

Selección de alternativas de redistribución de planta: un enfoque desde las organizaciones

Selecting Facility Re-layout alternatives: A managerial approach

Leonardo Rivera, Ph.D.

leonardo@icesi.edu.co

Luis Felipe Cardona

lfcardona@icesi.edu.co

Laura Vásquez Palacios

laura.vasquez@correo.icesi.edu.co

María Andrea Rodríguez

maria.rodriguez6@correo.icesi.edu.co

Universidad Icesi

Cali-Colombia

.....
Fecha de recepción: Octubre 26 de 2012

Fecha de aceptación: Noviembre 30 de 2012

Palabras clave

Distribución de planta;
redistribución de planta;
gerencia de proyectos.

Keywords

Facility layout; facility re-layout;
project management

Colciencias **2**

Resumen

Hoy en día los entornos industriales son altamente cambiantes, por lo que cada vez los proyectos de redistribución de planta son más comunes. Se hace necesario que las modificaciones que se les aplica a los diseños de planta tengan en cuenta la mayor cantidad de factores posible, para evitar que éstos se vuelvan obsoletos en un corto tiempo. Normalmente se ha dado mayor importancia a criterios cuantitativos para evaluar los diseños de planta, pero se considera que también deben incorporarse ciertos criterios cualitativos en dicho análisis. Adicionalmente, para realizar los proyectos de redistribución dentro de las empresas, se requieren métodos prácticos para tener en cuenta lo anterior, de tal forma que se pueda determinar un diseño eficiente sin invertir en ello cantidades de tiempo desmesuradas. Por ello en este artículo se propone una metodología de cuatro pasos para evaluar diferentes alternativas de diseño y seleccionar la mejor entre ellas.

Abstract

Re-layout projects had become very common, nowadays industrial environments are highly volatile. This is why re-layout projects should consider a lot of features therefore managers can make a good decision. Traditionally, managers had considered the quantitative criteria as the most important; we propose to include qualitative criteria to the analysis for a more robust decision. Besides, our proposal has incorporated a practical point of view; making our analysis a feasible study for managers. This article presents a four phases methodology to evaluate different re-layout alternatives in order to select the best one.

I. Introducción

El problema de distribución de planta (*Facilities Layout Problem, FLP*) consiste en el establecimiento de la organización física de los departamentos, equipos y demás recursos dentro de las instalaciones (Sing y Sharma, 2006; Meller y Gau, 1996). La mayor parte de la literatura se ha enfocado en el objetivo de reducir los costos de manejo de materiales. El enfoque tradicional del problema de distribución de planta es estático, –sólo tiene en cuenta un período u horizonte de planeación– y determinístico–asume demandas, flujos y relaciones constantes–, dos supuestos que, por lo general, no se adaptan a la realidad de las empresas. Ante esta falencia, en los últimos años ha surgido un mayor interés en generar modelos dinámicos (*Dynamic Facilities Layout Problem, DFLP*), que incluyan varios períodos de tiempo y permitan actualizar el diseño de las instalaciones, y modelos estocásticos (*Stochastic Facilities Layout Problem* o SFLP), que consideren la variabilidad de la demanda. Los proyectos de redistribución de planta (*Facilities Relayout Problem, FRLP*) consisten en reorganizar los equipos, departamentos y recursos existentes en la planta, con el fin de mejorar su desempeño. Estos proyectos son muy comunes hoy en día debido a la incertidumbre y los cambios en los entornos industriales, que generan en las empresas la necesidad de cambiar el tipo de sistema productivo, incorporar maquinaria, aumentar su capacidad, reevaluar su personal y las condiciones de trabajo, para lograr ser competitivas (Lahamar & Benjaafar, 2005; Baykasoglu, Dereli & Sabuncu, 2006; Afentakis, Miller, & Solomon, 1990).

Actualmente, para evaluar un diseño de planta se usan principalmente índices cuantitativos de eficiencia operativa. El más común de ellos es el costo de manejo de materiales (Wrennal, 1997; Braglia, Zanoni, & Zavanella, 2005). Benjaafar, Heragu e Irani (2002) proponen otros indicadores de desempeño como el WIP y los tiempos de ciclo. Sin embargo además de estas consideraciones técnicas, se deben mirar otros factores que en la práctica impactan la calidad de una distribución de planta (Ferrari, Pareschi, Persona, y Regattieri, 2003; Salazar, Vargas, Añasco, y Orejuela, 2010).], entre ellos la seguridad industrial (Vijayvargiya, 1994), la congestión (Benjaafar, 2002), la flexibilidad de expansión (Canen y Williamson, 1996), las formas de los departamentos (Ku, Hu, y Wang, 2011) y los cuellos de botella (Sarker y Yu, 1994).

La sección 2, que se presenta a continuación, describe con mayor detalle el problema de redistribución de planta y presenta antecedentes relevantes. La sección 3 expone la metodología para evaluar diseños candidatos de redistribución de planta y realizar la selección final. La sección 4 presenta un caso, ejemplo de cómo se realizan estos procesos en las empresas, al que se le adaptan algunas consideraciones de acuerdo con la metodología propuesta. La sección 5 señala las conclusiones obtenidas de la investigación. Finalmente en la sección 6, se proponen campos futuros de investigación para complementar la temática abordada en este artículo.

II. Antecedentes

Kulturel-Konak, Smith y Norman (2007) plantean los proyectos de redistribución de planta como un caso particular del problema de distribución de planta dinámico, en el que sólo se consideran dos períodos de planeación: el actual y el siguiente. Dentro de estos proyectos, se pueden considerar los modelos existentes del DFLP, para la generación de alternativas de diseño de planta. Kulturel-Konak (2007) caracteriza el problema de planta dinámico y describe heurísticos, meta-heurísticos y enfoques híbridos para resolverlo; Balakishnan, Cheng y Conway (2000) desarrollan un heurístico de intercambio entre pares; Sahin y Türkbey (2009) introducen un heurístico basado en *simulated annealing* y en búsqueda tabú; Udomsakdigool y Bangsaranthip (2010), por su parte, presentan un algoritmo de optimización con colonia de hormigas y programación dinámica.

Meng, Heragu y Zijm (2004) trabajan el FRLP desde una nueva perspectiva, mediante el establecimiento de un plan de cuatro fases para desarrollar e implementar los proyectos de redistribución de planta. A partir del trabajo de Lacksonen y Hung (1996), se incluye una nueva fase (la Fase V). A continuación se presenta la propuesta integrando estos trabajos, detallando cada una de las fases de un proyecto de redistribución de planta y presentando la literatura relevante que se debe considerar para su ejecución.

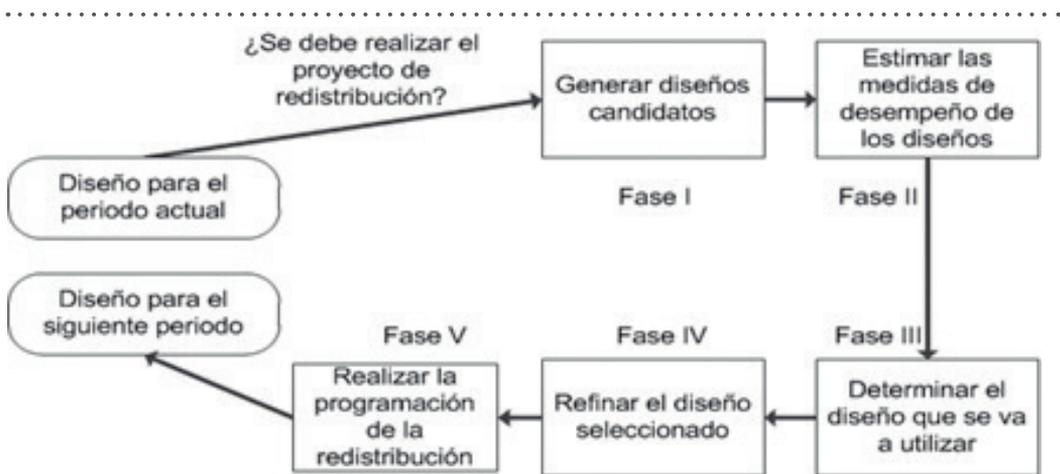


Figura 1. Enfoque de cinco etapas para la creación y análisis de diseños reconfigurables

Fase I. Genera los diseños de planta que se tendrán como candidatos para el proyecto, a través de métodos cuantitativos y cualitativos. Los diseños también pueden determinarse utilizando un paquete de software existente, la variación de un diseño desarrollado para unas condiciones de producción similares, la experiencia humana o incluso la intuición. En la literatura se encuentran varios modelos para la creación de las alternativas de redistribución. Kulturel-Konak, Smith y Norman (2007) presentan un enfoque de doble objetivo para resolver el problema de redistribución dentro de un área de instalaciones fija o con expansión, en el que se minimizan los costos de manejo

de materiales y los costos de reorganización, mediante un meta-heurístico de búsqueda tabú. Driscoll y Sawyer (1985) describen un modelo de simulación para investigar el problema de redistribución. Hicks y Lowan (1976) aplican el algoritmo CRAFT para resolver dicho problema.

Fase II. La segunda etapa para el desarrollo de proyectos de redistribución de planta corresponde a la estimación de medidas de desempeño para cada uno de los diseños. Meng, Heragu y Zijm (2004) proponen medidas determinísticas –como el costo de manejo de materiales– y estocásticas –como el tiempo promedio de espera de los productos y la longitud promedio de la cola–. Ellos definen el *lead time* del producto como la suma de los tiempos de proceso de las máquinas, los tiempos en cola y los tiempos de transferencia entre las máquinas. El WIP es calculado como la suma de la longitud promedio de la cola en todas las máquinas. Finalmente proponen que cada diseño sea evaluado mediante un indicador agregado que consta de la suma del costo de manejo de materiales, el costo de inventario de producto en proceso, el costo o penalidad por demora de producto y el costo de relocalización. Lie Chien Lin y Gunter P. Sharp (1999a, 1999b), tienen en cuenta un conjunto de factores cualitativos y cuantitativos muy completos para abordar el problema de distribución de planta, que puede adaptarse para ser aplicado en las redistribuciones de planta.

Fase III. La decisión final sobre qué diseño utilizar es un problema de análisis de toma de decisiones para lo cual se deben utilizar técnicas multicriterio (e.g. ponderación lineal, utilidad multicriterio, relaciones de sobreclasificación y análisis jerárquico) que permitan involucrar los factores establecidos en la Fase II. . Dependiendo de sus ventajas y desventajas, estas técnicas serán útiles o no para determinado tipo de proyecto de redistribución de planta.

Fase IV. Para pulir o refinar el diseño escogido se deben realizar modificaciones al mismo, para incluir mejoras al diseño y detalles de ingeniería. Entre estos últimos se incluyen las modificaciones de la infraestructura del edificio; las conexiones a servicios de energía, agua, aire y alcantarillado; y la variación en los sistemas de iluminación, mantenimiento y seguridad (Bozer, Tanchoco, Tompkins, & White, 2009). Resulta útil hacer un análisis de las ventajas de las alternativas que no fueron seleccionadas e incorporarlas dentro del diseño que se va a implementar.

Fase V. Cuando se tenga el nuevo diseño de planta refinado y adaptado, se debe realizar la programación de las actividades de redistribución de la manera más detallada posible. Esto es la planeación de los recursos, la adquisición de maquinaria, y la secuencia y sincronización de actividades relacionadas entre sí, que tienen como fin alcanzar la nueva organización propuesta para la planta (Lacksonen & Hung, 1996). Esta fase es muy importante porque la ejecución de un proyecto de redistribución de planta genera interrupciones en la producción de la planta. El plan del proyecto tiene como objetivo minimizar esa pérdida de productividad, el tiempo de ejecución del proyecto y los costos de mover los equipos y departamentos.

Este artículo se enfoca en las fases de evaluación de candidatos para el diseño de planta (Fase II) y selección de uno de ellos para su implementación (Fase III). Se han encontrado acercamientos al tema a nivel teórico, pero se requiere fortalecer estos procedimientos para darles la importancia y la formalidad que el entorno industrial necesita. Por otro lado, se considera que los factores que se tengan en cuenta en las fases de evaluación de alternativas y selección del diseño, guiarán su implementación y sustentarán su desempeño operativo.

III. Propuesta

El objetivo de la metodología desarrollada en este artículo es seleccionar el mejor diseño de planta para realizar un proyecto de redistribución, dado un conjunto de alternativas de diseño propuestas. Esta metodología se desarrolla en cuatro pasos principales, que se describen a continuación.

1) Identificar el tipo de proyecto de redistribución de planta que se quiere llevar a cabo en la empresa

a) Primera Etapa

Para definir los tipos de proyecto de redistribución de planta que existen, se identificaron las causas que pueden generarlos (Vásquez & Rodríguez, 2012). Esto se hizo a través de una revisión bibliográfica del *Problema de Distribución de Planta Dinámico*. Se encontraron artículos que se refieren a las razones por las que un diseño de planta debe lidiar con los ambientes dinámicos y las necesidades específicas que hacen que éste deba cambiar (Suo, 2012). También se obtuvo información mediante la realización de un trabajo de campo, en el que se visitaron empresas de la ciudad de Cali y se entrevistó a sus expertos, con el fin de caracterizar con mayor profundidad el problema de redistribución de planta.

b) Segunda Etapa

Las causas y necesidades generadoras de los proyectos de redistribución de planta determinadas en la primera etapa fueron organizadas y categorizadas de acuerdo con las relaciones que había entre ellas, las actividades que implicaban dentro del proyecto y los objetivos de interés a los que respondían.

A partir del análisis anterior surgieron las categorías de proyectos de redistribución de planta que se presentan en la Tabla 1. Partiendo de su descripción, el usuario de la metodología debe escoger en este paso, el tipo de proyecto que se va a implementar en la empresa.

2) Analizar los factores críticos que corresponden al tipo de proyecto seleccionado

a) Primera Etapa

Para establecer un conjunto de factores, tanto cualitativos como cuantitativos, esenciales para evaluar los diseños de planta, se partió de la teoría mencionada sobre evaluación de disposiciones de planta y del trabajo de campo realizado. Estos factores se clasifican en tres categorías: costos, flujo y entorno, descritas en la Tabla 2.

Tabla 1. Categorías de proyectos de redistribución de planta

Redistribución para aumentar la capacidad

Conserva el mismo sistema productivo, los mismos productos y el tipo de maquinaria, pero implica un aumento de la cantidad de máquinas, o una ampliación de estaciones de trabajo actuales. Se va a generar una redistribución de planta siempre y cuando el hecho de traer nuevas máquinas, o de ampliar las estaciones de trabajo, requiera una reorganización de varias entidades, y no se pueda lograr con solo poner las máquinas en un espacio libre existente, dado que en este último caso no habría una redistribución.

Redistribución para incorporar un cambio al sistema productivo

Abarca la introducción de nuevas líneas de productos, de nuevos productos específicamente o de pasos adicionales dentro del proceso, como por ejemplo una nueva etapa de empaque. Las modificaciones anteriores corresponden a cambios del sistema productivo, puesto que varían los procesos y flujos ya establecidos o incorporan unos nuevos.

Redistribución para aumentar eficiencia y reducir costos

Implica unos cambios en la localización de los departamentos, pero la estructura general se mantiene. Busca reducir los costos de manejo de materiales y de transporte, mejorar algunas características operativas como el tiempo del proceso, la congestión, los altos inventarios de producto en proceso y eliminar los flujos cruzados o en reversa. En la búsqueda de una mejora puede ser necesario involucrar a la gran mayoría de departamentos. Corresponde al problema tratado en la mayoría de estudios o desarrollos académicos sobre redistribución de planta.

Redistribución para implementar una filosofía o estrategia empresarial

Este tipo de proyectos tienen unos enfoques mucho más específicos. Un ejemplo consiste en la aplicación de Lean Manufacturing, filosofía que ya tiene unos principios, métodos y prácticas establecidos, y que deben ser aprendidos y aplicados por los precursores del proyecto para lograr adaptar las instalaciones a las características que plantea dicha metodología. Otro objetivo empresarial que podría buscarse es la integración de los proveedores a la planta de la empresa. También puede darse el caso en el que se requiera seguir alguna legislación, estrategia o parámetro establecido por empresas clientas, o por la empresa en conjunto con los proveedores.

.....
b) Segunda Etapa

Con los tipos de proyecto de redistribución de planta establecidos y los factores importantes identificados para valorar los nuevos rediseños, se seleccionaron los factores críticos específicos dentro de cada clase de proyecto. A continuación se presentan los factores críticos por tipo de proyecto (Tablas 3, 4 5 y 6), y una lista de factores comunes (Tabla 7).

Para los proyectos de aumento de capacidad, uno de los factores más críticos es el costo de adquisición de la maquinaria y los equipos de manejo de materiales, pues representan el mayor porcentaje de los costos del proyecto de redistribución. Además, si en el proyecto no se logran identificar espacios vacíos para ubicar la maquinaria, se requiere analizar las condiciones del lugar y su construcción, para determinar hacia donde se podría implementar una expansión, lo que generaría una obra civil. Es importante evaluar qué tanta flexibilidad tiene el diseño que se está proponiendo y el edificio respecto a futuros cambios, porque esto podría conllevar a más obras civiles

Tabla 2. Factores para evaluar un diseño de planta durante una redistribución

Factores relacionados con el costo	Factores relacionados con el entorno
<p>Costos no relacionados con el inventario</p> <p>1. Costo inicial</p> <p>1.1 Adquisición de terreno para expansión</p> <p>1.2 Construcción</p> <p>-Adaptación de servicios</p> <p>1.3 Adquisición de la maquinaria de producción</p> <p>1.4 Adquisición/adaptación de los equipos de manejo de materiales</p> <p>1.5 Costo de reorganizar-movimiento de la maquinaria/departamentos actuales</p> <p>-Revisión técnica de la conexión y arranque</p> <p>-Transporte de la maquinaria a la nueva ubicación</p> <p>1.6 Costo del tiempo que se requiere para iniciar la operación correctamente: la instalación, la capacitación y la depuración</p> <p>1.7 Costo de nuevos requerimientos de software.</p> <p>1.8 Costo por la sincronización con los programas, el control de inventarios y el papeleo</p> <p>2. Costo anual de operación y mantenimiento</p> <p>-Mano de obra</p> <p>-Utilidad</p> <p>-Mantenimiento</p> <p>-Costo de manejo de materiales</p> <p>3. Indicadores económicos diferentes al costo</p> <p>-TIR</p> <p>-Periodo de recuperación de la inversión</p> <p>-Valor de salvamento futuro</p>	<p>Alrededores</p> <p>1. Condiciones del lugar natural y construcción</p> <p>2. Acceso de los camiones y patrón de circulación</p> <p>3. Equipos y métodos de manejo de materiales externo</p> <p>4. Entorno de la comunidad</p> <p>-Impacto de la congestión del tráfico y el ruido</p> <p>-Manejo de los desperdicios y control de la contaminación</p> <p>-Apariencia de características externas o visibles</p> <hr/> <p>Calidad del Entorno</p> <p>1. Seguridad Industrial</p> <p>-Accidentes personal/edificio</p> <p>-Cruces personal/vehículos</p> <p>-Interfaces entre humanos y maquinaria o material</p> <p>-Señalización</p> <p>2. Conformidad de los trabajadores-servicios relativos al personal</p> <p>-Baños, comedores, roperos, oficinas, enfermería</p> <p>-Ruido</p> <p>-Ventilación o calentamiento</p> <p>-Acceso discapacitados</p> <p>-Iluminación</p> <p>-Ergonomía, oficinas y lugar de trabajo</p> <p>3. Seguridad de la propiedad</p> <p>-Fuera del edificio</p> <p>-Dentro del edificio</p> <p>4. Acceso para mantenimiento</p> <p>-Compatibilidad de la construcción del edificio y el equipo de manejo de materiales</p> <p>-Espacio para trabajos de mantenimiento</p> <p>-Ubicación de las actividades de mantenimiento</p>
<p>Costos relacionados con el inventario</p> <p>6. Espacios vacíos</p> <p>1. Costo de mantener inventario:</p> <p>-MP</p> <p>-WIP</p> <p>-PT</p> <p>2. Costo de levantamiento de inventario para paro en la producción</p>	
<p>Factores relacionados con el flujo</p> <p>Relación del Espacio</p> <p>1. Claridad-despeje</p> <p>2. Suficiencia y utilización del espacio</p> <p>-Porcentaje de utilización</p> <p>-Espacios vacíos</p> <p>3. Forma de la distribución</p> <p>4. Adyacencia de departamentos</p> <p>5. Efecto de la distribución en el tiempo del proceso</p> <p>6. Efecto de la distribución en el tiempo de respuesta al cliente</p>	<p>Flujo de Materiales</p> <p>1. Pasillo</p> <p>2. Densidad y volumen/tiempo y distancia</p> <p>3. Patrones de flujo</p> <p>4. Cuellos de botella</p> <p>5. Inventario de producto en proceso</p> <hr/> <p>Robustez y Flexibilidad</p> <p>1. Robustez de la capacidad del equipo</p> <p>2. Flexibilidad en volumen</p> <p>3. Flexibilidad de expansión del edificio</p> <p>4. Flexibilidad en las rutas</p>

Tabla 3. Factores críticos para una redistribución de planta de aumento de capacidad

Redistribución para aumentar de capacidad
1. Costo de adquisición de maquinaria de producción
2. Costo de adquisición de equipo de manejo de materiales
3. Flexibilidad en volumen
4. Flexibilidad de expansión del edificio
5. Condiciones del lugar natural
6. Espacios vacíos

.....

y altos costos a corto plazo, que se podrían evitar estableciendo una disposición que tenga facilidad para incorporar modificaciones. Otro factor a considerar es el costo de levantamiento de inventarios requerido, si es necesario parar la producción para implementar el diseño. En la medida en que el diseño permita reducir el tiempo del proyecto, se puede mitigar dicho costo. El tiempo que se requiere para iniciar la operación correctamente, incluye un tiempo en el que puede estar parada la producción y genera un costo similar al anterior. Otros costos para iniciar la operación de forma correcta son los de producto defectuoso inicial. Sin embargo cuando la maquinaria adquirida es del mismo tipo, el impacto no es tan grande, porque se cuenta con experiencia en su manejo. Finalmente, es importante evaluar si el nuevo diseño permite la flexibilidad de volumen que se requiere para los cambios que se están presentando en la compañía, porque esto justifica en gran parte la implementación del proyecto.

.....

Tabla 4. Factores críticos para una redistribución de planta de cambio de sistema productivo

Redistribución para incorporar cambio al sistema productivo
1. Costo de adquisición de maquinaria de producción
2. Costo de nuevos requerimientos de software
3. Costo por la sincronización con los programas, el control de inventario y el papeleo
4. Flexibilidad de expansión del edificio
5. Referencias de proyectos/diseños similares
6. Espacios vacíos
7. Cumplimiento de normativas y legislaciones
8. Tiempo del proceso y de respuesta al cliente

.....

En los proyectos que se presentan un cambio productivo hay factores que se mencionaron que deben tenerse en cuenta. Si el proyecto se da por la adquisición de nuevos tipos de máquinas, es necesario identificar los espacios vacíos en las instalaciones para facilitar su ubicación; sin embargo, puede que por el flujo de los productos, dichos espacios no sirvan y se necesite mover toda la distribución actual. Esto puede generar un paro en la producción, por lo que se debe tener en cuenta el costo de levantamiento de inventario; si el cambio del sistema productivo implica un cambio en las especificaciones del producto, la cantidad en inventario es un punto crítico para analizar, ya que tiene la posibilidad de

quedar obsoleta cuando entre en funcionamiento el sistema ya modificado. Sin embargo, el paro en la producción tiende a ser mayor que en el primer tipo de proyecto y el costo del tiempo que se requiere para iniciar de nuevo las operaciones correctamente también es mayor, debido a que involucra una instalación, capacitación sobre nuevos conocimientos, prácticas, y la identificación y corrección de errores al iniciar el funcionamiento del sistema productivo. Por ello puede ser beneficioso analizar qué tan parecido es el diseño que se desea implementar a otros diseños de planta de proyectos exitosos similares en el entorno, para tomarlos como pauta a seguir (*benchmarking*). Además, el cambio en los sistemas productivos se debe incorporar no sólo en los procesos y operaciones, sino también en las tecnologías, el manejo de la información y la documentación, por lo que es importante identificar el impacto que los diseños pueden tener en los costos de nuevos requerimientos de software y de sincronización con los programas.

Los proyectos que tienen como base el aumento de la eficiencia y la reducción de los costos de manejo de materiales, tienden a considerar otros aspectos operativos más específicos para mejorar la distribución actual. Sin embargo, también se debe analizar el impacto de la nueva distribución en el costo de levantamiento de inventario, ya que estos proyectos pueden implicar un paro de la producción total, es decir en todos los departamentos. En este tipo de proyecto, el costo del tiempo que se requiere para iniciar la operación correctamente puede ser menor que en los otros tipos, ya que se cuenta con las mismas máquinas pero se cambia la distribución actual; sin embargo, debe controlarse. Para estos proyectos es fundamental medir el costo anual de operación de la planta para las diferentes alternativas propuestas, porque lo que se busca es mejorar las características operativas y la reducción de costos. El costo de la adquisición de equipo de manejo de materiales también juega un papel importante, ya que al variar la disposición de todos los departamentos puede requerir cambiar los equipos actuales. Además, para aumentar la eficiencia se debe analizar cuál alternativa tiene una mejor adyacencia de

Tabla 5. Factores críticos para una redistribución de planta de aumento de eficiencia y reducción de costos

Redistribución para aumentar eficiencia y reducir costos
1. Costo de adquisición de equipo de manejo de materiales
2. Costo anual de operación: mano de obra, utilidades, mantenimiento, manejo de materiales
3. Forma de la distribución
4. Adyacencia de departamentos
5. Número y ubicación de pasillos
6. Flexibilidad en las rutas
7. Tiempo de proceso y de respuesta al cliente
8. Densidad y volumen/Tiempo y distancia
9. Equipos de manejo de materiales externo
10. Acceso de vehículos y patrón de circulación
11. Complejidad del equipo de manejo de materiales y su compatibilidad con el edificio.

departamentos, mayor flexibilidad en las rutas (es decir que productos iguales puedan seguir diferentes rutas para evitar la congestión) y mayor compatibilidad entre la infraestructura del edificio y el equipo de manejo de materiales. También se debe revisar si el número y la ubicación de los pasillos favorecen un flujo continuo y sin congestión. Por último, se debe pensar no sólo en el interior de la planta sino también en su exterior, y cuál de los diseños impacta favorablemente el manejo de materiales externo y la conexión con el sistema interno.

Para las redistribuciones que surgen por la implementación de alguna legislación, estrategia o filosofía empresarial, el beneficio de un diseño sobre el otro dependerá del grado en que éste cumpla con los principios, objetivos o características que la definen.

Tabla 6. Factores críticos para una redistribución de planta de implementación de una estrategia

Redistribución para implementar estrategia/legislación
1. Grado de cumplimiento de los principios, características u objetivos de la filosofía/ estrategia/legislación
2. Costo de nuevos requerimientos de software
3. Costo por la sincronización con los programas, el control del inventarios y el papeleo.
4. Grado en que se tiene en cuenta la seguridad industrial, la ergonomía, el impacto ambiental, y las actividades de apoyo como el mantenimiento y la seguridad del edificio.

Tabla 7. Factores críticos para todo tipo de redistribución de planta

Para todo tipo de redistribución
1. Costo de levantamiento para paro en la producción
2. Costo del tiempo que se requiere para iniciar la operación correctamente: la instalación y la depuración
3. Costo de adquisición de terreno
4. Costo de construcción
5. Costo de adaptación de servicios
6. Costo de reorganizar-movimiento de la maquinaria/departamentos
-Revisión técnica de la conexión y arranque
-Transporte de la maquinaria a la nueva ubicación
7. Valor de salvamento futuro
8. TIR
9. Periodo de recuperación de la inversión
10. Costo de mantener inventario: MP, PP, PT
11. Claridad-despeje
12. Suficiencia y utilización del espacios
13. Patrones de Flujo
14. Conformidad de los trabajadores-servicios relativos al personal
15. Seguridad industrial
16. Seguridad de la propiedad
17. Acceso para mantenimiento

Por ejemplo, si la filosofía se basa en mejorar las condiciones de los trabajadores, es importante determinar cómo las alternativas que se plantean cumplen con las conformidades de los trabajadores en cuanto a servicios relativos al personal, los lugares de trabajo u oficinas, y su ergonomía. Además, se puede considerar el espacio libre requerido u holguras para el mantenimiento de la maquinaria y su ubicación, pues éstos pueden afectar la salud del operario o ponerlo en riesgo. Por otra parte si la estrategia tiende hacia la corriente ambiental debe analizarse cómo los diseños impactan la congestión del tráfico y el ruido en los alrededores, el manejo de los desperdicios y el control de la contaminación. Además si se requiere parar la producción se incurrirá en el costo de levantamiento de inventario y arranque, como en los proyectos anteriores.

Por último, existen ciertos factores que se deben considerar en todo tipo de proyecto de redistribución. Ahora, depende de cada caso particular, escoger aquellos de mayor interés para la empresa. En todos los tipos de redistribución se puede dar o no una expansión. En el caso que se requiera expandir el área de las instalaciones, entre los factores críticos comunes se tiene el terreno, la construcción y sus costos asociados. Por lo general los proyectos impulsan una adaptación en los servicios de energía, alimentación de agua, gas, residuos, etc., puesto que es posible que en las nuevas ubicaciones de las máquinas no se cuente con las conexiones necesarias. Se debe buscar aprovechar al máximo las conexiones existentes, para reducir costos de adaptación. El costo de reorganizar se refiere principalmente al costo de mover la maquinaria de producción y los equipos de manejo de materiales, y de la reinstalación de los mismos. Posterior a ello se requiere una verificación técnica de las conexiones y la supervisión del arranque, que también generan costos. Por lo general los proyectos de esta magnitud son evaluados económicamente mediante indicadores como la tasa interna de retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión, indicadores que permiten establecer su viabilidad. En cuanto a costos relacionados con el inventario se tienen los de materia prima, productos en proceso y productos terminados. El costo de productos en proceso tiene una alta importancia porque si es elevado se puede deber a cuellos de botella o congestión en las líneas y se busca que la alternativa sea lo más balanceada y menos congestionada posible. La relación del espacio, considera la claridad o despeje, la suficiencia y la utilización del espacio. La claridad o despeje corresponde a la extensión del diseño libre de construcciones y equipos fijos o permanentes que afectan la efectividad a la hora de realizar la redistribución. La suficiencia del espacio tiene que ver con determinar si existe suficiente espacio disponible para que en el nuevo diseño se puedan desarrollar todas las actividades necesarias, generar la capacidad requerida y atender todas las operaciones del proceso. La utilización del espacio corresponde a un índice cuantitativo del área donde se realizan actividades que agregan valor sobre el área total (sin considerar los espacios libres sino únicamente los ocupados). Este índice está mucho más enfocado en una utilización productiva, que en la ocupación, netamente, del espacio. En cuanto al ámbito del flujo del proceso, se deben tener en cuenta los patrones del flujo que genera cada alternativa y verificar que en lo posible no se presenten flujos

cruzados ni contraflujos. Por último, se debe evaluar la flexibilidad para cambios en el volumen, en expansión y en las rutas, que es la habilidad para producir una parte o producto por rutas diferentes o alternativas a través del sistema.

Una vez que se haya identificado el tipo de proyecto de redistribución de planta que se va a implementar, se deben considerar los factores críticos que le corresponden y aquellos factores comunes a todos los tipos de proyecto. De acuerdo con los intereses de la empresa, se requiere seleccionar los factores que se consideren más relevantes para evaluar las alternativas de diseño. Lo anterior se logra mediante reuniones o *workshops* de los interesados o representantes de cada área de la compañía en el equipo del proyecto. Estos factores conformarán un conjunto de características de f_1 hasta f_n , que serán observadas en cada uno de los diseños candidatos.

3) Evaluar las alternativas de diseño

Existen varias formas de realizar el proceso de evaluación. Se han identificado en la literatura diferentes tipos de evaluación multicriterio que resultan útiles para la toma de decisiones. Entre ellas se encuentran el método de ponderación lineal (*scoring*), las relaciones de sobreclasificación y el análisis jerárquico (Berumen & Llamazares, 2007). El método de ponderación lineal consiste en asignar a cada criterio considerado, un peso, y evaluar los criterios dentro de cada alternativa, con una misma escala. La calificación de la alternativa es la sumaproducto de los pesos y los puntajes de cada criterio. El método de sobreclasificación se enfoca en realizar evaluaciones entre pares de opciones (A y B). Para cada par, puede ocurrir que A supere a B, que B supere a A, o que A y B empaten. La ventaja de este método es que permite una comparación más objetiva, puesto que se revisa cada par de alternativas separadamente. Sin embargo, su desventaja es que si se tienen m alternativas, se tendrán que revisar ${}_m C_2$ (m combinado 2) parejas. Lo anterior puede llevar a un incremento del tiempo que requiere realizar la evaluación y tomar la decisión. El método de análisis jerárquico consiste en construir una jerarquía en la que se identifique el objetivo de la decisión, los criterios y subcriterios para la evaluación y las alternativas. Luego se determina la importancia de los criterios y subcriterios, se construyen matrices de comparación por pares para cada nivel de criterios y se determina la ponderación de cada subcriterio respecto del anterior. Finalmente se obtiene una matriz de pagos que servirá para evaluar las alternativas. Este método tiende a abarcar mucha información, por lo que puede llegar a ser poco práctico y a confundir a los evaluadores.

La metodología propuesta considera la aplicación del método de ponderación lineal, puesto que se caracteriza por ser práctico, sencillo y puede ser utilizado fácilmente por los gerentes y administradores que dirigen los proyectos de redistribución de planta. Para evaluar las alternativas de diseño, se debe tomar la primera de ellas y definir una calificación para cada uno de los factores. Ésta puede estar en un rango entre 1 y 10, siendo 1 un impacto muy negativo y 10 un impacto muy positivo. Lo anterior se repite para cada alternativa.

4) Comparar opciones y tomar la decisión de la alternativa de diseño definitiva

Se asigna a cada factor un peso o ponderación dependiendo de la importancia que tenga en el proceso de selección, los procesos operativos y administrativos de la planta y su impacto. Es conveniente que estas ponderaciones sumen 100%. Luego se multiplican

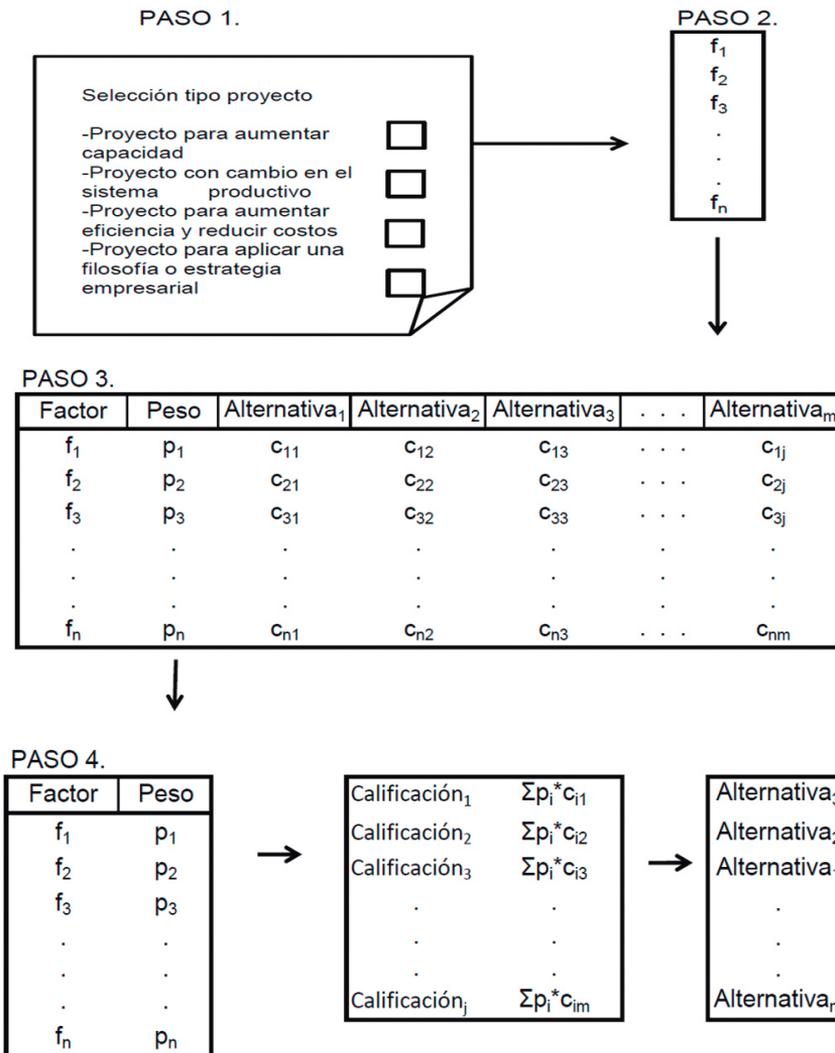


Figura 2. Esquema general de la metodología

los valores o calificaciones de los factores por sus respectivas ponderaciones y se suman los resultados, obteniendo así una calificación total de la alternativa. Esto se repite para cada uno de los diseños siguientes. Por último, se realiza una lista ordenada de las alternativas de diseño y se escoge la que tuvo el mejor desempeño o puntuación. En la Figura 2 se puede observar el esquema general de la metodología.

IV. Caso de estudio

Hace algunos años, una empresa del sector farmacéutico de la ciudad creó una nueva planta con tres líneas principales de productos: líquidos y cremas, talcos, y efervescentes. Al poco tiempo, la compañía decidió incorporar un nuevo producto perteneciente a la línea de líquidos.

Este producto seguía el mismo proceso dentro de las mismas máquinas existentes en esa línea, pero requería un paso adicional de esterilización que se debía realizar mediante una máquina conocida como autoclave. Para la aprobación de este proyecto se requirió revisar la razonabilidad del periodo de recuperación de la inversión y su contribución al margen de la compañía.

De acuerdo con la clasificación establecida de los tipos de proyectos de redistribución de planta, el hecho de incorporar un nuevo producto, y por ende una nueva clase de máquina, implica un proyecto orientado hacia un cambio en el sistema productivo, ya que se añade un proceso y su patrón de flujo.

Los factores considerados como críticos en un proyecto de redistribución de planta con cambio en el sistema productivo son: los espacios vacíos, el costo de adquisición de la maquinaria de producción, el costo de nuevos requerimientos de software, el costo de la sincronización con los programas y el papeleo, la flexibilidad de expansión del edificio, y las referencias de proyectos similares exitosos.

El factor espacios vacíos no se utilizó para evaluar las alternativas de diseño, sino para analizar si se requería realizar una expansión. Se encontró que había suficiente área disponible, por lo que no se recurrió a ampliar las instalaciones.

En este caso, el costo de adquisición de maquinaria no hacía parte de los criterios de evaluación de opciones de diseño, puesto que la decisión de incorporar el nuevo producto y la autoclave ya estaba tomada. Por otro lado, no se necesitó la implementación de un nuevo software o un módulo del mismo. Por tratarse de una pequeña variación en el sistema productivo, el costo de sincronización con los programas no cambiaba de una alternativa de diseño a la otra. La flexibilidad de expansión del edificio no se vio afectada por el proyecto de redistribución puesto que no se realizó expansión de las instalaciones y por tanto el espacio libre para futuras modificaciones era el mismo en las diferentes alternativas de diseño.

La empresa tiene como práctica común realizar visitas a otras organizaciones fuera del país para tomar como referencia sus disposiciones de planta. Por ello, el factor relacionado con las referencias de proyectos similares exitosos sí podía diferenciarse entre las alternativas de diseño. En la medida en que un diseño siguiera los parámetros utilizados por la otra empresa, éste recibía una mayor aceptación. Ahora, para la empresa eran fundamentales algunos de los factores comunes aplicables para la evaluación de alternativas en los diferentes tipos de proyectos de redistribución de planta (Ver Tabla 7). Estos eran: el tiempo del proceso, el costo de adaptación de servicios (energía y agua) y el costo de levantamiento de inventario debido al paro en la producción. Los encargados de dirigir el proyecto en la empresa buscaron escoger una alternativa de diseño en la que se ubicara la autoclave en el área que presentara mayor facilidad para conectarla a los servicios, aunque surgiera la necesidad de reubicar otros equipos o estructuras. Adicionalmente, se decidió ubicar la nueva máquina en un sitio medianamente alejado de la línea de líquidos y cremas, con el fin de no tener que parar toda la producción, pero cuidando que el tiempo de proceso no se fuera a incrementar en una gran medida.

Conclusiones

Se ha evidenciado que en el desarrollo de proyectos de redistribución de planta en la práctica, la mayoría de empresas no utilizan ninguna metodología o herramienta para llevar a cabo la evaluación de alternativas de diseño y la selección de aquella que será implementada. Por ello se propone una metodología que sea aplicable en la realidad y que les permita a las empresas mejorar la toma de decisiones relacionadas con sus distribuciones de planta. Esta metodología consta de cuatro pasos y toma como entrada las diferentes alternativas de rediseño que se tienen para el proyecto. En la metodología, se selecciona el tipo de proyecto de redistribución que se va a realizar, se escogen unos factores críticos para valorar las alternativas de diseño y se utiliza un método de ponderación lineal para calificar cada alternativa y escoger la que tenga mejor desempeño.

Futuras investigaciones

Se requiere una investigación de campo más profunda, a partir de la cual se pueda determinar qué factores son críticos en una redistribución de planta dependiendo del sector industrial al que pertenece la empresa. Además, el trabajo hecho hasta ahora en el tema, se puede mejorar profundizando en metodologías prácticas para desarrollar las fases de generación de alternativas de rediseño (Fase I), refinamiento del diseño escogido (Fase IV), y programación de la redistribución (Fase V).

El plan de cuatro pasos que se propone en este artículo está diseñado para cuando se conoce de antemano que se va a realizar el proyecto de redistribución de planta y aplica para la mayoría de proyectos existentes de este tipo. Sin embargo hay un caso especial, que corresponde al proyecto orientado a mejorar la eficiencia operativa de la planta, en el que se debe introducir una fase adicional (Fase VI), en la que se evalúe económicamente el proyecto para decidir si es viable su implementación.

Por otro lado, sería de gran utilidad generar nuevas formas de evaluación multicriterio que sean más eficientes, que reduzcan la subjetividad de los evaluadores, pero que no sean tan complejas para su aplicación en la práctica. ST

Referencias bibliográficas

- Afentakis, P., Miller, R.A., Solomon, M.M. (1990). Dynamic layout strategies for flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 28(2), 311-323.
- D.G. An improved pair-wise exchange heuristic for the dynamic plant layout problem. (2000). *International Journal of Production Research*, 38(13), 3067-3077.
- Balakrishnan, J., Cheng, Ch-H., & Conway, Baykasoglu, A., Dereli, T., & Sabuncu,

- I. (2006). An ant colony algorithm for solving budget constrained and unconstrained dynamic facility layout problems. *Omega: The International Journal of Management Science*, 34, 385-396.
- Benjaafar, S. (2002). Modeling and Analysis of Congestion in the Design of Facility. *Management Science*, 48, 679-704
- Benjaafar, S., Heragu, S., & Irani, S.A. (2002). Next Generation Factory Layouts: Research Challenges and Recent Progress. *Interfaces*, 32(6), 58-76.
- Berumen, S.A. & Llamazares, F. (2007). La utilidad de los métodos de decisión multicriterio (como el AHP) en un entorno de competitividad creciente. *Cuadernos de Administración*, 20(34), 65-87.
- Bozer, Y.A., Tanchoco, J.M.A., Tompkins, J.A. y White, J.A. (2009). Planeación de instalaciones [3a ed.] México D.F: Cengage Learning
- Braglia, M., Zanoni, S., & Zavanella, L. (2005). Layout design in dynamic environments: analytical issues. *International Transactions in Operational Research*, 12, 1-19.
- Canen, A. y Williamson, G. (1996). Facility layout overview: towards competitive advantage. *Facilities*, 14(10/11), 5-10.
- Driscoll, J. y Sawyer, J.H.F. (1985). A computer model for investigating the relayout of batch production areas. *International Journal of Production Research*, 23(4), 783-794.
- Ferrari, E., Pareschi, A., Persona, A., & Regattieri, A. (2003). Plant Layout Computerized Design and Relayout Program (LRP). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21, 917-922.
- Hicks, P. & Lowan, T. (1976). CRAFT-M for layout re-arrangement.. *Industrial Engineering*, 8(5), 30-35.
- Ku, M-Y. y Hu, M., y Wang, M-J (2011). Simulated annealing based parallel genetic algorithm for facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 49(6), 1801-1812.
- Kulturel-Konak, S., Smith, A.E. & Norman, B.A. (2007). Bi-objective facility expansion and relayout considering monuments. *IIE Transactions*, 39, 747-761.
- Kulturel-Konak, S. (2007). Approaches to uncertainties in facility layout problems: Perspectives at the beginning of the 21st Century. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18, 273-284.
- Lacksonen, T.A. & Hung, Ch-Y. (1996). Project scheduling algorithms for relayout projects. *IIE Transactions*, 30, 91-99.
- Lahamar, M. & Benjaafar, S. (2005). Design of distributed layouts. *IIE Transactions*, 37, 303-318.
- Lin, L-Ch., & Sharp, GP. (1999a). Quantitative and qualitative indices for the plant layout evaluation problem. *European Journal of Operational Research*, 116, 100-117.
- Lin, L-Ch. & Sharp, GP. (1999b). Application of the integrated framework for the plant layout evaluation problem. *European Journal*

- of *Operational Research*, 116, 118-138.
- Meller, R. & Gau, K-Y. (1996). The facility layout problem: recent and emerging trends and perspectives. *Journal of Manufacturing Systems*, 15(5), 351-356.
- Meng, G., Heragu, S.S., & Zijm, H. (2004). Reconfigurable Layout Problem. *International Journal of Production Research*, 42(22), 4709-4729.
- Sahin, R. & Türkbey, O. (2009). A new hybrid tabu-simulated annealing heuristic for the dynamic facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 47(24), 6855-6873.
- Salazar, AF., Vargas, LC., Añasco, CE., & Orejuela, JP. (2010). Propuesta de distribución en planta bietapa en ambientes de manufactura flexible mediante el proceso analítico jerárquico. *Revista EIA*, 14, 161-175.
- Sarker, B.R, y Yu, J. (1994). A two-phase procedure for duplicating bottleneck machines in a linear layout, cellular manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 32(9), 2049-2066.
- Sing, SP. & Sharma, RRR. (2006). A review of different approaches to facility layout problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30, 425-433.
- Suo, X. (2012). Facility Layout, Manufacturing System [en línea], Faieza Abdul Aziz (Ed.), ISBN: 978-953-51-0530-5, InTech, Recuperado de <http://www.intechopen.com/books/manufacturing-system/facility-layout>
- Udomsakdigool, A. y Bangsaranthip, S. (2010). Combining ant colony optimization and dynamic programming for solving a dynamic facility layout problem. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 64, 523-527
- Vásquez, L. & Rodríguez, M.A. (2012) *Guía para la Realización de Proyectos de Redistribución de Planta en Cali* [Proyecto de Grado]. Universidad Icesi: Cali, Colombia.
- Vijayvargiya, MC. (1994). *Developing a mathematical model for scheduling re-layout projects* [Tesis de maestría]. The Ohio University: Columbus, OH
- Wrennal, W. (1997). Facilities Planning and Design: A Foundation of the BPR Pyramid. *Industrial Management*, 39(4), 7-11

Currículum vitae

Leonardo Rivera

Jefe del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi de Cali. Ingeniero Industrial de la Universidad del Valle (1994), Máster en Ingeniería Industrial con énfasis en Producción, Logística y Distribución del Georgia Institute of Technology, (EE.UU. 1996) y Doctor en Ingeniería Industrial - Sistemas de Manufactura del Virginia Polytechnic Institute and State University, (EE.UU, 2006). Entre sus áreas de interés están la *Lean Manufacturing*, la distribución de planta y la ingeniería de bodegas (*Warehousing*).

Luis Felipe Cardona

Ingeniero Industrial (2011) y estudiante de Maestría en Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi (Colombia). Se desempeña como asistente de investigación de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Icesi. Entre sus áreas de interés se encuentran la ingeniería de bodegas (*Warehousing*), la distribución de planta y la optimización aplicada.

Laura Vasquez

Estudiante de ingeniería Industrial de la Universidad Icesi (Colombia). Entre sus áreas de interés se encuentran la logística interna y la distribución de planta.

María Andrea Rodríguez

Estudiante de ingeniería Industrial de la Universidad Icesi (Colombia). Se desempeña actualmente como analista de logística en la empresa Colgate Palmolive. Entre sus áreas de interés se encuentran la logística interna y la distribución de planta.