo, como por ejemplo si estos son de doble sentido o tienen cruce de flujos. Para completarla, se proponen algunos prototipos de pasillo e intersecciones para autocompletar el cuestionario, únicamente seleccionando el tipo de zona del que se trata. La Tabla 3 muestra algunos de los patrones, así como la valoración propuesta.
- Decisiones de gestión. La actividad a la que se destine el pasillo, por ejemplo si circulan medios de manutención y operarios o si es una zona destinada únicamente a la circulación.
- Movimiento de material. Este aspecto valorará los medibles de la ingeniería del tráfico que se propondrán más adelante. En cada caso de estudio será conveniente utilizar uno o varios tipos de

medibles. En el ejemplo de la Tabla se muestra la intensidad (número de movimientos por hora promedio).

- Condiciones del entorno. Las condiciones del entorno de circulación tendrán un efecto a la hora de desarrollar las actividades, así como en la velocidad que tomen las carretillas entre otros.
- Tipo de material transportado. Según lo que se transporte y el modo de hacerlo, el desplazamiento se puede considerar más o menos peligroso para los trabajadores.

La columna valoración se completa en función de cada tipo de consideración, generalmente de manera numérica indicando la cantidad, si/no, cualitativamente (las indicadas con un asterisco) indicando si ‘muy bueno, bueno, mejorable, deficiente y muy deficiente’, o de qué tipo de elementos consta.

Cada valoración se multiplicará por la columna puntuación, obteniendo así una puntuación final. En algunos casos se ha estimado una puntuación máxima para determinadas consideraciones. Las valoraciones cualitativas llevan asociadas un valor numérico en el caso de haber recibido una valoración no buena, penalizando de este modo la puntuación del riesgo. La suma total máxima de puntos para la estimación del riesgo es de 200. Cada dimensión de trabajo sumará la cantidad total obtenida, que al compararlo con el máximo posible puede dar una estimación de si es necesario abordar con mejoras dichos elementos.

Tabla 2. Cuestionario para la evaluación de riesgos

| ID | PUNTAJACIÓN MÁX | PUNTAJACIÓN | CONSIDERACIONES | VALORACIÓN | |
|----------|-----------------|--------------|---|--------------|--|
| | 50 | 25% | ESTRUCTURALES | TOTAL | |
| 1 | 40 | 20% | PASILLO VEHÍCULOS | | |
| 1.1 | | | Tipo de vía | | |
| 1.2 | 3 | 1 | Max nº carriles por pasillo | | |
| 1.3 | 8 | 1 | Número de cruces | | |
| 1.4 | 4 | 1 | Número de direcciones | | |
| 1.5 | 1 | 1 | Doble sentido (no=0; si=1) | | |
| 1.6 | 2 | 1 | Número de vías con doble sentido | | |
| 1.7 | 1 | 1 | Giros (no=0; si=1) | | |
| 1.8 | 2 | 1 | Número de pasillos con giro | | |
| 1.9 | 8 | 1 | Número de <i>joints</i> de pasillos | | |
| 1.10 | 4 | 1 | Número de <i>splits</i> de pasillos | | |
| 1.11 | 1 | 1 | Pendiente (no=0; si=1) | | |
| 1.12 | 3 | 3 | Obstáculos en el camino (no=0; si=1) | | |
| 1.13 | 3 | 1 | Elementos delimitadores de las vías (señalización; rotonda; mediana; no existe) | | |
| 1.14 | -8 | -1 | Número de cruces señalizados (stops) | | |
| 1.15 | -8 | -1 | Número de <i>joints</i> señalizados (ceda el paso) | | |
| 2 | 10 | 5,00% | PASILLO PEATONAL | | |
| 2.1 | 3 | 1 | Max nº carriles por vía | | |
| 2.2 | 1 | 1 | Cruces con otros flujos (no=0; si=1) | | |
| 2.3 | 2 | 1 | Número de direcciones | | |
| 2.4 | 1 | 1 | Doble sentido (no=0; si=1) | | |
| 2.5 | 1 | 1 | Giros (no=0; si=1) | | |
| 2.6 | 1 | 1 | Pendiente (no=0; si=1) | | |
| 2.7 | 1 | 1 | Obstáculos en el camino (no=0; si=1) | | |

Layout design considering safety issues
 Sáez Más, A.; García Sabater, J.P

| | 50 | 25% | GESTIÓN/DECISIONALES | TOTAL | |
|----------|--|--------------|--|-------|--|
| 3 | 25 | 12,5% | TIPO DE FLUJO | | |
| 3.1 | 2 | 2 | Motorizado (no=0; si=1) | | |
| 3.1.1 | 2 | 2 | Elevadoras (no=0; si=1) | | |
| 3.1.2 | 1 | 1 | Remolcadoras (no=0; si=1) | | |
| 3.1.1 | 2 | 2 | Vehículo largo (no=0; si=1) | | |
| 3.1.4 | 3 | 3 | AGV (no=0; si=1) | | |
| 3.2 | 2 | 2 | No motorizado (no=0; si=1) | | |
| 3.1 | 4 | 4 | Mixto (no=0; si=1) | | |
| 3.4 | 4 | 1 | Elementos delimitando el flujo mixto (señalización; barreras; no existe) | | |
| 3.5 | 5 | 5 | Número de tipos | | |
| 4 | 25 | 12,5% | ACTIVIDAD REALIZADA (no=0; si=1) | | |
| 4.1 | 3 | 3 | Zona de paso | | |
| 4.2 | 5 | 5 | Zona de paso transportando material | | |
| 4.3 | 7 | 7 | Carga/Descarga/Maniobra en el pasillo | | |
| 4.4 | 3 | 3 | Paradas | | |
| 4.5 | 7 | 7 | Entradas y salidas desde otras áreas | | |
| | 50 | 25% | PRODUCCIÓN | TOTAL | |
| 5 | 50 | 25% | INTENSIDAD DEL FLUJO ESTIMADA(mov/h) (no=0; si=1) | | |
| 5.1 | 5 | 5 | <13 | | |
| 5.2 | 8 | 8 | 13-25 | | |
| 5.3 | 13 | 13 | 26-33 | | |
| 5.4 | 18 | 18 | 34-42 | | |
| 5.5 | 30 | 30 | >43-85 | | |
| 5.6 | 40 | 40 | 86-130 | | |
| 5.7 | 50 | 50 | >130 | | |
| | 32 | 16% | ENTORNO | TOTAL | |
| 6 | 10 | 5% | VELOCIDAD MEDIA OBSERVADA (m/s) (no=0; si=1) | | |
| 6.1 | 1 | 1 | <2 | | |
| 6.2 | 3 | 3 | 2-5 | | |
| 6.3 | 6 | 6 | 6-10 | | |
| 6.4 | 10 | 10 | >10 | | |
| 7 | 22 | 11% | CONDICIONES DEL ENTORNO | | |
| 7.1 | 4 | 1 | Pavimento * | | |
| 7.2 | 4 | 1 | Señalización horizontal necesaria * | | |
| 7.3 | 4 | 1 | Señalización vertical necesaria * | | |
| 7.4 | 4 | 1 | Ancho de pasillo * | | |
| 7.5 | 3 | 1 | Visibilidad * | | |
| 7.6 | 3 | 1 | Iluminación * | | |
| 7.7 | 2 | 1 | Cambios de iluminación (interior-exterior) (no=0; si=1) | | |
| | 18 | 9% | MATERIAL TRANSPORTADO | TOTAL | |
| 8 | 9 | 4,5% | TIPO DE UNIDAD DE CARGA (no=0; si=1) | | |
| 8.1 | 2 | 2 | Skids | | |
| 8.2 | 1 | 1 | Palet | | |
| 8.3 | 2 | 2 | Rack | | |
| 8.4 | 1 | 1 | Cajas | | |
| 8.5 | 3 | 3 | Contenedor | | |
| 9 | 9 | 4,50% | CONDICIONES DEL TRANSPORTE DE MATERIAL | | |
| 9.1 | 3 | 1 | Estabilidad * | | |
| 9.2 | 3 | 1 | Embalaje del material * | | |
| 9.3 | 3 | 1 | Sobresale del medio de manutención * | | |
| | Valoración personal | | | | |
| | Suma de puntos obtenidos por temática | | | | |
| | Suma de puntos obtenidos por área de actuación | | | | |

Tabla 3. Algunos de los patrones de pasillos propuestos para auto completar el cuestionario

| | B | E | I | J | O | P |
|-----------------------------------|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | |
| Max nº carriles por vía | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Número de cruces | 0 | 0 | 1 | 1 | 4 | 0 |
| Número de direcciones | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Doble sentido (no=0; si=1) | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Número de vías con doble sentido | 1 | 1 | 0 | 1 | 2 | 2 |
| Giros (no=0; si=1) | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Número de pasillos con giro | 0 | 2 | 2 | 1 | 4 | 1 |
| Número de joints de pasillos | 0 | 0 | 1 | 1 | 4 | 4 |
| Número de splits de pasillos | 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 0 |
| Cruces señalizados (stops) | | | | | | |
| Joints señalizados (ceda el paso) | | | | | | |

3.4 Medibles para la dimensión del movimiento de material

De acuerdo con Gaither y Frazier (2000) la Ingeniería de tráfico o de tránsito es una rama de la ingeniería del transporte que trata sobre la planificación, diseño y operación de tráfico en las calles, carreteras y autopistas, sus redes, infraestructuras, tierras colindantes y su relación con los diferentes medios de transporte consiguiendo una movilidad segura, eficiente y conveniente tanto de personas como de mercancías.

Los pasillos de plantas industriales, al igual que las carreteras, tienen una capacidad que limita la cantidad de vehículos/medios de manutención que pueden atravesarlos durante un periodo de tiempo. Esto es especialmente importante en el proceso de dimensionar pasillos y al eliminar la congestión, ya que a menudo problemas en la seguridad o daño del producto se debe a que una esquena o cruce es demasiado estrecho para el volumen de tráfico que alberga (Sly, 1995a).

Para seleccionar los medibles para cuantificar el tráfico en los pasillos se han extrapolado los medibles de la ingeniería del tráfico de carreteras expuestos en HCM 2010 (Highway Capacity Manual) (2010). Este manual contiene conceptos, directrices y procedimientos para el cálculo de capacidad y calidad de servicios de varias instalaciones de carreteras. De él se han seleccionado los siguientes medibles que, dependiendo del caso de estudio, se podrán aplicar para medir el movimiento de material (Board, 2010),:

- *Intensidad de tráfico o de circulación*, es el número de vehículos que pasan por encima de un perfil determinado o sección de un carril o carretera durante un intervalo dado de tiempo normalmente de una hora o inferior.
- *Volumen*, es el número total de vehículos que pasan por encima de un perfil determinado o sección de un carril o carretera durante un intervalo de tiempo dado. Los volúmenes se pueden expresar en relación a periodos anuales, diarios, horarios o subhorarios.
- Se denomina *densidad de tráfico* al número de vehículos que hay en un tramo de carretera por unidad de longitud para un instante dado (veh/Km). Existe un valor máximo de la densidad de tráfico, que se obtiene cuando todos los vehículos están en fila, sin huecos entre ellos y que depende, lógicamente, de la longitud de los vehículos. En estas condiciones los vehículos estarán parados.
- La *capacidad* de una vía indica la máxima intensidad horaria de personas o vehículos que tienen una probabilidad razonable de atravesar un carril o calzada durante un periodo de tiempo y bajo unas condiciones de la plataforma, tráfico y sistemas de regulación.

- *Tiempo de recorrido*, tiempo empleado por un vehículo en desplazarse entre dos puntos fijos separados una cierta longitud. Cuando se mide el tiempo de recorrido conviene distinguir el tiempo de vehículo en movimiento y el tiempo de vehículo parado.
- La *demora* por detención es el tiempo que un vehículo permanece parado en una cola mientras espera su turno para pasar por la intersección.
- El *intervalo* es el tiempo transcurrido entre el paso de dos vehículos sucesivos por una misma sección.
- El *nivel de servicio* es por definición una medida cualitativa descriptiva de las condiciones operativas de un flujo viario, y de su percepción por los pasajeros (I/C). Cuando la intensidad de tráfico llega a igualar la capacidad de una carretera, las condiciones de operación en la misma se vuelven deficientes con velocidades de circulación pequeñas y frecuentes paradas y demoras.

3.4 Elementos que reducen la peligrosidad

Para reducir los niveles de riesgo y proponer medidas de implantación (*risk management*) en determinadas zonas con exceso de tráfico se pueden abordar los puntos del cuestionario que no hayan recibido una buena puntuación, así como añadir elementos de señalización que reduzcan el índice de peligrosidad. Entre otros se pueden utilizar semáforos, señales de stop y ceda el paso, rotondas, barreras de seguridad, medianas, señalización horizontal, mejorar visibilidad, iluminación, aumentar las separación de carriles, cambiar el flujo de material y la actividad de destino entre otros.

1.5 Herramienta para la obtención de los medibles del movimiento de material

Una vez identificados los medibles, es importante seleccionar correctamente la herramienta que los estima y maneja en las etapas *risk estimation*, *risk evaluation* y *risk management*. Las plantas de montaje suelen ser de elevada complejidad, con mezcla de modelos y múltiples variedades de producto final. Esto conlleva la existencia de miles de referencias circulando a través de ellas utilizando los más diversos medios de manutención. De manera que se hace casi imposible evaluar el impacto del flujo de materiales en una planta de montaje como un conjunto sin una herramienta de diseño específica para realizar la tarea (Sly, 1995a).

Una aproximación que se puede valorar es la de estimar el flujo de manera estática, representando cada uno de los flujos y cuantificándolos en el caso en cuestión con ayuda de los valores de movimientos generados por consumo de cada referencia. Para ello se puede utilizar las herramientas sencillas como un diagrama Espaguetti o utilizar otras más sofisticadas como Factory Flow®. La primera es una técnica para optimizar cualquier proceso, flujo de material o flujo de información. Según el fabricante, el Factory flow® es un sistema de manipulación de materiales gráficos que permite optimizar la distribución de una fábrica según las distancias, la frecuencia y el coste del flujo de materiales de una manera estática. FactoryFLOW® representa los flujos con diagramas de ancho y color variable, que resultan especialmente útiles para presentar esta información (Sly, 1995a).

Sin embargo por su naturaleza el flujo es dinámico, y es por ello que parece más conveniente utilizar herramientas de simulación dinámicas. En este trabajo se utiliza SIMIO®, un software de simulación por eventos discretos (DES). La DES permite considerar aspectos dinámicos, como puede ser la variación en el mix de producción y la secuencia, y sobre todo permite analizar no sólo los valores medios para los medibles, sino también los valores extremos. La representación de los movimientos y los cálculos estáti-

cos se pueden utilizar para validar el modelo de simulación. Wohlgemuth, Page, y Kreutzer (2006) sugieren combinar la simulación por eventos discretos con MFA, ya que ambas hacen uso de modelos informáticos de producción y procesos de distribución.

La simulación por eventos discretos (DES) ha sido ampliamente utilizada para modelar líneas de montaje (Wang, Li, y Wang, 2011). En particular, la industria del automóvil ha utilizado esta herramienta e manera extensiva, y es habitual encontrar trabajos que documentan simulaciones para evaluar el impacto de varios diseños de líneas de montaje (Gujarathi, Ogale, y Gupta, 2004). La gran complejidad de estos sistemas, lo que hace que los métodos analíticos resulten menos eficientes, mientras que la simulación por eventos discretos es una herramienta efectiva para evaluar diferentes alternativas de *layout* y mostrar y resolver problemas de diseño de sistemas de manejo de materiales (Negahban y Smith, 2014). En este contexto la simulación juega un papel crítico como herramienta para resolver problemas, esta se puede usar para comprobar diferentes alternativas y escenarios *what-if*, teniendo en cuenta la complejidad de los sistemas de estudio, ya que proporciona una rigurosa representación de los sistemas reales (Banks, 1998).

4. Ejemplo de aplicación de la metodología a un caso de estudio

Esta metodología se va a aplicar a una planta del montaje del sector del automóvil en la que se va a realizar un rediseño de *layout*. Este caso de estudio se describe en detalle en Sáez Más, García Sabater, Morant Llorca, y Maheut (In review), y hace referencia a un complejo sistema de aprovisionamiento de material a una planta de montaje del subconjunto motor y transmisión.

4.1 Risk identification

En la planta objeto de estudio se ha observado que la cantidad de movimientos necesarios para aprovisionar la línea de montaje es muy elevada. En función de las suposiciones de la tabla 1 y las estimaciones de la tabla 2, durante una hora de funcionamiento de la línea se pueden realizar más de 175 movimientos de carretilla transportando racks a lo largo de la planta.

Tabla 4. Suposiciones para estimar el consumo de racks de manera estática.

| Assumptions | |
|--|-----|
| Engines per rack (units) | 6 |
| Manual Transmissions per rack (units) | 20 |
| Automatic Transmissions per rack (units) | 6 |
| Engines production per hour (units) | 100 |
| % Automatic Engines | 50% |

Tabla 5. Estimación de consumo de racks por hora de manera estática.

| Product | Movements | Nº movements per hour |
|----------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Manual Engines | • Fill rack: Round trip | $(100*50\%)/6 = 8,3$ Racks |
| | • Empty rack: Round trip | $8.3 * 4$ trips = 33.2 mov/hour |
| Manual Transmissions | • Fill rack: Round trip | $(100*50\%)/20 = 2.5$ Racks |
| | • Empty rack: Round trip | $2.5 * 4$ trips = 10 mov/hour |

| | | |
|-------------------------|---|---|
| Automatic Engines | <ul style="list-style-type: none"> • Fill rack: Round trip • Empty rack: Round trip | $(100*50\%)/6 = 8.3$ Racks $8.3 * 4$ trips = 33.2 mov/hour |
| Automatic Transmissions | <ul style="list-style-type: none"> • Fill rack: Round trip • Empty rack: Round trip | $(100*50\%)/6 = 8.3$ Racks $8.3 * 4$ trips = 33.2 mov/hour |
| E+T Automatic Engines | <ul style="list-style-type: none"> • Fill rack: Round trip • Empty rack: Round trip | $(100*50\%)/3 = 16.6$ Racks $16.6 * 4$ trips = 66.4 mov/hour |

Más de tres carretillas por minuto, gestionadas de modo asíncrono son una fuente relevante de riesgo para los trabajadores asociado el exceso de tráfico de carretillas en los pasillos. Además se pueden intuir riesgos de choque entre los propios medios de mantenimiento. Por último el hecho de que por un pasillo circulen más carretillas de la capacidad deseada, puede provocar interrupciones y retrasos en el suministro.

Un retraso en el suministro de material, en este caso el subsistema motor más transmisión, en la línea de montaje final de automóviles repercute en la parada de la línea de montaje, que supone interrumpir el trabajo de centenares de personas. Por todo ello es vital, a la hora de diseñar/rediseñar una planta de montaje, considerar un análisis del flujo de material y las repercusiones de sus accidentes en el resto de la fábrica. En este caso se considera que existe un riesgo, cuando un pasillo alcanza unos niveles elevados de movimientos que superan los umbrales de capacidad definidos como peligrosos o si la estimación del riesgo mediante el cuestionario no ha resultado favorable.

4.2 Risk estimation

Para estimar el riesgo y cuantificarlo, primero se han de seleccionar lo medibles que serán objeto de estudio. En este caso va a ser la intensidad (número de movimientos de medios de mantenimiento por hora) y se va a comparar con unos umbrales de capacidad. Los intervalos de capacidad nos indicarán si una zona está más o menos congestionada con colores (figura 4). Los umbrales de capacidad fueron definidos por la empresa en cuestión y ayudarán en el análisis del flujo de material.

Las barras de colores de la figura 4 identifican el número de movimientos observado durante la última hora de la simulación en cada uno de los pasillos de la planta. Para ello, con ayuda del software de simulación, se han programado los procesos necesarios y representado visualmente mediante elementos andon el estado de cada pasillo en la última hora, pudiendo obtener valores promedio de todo el día o simulación.

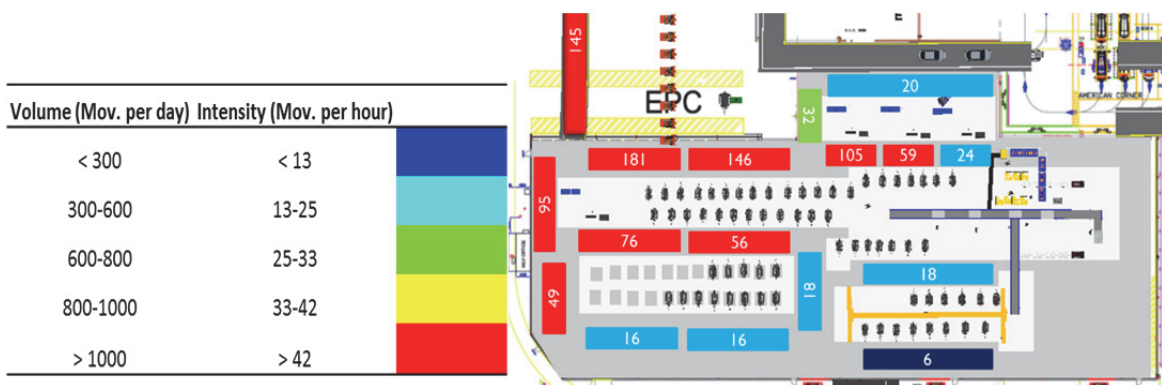


Figura 4. Umbrales de capacidad de los pasillos y ejemplo de barras de colores en pasillos.

El cuestionario se ha aplicado en zonas en las que se ha detectado mayores conflictos, giros, cruces y exceso de tráfico entre otros, obteniendo para cada una de ellas la puntuación del riesgo asociado. Las zonas de mayor riesgo coinciden con las zonas de mayor congestión de carretillas en la figura 4.

4.3 Risk evaluation

Los indicadores han permitido identificar qué zonas de la planta presentan mayor congestión y en qué momento del día. Por otra parte, el cuestionario ha ayudado a identificar riesgos potenciales en cada pasillo. Estas zonas de mayor peligro se han estudiado con detenimiento para poder recomendar propuestas de mejora al *layout* inicial. Los principales cambios propuestos se describen en Sáez Más et al. (In review). Estas propuestas de rediseño del *layout* y gestión han sido enfrentadas entre sí y simuladas, comprobando más de 300 alternativas diferentes, que además se han simulado con diferentes escenarios de mix de producción. De cada uno de ellos se ha obtenido el total de movimientos generados en cada pasillo, pudiéndose comprobar qué propuesta aporta mejores resultados, y cuál conllevará beneficios al futuro funcionamiento de la planta.

A la hora de seleccionar qué resultados eran mejor que otros, se ha tenido en cuenta el umbral de intensidad promedio alcanzado en cada tramo y el flujo lógico de las carretillas, intentando evitar movimientos innecesarios en vacío, así como las puntuaciones obtenidas en el cuestionario. Finalmente, de estas alternativas, se han seleccionado 3 opciones, además de la propuesta inicial, que mejoran los resultados. La figura 5 muestra el número de movimientos promedio por pasillo a lo largo de un día de simulación.

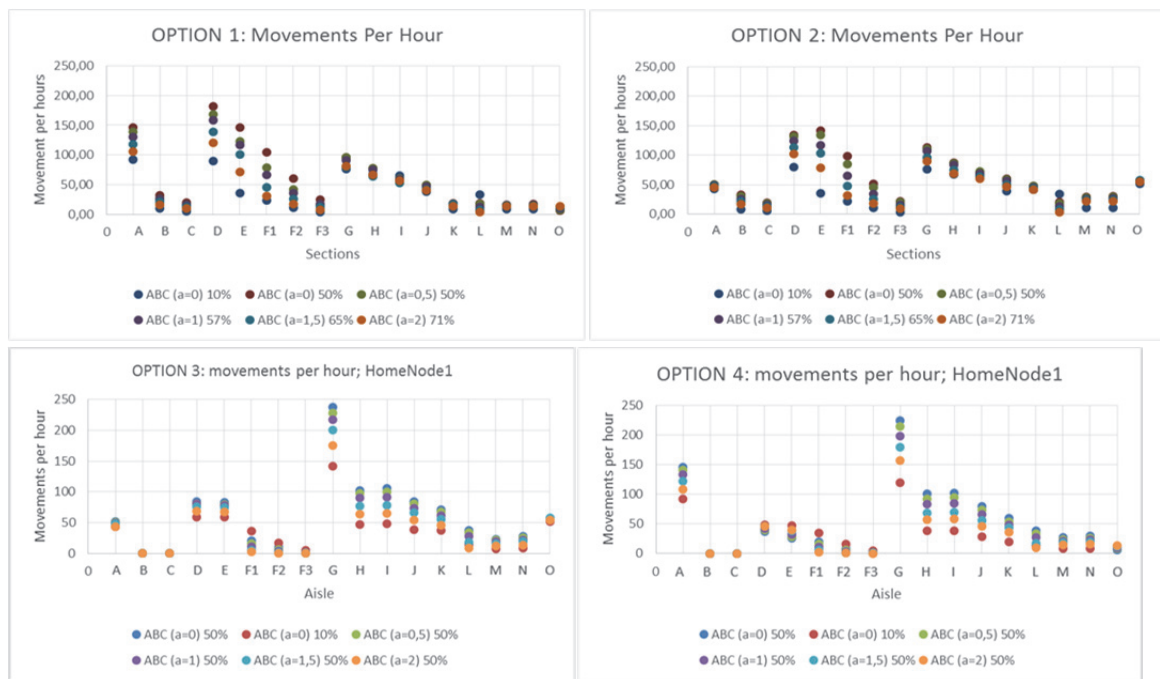


Figura 5. Movimientos por hora promedio en cada zona para cada una de las opciones finales.

4.4 Risk management

En esta etapa se proponen mejoras de implantación y recomendaciones en base a la evaluación previa. Durante la evaluación de los resultados, se ha detectado que un gran porcentaje de movimientos se deben al retorno de las carretillas vacías a su nodo de origen, a la espera de recibir otra orden. Como recomen-

dación, se ha decidido comprobar cómo afectaría a los resultados si las carretillas en lugar de volver a su lugar de descanso, estrategia “go home”, se mantuvieran en el lugar donde terminan la acción, a la espera de recibir otra orden de manera inalámbrica por el sistema de manejo de materiales, estrategia “remain in place”. Los resultados muestran que los tramos que presentaban una mayor congestión, reducen la intensidad promedio considerablemente. La figura 6 muestra los resultados para la opción 1 donde se aprecia la mejora, lo mismo ocurre para el resto de opciones.



Figura 6. Comparativa estrategia “go home” y “remain in place” para la propuesta de layout inicial.

Para las opciones 3 y 4 (Figura 5), son las que mantienen unos niveles medios de intensidad más estables que en el resto de opciones seleccionadas, sin embargo presentan un pasillo (G) con una intensidad elevada que debe ser resuelto. En ambas opciones, además de cambiar la estrategia de los carretillos a “remain in place”, se propone atacar el problema estructural creando una rotonda en la zona de conexión de la planta de almacenaje con la de montaje. Otra propuesta para la gestión del riesgo es el uso de pasos de cebra así como restringir la circulación a un solo sentido para algunos pasillos. Esto evitaría cruces frontales entre carretilleros, reduciendo el riesgo de colisión. La figura 7 muestra los cambios propuestos en cuanto a rotondas, bidireccionalidad y trayectoria entre otros, para las opciones 3 y 4.

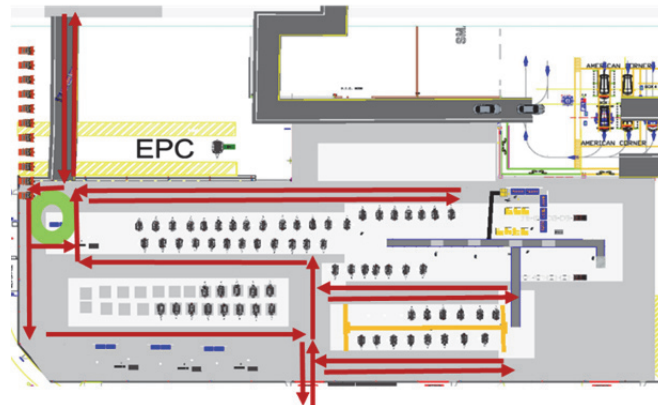


Figura 7. Propuesta de mejora para las opciones 3 y 4: rotonda y pasillos unidireccionales.

Este cambio se ha evaluado de nuevo con el cuestionario, obteniendo una menor puntuación al reducir el número de cruces y aumentar la señalización de este. La figura 8 muestra los cambios en la puntuación del riesgo obtenido al aplicar el cuestionario antes y después de la propuesta de mejora de la figura 7. La puntuación de gestión también se reduce al destinar la actividad de ese cruce únicamente al transporte de material y ya no a la entrada/salida desde otras zonas (estaciones, picking etc.). La valoración de producción se mantiene, debido a que la producción y la trayectoria sigue siendo la misma, lo mismo ocurre con el bloque de material transportado. En cambio el aspecto del entorno reduce su riesgo al mejorar la señalización de esta zona.

Por otra parte para atacar la elevada puntuación del bloque de producción, se puede intentar reducir el número de viajes de carretillas entre ambas plantas, implementando el remolque de racks en más de un por viaje. En base a estas propuestas de implementación se puede seleccionar un diseño de *layout* que mantenga niveles controlados de movimientos y de riesgo en los pasillos.

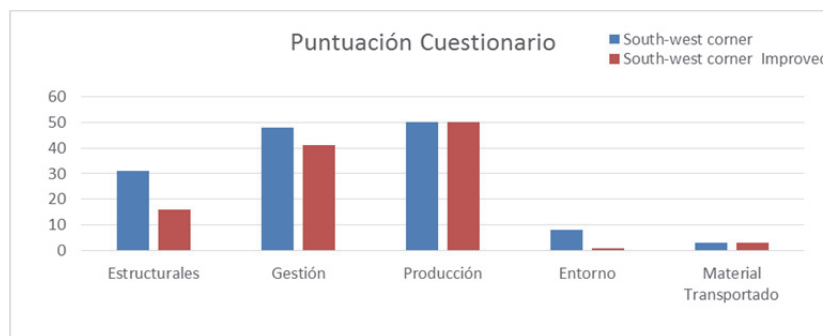


Figura 8. Comparación de puntuación obtenida al aplicar el cuestionario antes y después de las mejoras en la esquina Suroeste.

4.5 Risk monitor

Una vez planteadas las propuestas de mejora y seleccionado el *layout* que mejor se amolde a las necesidades, se plantea la monitorización. Y es que, en la etapa post-implantación manteniendo, los resultados del cuestionario y el modelo de simulación, e introduciendo datos reales de producción, se puede comprobar la situación del riesgo. Del mismo modo que si la planta quisiera realizar pequeños cambios futu-

ros, al introducir las modificaciones en el modelo se puede proporcionar soluciones para mantener los niveles de seguridad o bien si los cambios son drásticos volver a realizar el análisis completo.

5. Limitaciones a la metodología

Este proyecto de investigación surgió como medio para que el cliente alcanzara uno de los medibles de seguridad de la compañía *forklift free*. Es decir, tratar de restringir el acceso de carretillas elevadoras en zonas de montaje, de trabajo y paso de personal.

Más adelante se aplicó esta metodología de gestión del riesgo del flujo de material a otro proyecto de aprovisionamiento de una línea de montaje de vehículos con mezcla de modelos, donde se tenían diferentes piezas con diferentes tipos de suministro (*call*, secuenciado y *refilling* entre otros). Los productos se encuentran distribuidos en diferentes almacenes alrededor de la planta, y desde allí diferentes grupos de carretillas suministran el pedido al *Point Of Fit* de la línea.

En este caso de estudio, el objeto era analizar el flujo de material y gestionar el riesgo originado, donde se ampliaron los medibles utilizados previamente. Por una parte se distinguió entre pasos por (pasillo, cruce y punto de paso) llamado intensidad (mov/hora), del volumen (mov/día). Esta última ayudó identificar cruces de mayor riesgo y evaluar el total de entradas/salidas de la planta a lo largo de un día. Con ayuda de otro medible, el número de carretillas que han salido cargadas desde cada almacén y el volumen de paso por punto de acceso a la planta (mov/día), se pudo validar la simulación. Ya que por un lado se comprobó que el total de entradas y salidas se correspondían con los envíos efectuados desde el almacén y los calculados por la simulación, así como con los resultados esperados de los cálculos estáticos estimados con la demanda.

La densidad (veh/km), también fue introducida en este proyecto pero con una modificación, se calcularon los vehículos por pasillo en lugar de por unidad de longitud a lo largo del tiempo, siendo el medible final utilizado (vehículos/pasillo). Este medible, al igual que el resto se revisaba en cada hora de simulación para obtener la media temporal y el valor máximo de cada hora. Por otra parte se introdujo el medible tiempo de recorrido, lo que permitía diferenciar entre el tiempo de transporte de carretillas (*busy*) y el tiempo de recorrido en vacío (*idle*). De este modo se estimaron la cantidad de carretillas necesarias para abastecer a la línea sin retrasos, al conocer el rendimiento de estas y porcentaje de uso deseado.

6. Conclusiones

En esta investigación se ha propuesto un protocolo de actuación para la gestión del riesgo que generan los movimientos de flujo de material en plantas industriales. Este riesgo se debe principalmente al humano y estratégico de la empresa, pudiendo ocasionar atropellamientos, choques o retrasos en el suministro. Para evitar este tipo de riesgos en el futuro, es necesario realizar un análisis del flujo de materiales durante la etapa del diseño/rediseño de la distribución en planta.

Esta metodología cuenta con 5 etapas, *risk identification*, *risk estimation*, *risk evaluation*, *risk management* y *risk monitor*. Una vez identificado el riesgo durante la primera etapa, este ha de ser estimado. Para ello se han identificado y extrapolados medibles de la ingeniería del tráfico en carreteras. Estos medibles han sido principalmente, la intensidad, el volumen, la densidad, tiempo de recorrido y la capacidad de los

pasillos. Así mismo también se ha propuesto un cuestionario para evaluar otras áreas de riesgo además de los generados por la producción del sistema en sí, como son las estructurales, del entorno, tipo de material transportado y de gestión. Gracias a estos valores se evalúa el riesgo en zonas identificadas como peligrosas y se proponen medidas de implementación para aumentar su seguridad.

Esta metodología se ha validado aplicándola a un caso de estudio sobre una planta de montaje de motores y transmisiones, así como en una planta de montaje final de vehículos con mezcla de modelos. El uso de esta metodología de gestión del riesgo a través de analizar el flujo de material ha sido aplicado con éxito en ambos proyectos, contribuyendo a entender los sistemas en profundidad al analizar el flujo de material y conocer el origen, ruta y destino final de cada una de las referencias. Así mismo también se ha analizado el riesgo existente, consecuencia del aprovisionamiento, y gestionarlo de manera adecuada, proponiendo medidas para contribuir a mejorar la seguridad de la planta. Gracias a todo lo anterior ha sido posible evaluar *layouts* y proponer mejorar para asegurar un diseño de distribución con un flujo de material controlado y seguro.

Como líneas futuras de investigación se propone ver la repercusión que tendrán el resto de medibles de la ingeniería del tráfico expuestos y no utilizados, identificar otros nuevos en el aprovisionamiento a líneas de montaje con mezcla de modelos, así como extrapolar esta metodología de gestión de riesgo en plantas de montaje a otro tipo de entornos.

7. Referencias

- Aven, T. (2008). Risk Management. En K. B. Misra (Ed.), *Performability Engineering* (pp. 719-740). Springer. Recuperado a partir de <http://www.springer.com/us/book/9781848001305>
- Aven, T., y Renn, O. (2010). *Risk , Governance and Society*. Springer. Recuperado a partir de <http://goo.gl/Kqybdb>
- Banerjee, D., Syal, M., y Hastak, M. (2006). Material Flow-Based Facility Layout Analysis of a Manufactured Housing Production Plant. *Journal of Architectural Engineering*, 12(4), 196-206. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0431\(2006\)12:4\(196\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0431(2006)12:4(196))
- Banks, J. (1998). *Handbook of simulation*. Wiley Interscience.
- Board, T. R. (2010). *Highway capacity manual*. Environmental Protection.
- Brunner, P. H., y Rechberger, H. (2004). *Practical handbook of material flow analysis*.
- Chapman, R. J. (2001). The Controlling Influences on Effective Risk Identification and Assessment for Construction Design Management. *International Journal of Project management*, 19, 19, 147-160. [http://doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00070-8](http://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00070-8)
- Claypool, E. G. (2011). Assessing and mitigating risk in a design for supply chain. *Industrial Engineering*. Recuperado a partir de http://d-scholarship.pitt.edu/6726/1/EGClaypool_4.2011.pdf
- Cozzani, V., Tugnoli, A., y Salzano, E. (2007). Prevention of domino effect: From active and passive strategies to inherently safer design. *Journal of Hazardous Materials*, 139(2), 209-219. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.041>
- Delgado Sobrino, D. R., Holubek, R., Košťál, P., y Ružarovský, R. (2014). Layout Redesign and Material Flow Analysis at a Flexible Assembly Cell Supported by the Use of Simulation. *Applied Mechanics and Materials*, 693, 22-29. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.693.22>
- Díaz Gómez, J., y Silva Leal, J. (2015). Material flow analysis in human systems - A review. *Escuela de*

Ingeniería de Antioquia, 12(23), 149-161.
<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.14508/reia.2015.12.23.149-161>

- Esnard, A.-M., y Iuchi, K. (2008). Disaster Prevention and Management : An International Journal Article information : *Disaster Prevention and Management*, 16(2), 178-187. <http://doi.org/10.1108/09653560710739504>
- Ficko, M., y Palcic, I. (2013). Designing a layout using the modified triangle method, and genetic algorithms. *International Journal of Simulation Modelling*, 12(4), 237-251. [http://doi.org/10.2507/IJSIMM12\(4\)3.244](http://doi.org/10.2507/IJSIMM12(4)3.244)
- Gaither, N., y Frazier, G. (2000). *Administración de producción y operaciones*. International Thomson.
- Gujarathi, N. S., R.M.Ogale, y T.Gupta, A. (2004). Production Capacity Analysis of a Shock Absorber Assembly Line Using Simulation. En *In Proceeding of the 2004 Winter simulation Conference* (pp. 1213-1217).
- Guo, H., y Zhang, T. (2016). Sinks of steel in China—addition to in-use stock, export and loss. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 10(1), 141-149. <http://doi.org/10.1007/s11783-014-0696-3>
- Iqbal, M., y Hashmi, M. S. J. (2001). Design and analysis of a virtual factory layout. *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1-3), 403-410. [http://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00908-6](http://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00908-6)
- Islier, A. A. (1998). A genetic algorithm approach for multiple criteria facility layout design, International. *Journal of Production Research*, 36(6), 1549-1569. <http://doi.org/10.1080/002075498193165>
- Jerbi, A., Chtourou, H., y Maalej, A. Y. (2010). Comparing functional and cellular layouts using simulation and Taguchi method. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21(5), 529-538. <http://doi.org/10.1108/17410381011046940>
- Jithavech, I., y Krishnan, K. K. (2010). A simulation-based approach for risk assessment of facility layout designs under stochastic product demands. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(1-4), 27-40. <http://doi.org/10.1007/s00170-009-2380-5>
- Khan, F. I., y Abbasi, S. A. (1998). Inherently safer design based on rapid risk analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 11(6), 361-372. [http://doi.org/10.1016/S0950-4230\(97\)00042-9](http://doi.org/10.1016/S0950-4230(97)00042-9)
- Krishnan, K. K., Jithavech, I., y Liao, H. (2009). Mitigation of risk in facility layout design for single and multi-period problems. *International Journal of Production Research*, 47(21), 5911-5940. <http://doi.org/10.1080/00207540802175337>
- Krolczyk, J. B., Krolczyk, G. M., Legutko, S., Napiorkowski, J., Hloch, S., Foltys, J., y Tama, E. (2015). Material flow optimization – a case study in automotive industry. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, 22(6), 1447 - 1456. <http://doi.org/10.17559/TV-20141114195649>
- Leveson, N. (2004). A new accident model for engineering safer systems. *Safety Science*, 42(4), 237-270. [http://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00047-X](http://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00047-X)
- Longo, F., Mirabelli, G., y Papoff, E. (2005). Material Flow Analysis and Plant Lay-Out Optimization of a Manufacturing System. *2005 IEEE Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, 5(1), 107-116. <http://doi.org/10.1109/IDAACS.2005.283081>
- McLean, A., Yates, W., y Landaeta, R. (2014). Material flow improvement for change management in a manufacturing plant. En *Proceeding of the American Society for Engineering Management*.
- Mehrotra, N., Syal, M., and Hastak, M. (2005). Manufactured housing production layout design. *journal Architecture*, 11(1), 25–34.

- Misra, K. B. (2008a). Dependability Considerations in the Design of a System. En *Performability Engineering* (pp. 71-80). Recuperado a partir de <http://www.springer.com/us/book/9781848001305>
- Misra, K. B. (2008b). Risk Analysis and Management: An Introduction. En *Performability Engineering* (pp. 667-682). Recuperado a partir de <http://www.springer.com/us/book/9781848001305>
- Moatari-Kazerouni, A. (2015). *Integrating occupational health and safety in facility planning and layout design*. Université de Montréal. Recuperado a partir de https://publications.polymtl.ca/1594/1/2014_AfrozMoatariKazerouni.pdf
- Negahban, A., y Smith, J. S. (2014). Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2), 241-261. <http://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.007>
- O'Connor, P. D. T. (2008). A Practitioner's View of Quality, Reliability and Safety. En *Performability Engineering* (pp. 24-40). Recuperado a partir de <http://www.springer.com/us/book/9781848001305>
- OECD. (2008). Measuring material flows and resource productivity. *The OECD guide, Paris, OECD, 1*.
- Pasman, H. J., Jung, S., Prem, K., Rogers, W. J., y Yang, X. (2009). Is risk analysis a useful tool for improving process safety? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(6), 769-777. <http://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.08.001>
- Sáez Más, A., García Sabater, J. P., Morant Llorca, J., y Maheut, J. (In review). Assembly plant simulation to support decision-making. *Working Papers on Operations Management*.
- Sáez Más, A., García Sabater, J. P., Morant Llorca, J., y Maheut, J. (2016). Data-driven simulation methodology using DES 4-layer architecture. *Working Papers on Operations Management*, 7(1), 22-30. <http://doi.org/10.4995/wpom.v7i1.4727>
- Sendra, C., Gabarrell, X., y Vicent, T. (2007). Material flow analysis adapted to an industrial area. *Journal of Cleaner Production*, 15(17), 1706-1715. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.019>
- Shahrokhi, M., y Bernard, A. (2004). Risk assessment/prevention in industrial design processes*. En *International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (pp. 2592-2598). <http://doi.org/10.1109/ICSMC.2004.1400721>
- Sly, D., Grajo, E., y Montreuil, y B. (1996). Layout design and analysis software. Recuperado a partir de <http://goo.gl/cQ7NMx>
- Sly, D. P. (1995a). Material flow analysis of automotive assembly plants using factoryflow. En *Proceeding of the 1995 Winter Simulation Conference*.
- Sly, D. P. (1995b). Plant design for efficiency using autocad and factoryflow. *Simulation*, 555-562.
- Sly, D. P. (1996). A systematic approach to factory layout and design with FactoryPlan, FactoryOpt, and FactoryFlow. *Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference*, 584-587. Recuperado a partir de <http://goo.gl/gJ9I8U>
- Tugnoli, A., Khan, F., Amyotte, P., y Cozzani, V. (2008a). Safety assessment in plant layout design using indexing approach: Implementing inherent safety perspective. Part 1 - Guideword applicability and method description. *Journal of Hazardous Materials*, 160(1), 100-109. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.089>
- Tugnoli, A., Khan, F., Amyotte, P., y Cozzani, V. (2008b). Safety assessment in plant layout design using indexing approach: Implementing inherent safety perspective. Part 2-Domino Hazard Index and case study. *Journal of Hazardous Materials*, 160(1), 110-121. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.091>
- Verma, A. K., Srividya, A., y Karanki, D. R. (2010). *Reliability and Safety Engineering*. Springer. <http://doi.org/10.1007/978-1-84996-232-2>

- Wang, N., Li, S. Q., y Wang, J. F. (2011). A Data Driven Modeling and Simulation Methodology for Automotive Assembly Plant. *Advanced Materials Research*, 346(2012), 228-235. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.346.228>
- Wohlgemuth, V., Page, B., y Kreuzer, W. (2006). Combining discrete event simulation and material flow analysis in a component-based approach to industrial environmental protection. *Environmental Modelling and Software*, 21(11), 1607-1617. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.05.015>