

REDISTRIBUCIÓN DE PLANTA Y PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN: UN ENFOQUE INTEGRADO

D. JARAMILLO, J. URIARTE, L.F. CARDONA

Facultad de Ingeniería. Universidad Icesi

e-mail: lfcardona@icesi.edu.co

Resumen: La preocupación principal de las empresas al realizar un proyecto de redistribución de planta es la interrupción de las operaciones de manufactura mientras se trasladan los departamentos. Este artículo presenta un modelo de optimización para programar el traslado de los departamentos y la producción, de tal manera que se garantice el cumplimiento de la demanda durante la ejecución del proyecto de redistribución de planta. Con este propósito, planteamos un modelo de programación lineal entera mixta (PEM) que minimiza los costos de traslados de los departamentos, asegura el cumplimiento de la demanda y limita la duración del proyecto a un máximo establecido. Nuestros resultados muestran que cuando la utilización promedio de la maquinaria de la planta es mayor al 60%, el proyecto de redistribución y la programación de la producción son interdependientes, por lo tanto es necesario utilizar un enfoque integrado como el propuesto en este artículo.

Palabras clave: distribución de planta; redistribución de planta; optimización.

Abstract: The main concern of companies when they are going to implement a re-layout project is the disruption of manufacturing operations while the departments are moving. This paper presents an optimization model to make the project scheduling and the production planning in order to ensure the compliance of the demand during the re-layout project. For this purpose, we propose a mixed integer linear programming (MIP) that minimizes the costs of moving the departments, guarantees compliance of the demand and limits the duration of the project to a maximum. Our results show that when the average utilization of the machinery of the plant is greater than 60%, the re-layout project and the production planning are interdependent; therefore it is necessary to use an integrated approach as is proposed in this paper.

Keywords: Facility Layout, Facility Re-layout, Optimization

1. INTRODUCCIÓN

En distribución de planta, la mayoría de la literatura se ha concentrado en el diseño de la distribución de una nueva planta. En los últimos años se ha encontrado que es mucho más común que una empresa se enfrente a un proyecto de redistribución de planta que a uno de distribución de planta [1], esto se debe a la alta variabilidad del entorno al que se enfrentan las empresas hoy en día [2].

El problema de redistribución de planta consiste en pasar de una distribución de planta existente a una nueva distribución de planta minimizando tanto los costos de manejo de materiales como los costos de la redistribución de planta. Teniendo en cuenta la adición de nuevos departamentos o modificaciones en las áreas o posiciones de los departamentos existentes [2].

Muy pocas investigaciones se han hecho acerca de la programación de las actividades óptima para implementar una redistribución de planta, aun cuando la implementación es crítica para lograr el éxito del proyecto de redistribución de planta [3]. Las actividades del proyecto son tanto el trabajo de preparación como los movimientos físicos de los departamentos necesarios para lograr la nueva distribución de planta [3]. Driscoll & Sawyer [4] desarrollaron un procedimiento heurístico de programación de actividades para un cambio gradual, el cual identifica las series de movimientos de departamentos a realizar durante un intervalo de tiempo para pasar de una distribución de planta a otra. Lacksonen & Hung [3] desarrollaron el problema de programación de actividades en un proyecto de redistribución de planta, el cual es modelado como un problema de programación entera mixta con dos criterios.

Dentro de los estudios anteriormente desarrollados sobre programación de las actividades para implementar una distribución de planta solo se ha tenido en cuenta la minimización de los costos de la redistribución y del tiempo del proyecto [5], sin embargo no se ha tenido en cuenta que la principal preocupación de las empresas al desarrollar un proyecto de redistribución de planta es no poder cumplir con la demanda debido a las paradas de producción [6].

En este artículo presentamos un modelo de programación lineal entera mixta el cual integra la programación de las actividades de un proyecto de redistribución de planta con la planeación de producción para garantizar el cumplimiento de la demanda durante el desarrollo del proyecto. Encontramos que cuando la utilización de las máquinas de la planta es alta, es necesario tener en cuenta la planeación de la producción durante el proyecto de redistribución para que la planta pueda cumplir con la demanda, por lo tanto en estas ocasiones nuestro modelo es el más adecuado.

La Sección 2, describe el problema de planeación de proyectos de redistribución de planta y muestra los estudios realizados hasta ahora sobre el tema. La Sección 3 muestra el modelo de optimización y lo explica a través de un ejemplo. La Sección 4 plantea los resultados obtenidos. Finalmente, la sección 5 presenta las conclusiones y futuras investigaciones.

2. ANTECEDENTES

Rosenblatt [7] fue el primero en considerar la dinámica del problema de distribución de planta en un horizonte de tiempo, anticipando los cambios en la distribución de la planta en respuesta a demandas pronosticadas. Seguidamente, Batta [8], Urban [9] [10] y Balakrishnan [11] contribuyeron a mejorar el procedimiento propuesto por Rosenblatt [7] estableciendo límites tanto superiores como inferiores para la inversión total del proyecto y proponiendo procedimientos de solución que encuentran mejores resultados para los objetivos establecidos.

Para Liu [12] el problema de distribución de planta dinámico consiste en asignar los departamentos a posiciones predefinidas durante un horizonte de tiempo de tal manera que los costos del manejo de materiales y rediseños sean mínimos. Montreuil & Venkatadri [13] presentaron la primera formulación de un problema de distribución de planta dinámico usando departamentos con áreas y formas desiguales. Este modelo fue mejorado por Montreuil & Laforge [14] incluyendo escenarios probabilísticos en el horizonte de tiempo.

Lacksonen & Ensore [15] sugieren incorporar los cambios futuros que pueden ser anticipados en la distribución de planta como un acercamiento para generar diseños flexibles. Después, Lacksonen [16] propuso un modelo heurístico de dos etapas para resolver el problema de distribución de planta dinámico con departamentos con áreas diferentes. Balakrishnan & Cheng [17] resaltan la importancia de utilizar métodos de simulación y heurísticos en problemas de distribución de planta dinámicos que permiten considerar características más realistas en el problema. Posteriormente, Maziani, Abedzadeh, & Mohebbali [18] representan la estructura de la planta mediante bandas flexibles y utilizan algoritmos genéticos para resolver el problema.

La tendencia más reciente de los modelos de distribución de planta dinámicos es generar distribuciones de planta flexibles que se puedan adaptar fácilmente a los cambios del entorno [19], y es en este contexto, donde la redistribución de planta se convierte en la estrategia de las organizaciones para mantener la eficiencia de sus distribuciones de planta [20] [21].

El problema de redistribución de planta es un caso especial del problema de distribución de planta dinámico en donde el primer periodo a considerar es el presente, se cuenta con una distribución inicial para este primer periodo y sólo se consideran dos periodos de tiempo en el análisis [2]. Este problema comparte muchas características con el problema de distribución de planta dinámico pero es necesario realizar ciertas consideraciones adicionales [2] como las variaciones de las áreas de los departamentos, la existencia o no de maquinaria fija en los departamentos y la entrada y salida de departamentos en la distribución. Hicks & Lowan [22] fueron los primeros en tener en cuenta los costos de reubicar los departamentos en un problema distribución de planta. Kulturel-Konak, Smith & Norman [2] presentan un enfoque de doble objetivo para resolver el problema de redistribución con departamentos expandibles o fijos en el que se minimizan los costos de manejo de materiales y los costos de reorganización. Ferrari, Pareschi, Persona & Regattieri [23], presentaron indicadores cuantitativos y cualitativos que se deben tener en cuenta para realizar un proyecto de redistribución. Adicionalmente, Savsar [24] y Discroll & Sawyer [4] presentaron métodos sistemáticos y algoritmos basados en simulación para resolver

problemas de distribución flexibles, en los que se tiene entre los objetivos minimizar los costos esperados de redistribución. Han, Bae & Jeong [21] presentaron un método para comparar la eficiencia de diferentes alternativas de diseños para la planta a partir de modelos de simulación. A pesar de los avances en el campo, el tema de redistribución de planta sigue siendo poco estudiado y necesita más investigación [25] [26].

Meng, Heragu & Zijm [27] proponen una metodología de 4 fases para la realización de proyectos redistribución de planta. La Fase 1 consiste en generar diseños candidatos, La Fase 2 consiste en evaluar el desempeño de los diseños propuestos en la Fase 1. La Fase 3 consiste en seleccionar el diseño que se va a utilizar. Por último, la Fase 4 consiste en refinar el diseño seleccionado a partir de un análisis interdisciplinar. Posteriormente Rivera et al [6], propusieron incluir la Fase 5: realizar el plan de implementación del proyecto de redistribución. Hasta el momento, la mayoría de las investigaciones se han concentrado en la Fase 1 mientras que muy pocas se han enfocado en la Fase 5.

Los primeros en trabajar en la Fase 5 fueron Driscoll & Sawyer [4] quienes desarrollaron un programa de simulación que facilita la programación de las actividades para pasar de una distribución de planta antigua a una nueva. Lacksonen & Hung [3] desarrollaron un modelo matemático de programación lineal que permite realizar la programación de los movimientos de los departamentos en un proyecto de redistribución de planta y minimiza los costos del traslado de los departamentos. Posteriormente, Rivera et al. [6] encontraron que la principal preocupación de las empresas a la hora de realizar un proyecto de redistribución de planta es la interrupción de los procesos de manufactura y en consecuencia el incumplimiento en los pedidos a los clientes. Es por esto que en este artículo, integramos el modelo de programación de proyectos de redistribución de planta con la planeación de producción de tal manera que se garantiza el cumplimiento de la demanda durante el desarrollo del proyecto de redistribución de planta.

3. MODELO MATEMÁTICO

Lacksonen & Hung [3] presentan un modelo para programar el traslado de los departamentos en un proyecto de redistribución de planta que minimiza simultáneamente

los costos de traslados de los departamentos y la duración total del proyecto. En esta sección presentamos un modelo de programación lineal entera mixta que integra la planeación de producción al modelo propuesto por Lacksonen & Hung, [3] de tal manera que se garantice el cumplimiento de la demanda durante el proyecto de redistribución de planta.

Para asegurar el cumplimiento de la demanda, nuestro modelo tiene en cuenta la capacidad de operación de cada departamento y organiza el proyecto de tal manera que se produzca inventario antes de trasladar los departamentos para abastecer la demanda mientras los departamentos se encuentran fuera de operación. El objetivo del modelo es minimizar los costos de traslado de los departamentos limitando la duración del proyecto a un tiempo máximo.

Para programar el traslado de los departamentos utilizamos el grafo de precedencias propuesto por Lacksonen & Hung [3], donde las precedencias se obtienen sobreponiendo la distribución deseada sobre la distribución actual: “Si un departamento i en la distribución inicial esta debajo de un departamento diferente j en la distribución final entonces el movimiento del departamento i debe preceder el movimiento del departamento j ”. Adicionalmente tenemos en cuenta que no todos los departamentos cambian de posición durante el proyecto, por lo tanto solo van a haber precedencias entre los departamentos que cambien de posición en la distribución.

Para coordinar los traslados de los departamentos, utilizamos un espacio de ubicación temporal a donde los departamentos van para liberar espacio al interior de la planta y permitir el traslado de otros departamentos. En nuestro modelo consideramos que hay departamentos con maquinaria liviana y bajos costos de ajuste que pueden operar mientras estén en ubicaciones temporales, así como hay departamentos de maquinaria pesado que dados sus costos de instalación, no producen mientras se encuentren en ubicaciones temporales.

A continuación explicamos detalladamente los conjuntos, parámetros, variables, función objetivo y restricciones del modelo.

- Conjuntos: Los departamentos (subíndice: i), los productos (subíndice: j), los días (subíndice: d) y los turnos (subíndice: s), en donde cada día esta compuesto por varios turnos.
- Parámetros: las demandas diarias de cada producto (D_{ji}), los turnos correspondientes a cada día ($DPER_{sd}$), si un departamento se traslada o no ($DEPTMOV_i$), el tiempo de producción de cada producto en cada departamento (PT_{ji}), la ruta de producción (PR_{ji}), la duración de cada turno (PTA), los tiempos de preparación (PRT_i), de transporte (TT_i) y de ajuste (TA_i) de cada departamento, la matriz de precedencias de los traslados de los departamentos (P_{il}) y el inventario inicial de cada producto ($INVINI_j$). El límite máximo que puede durar el proyecto ($TMAXX$), el número total de turnos ($MPER$), un parámetro auxiliar (M) que representa un número muy grande, el costo de trasladar cada departamento ($MOVC_i$), el área de cada departamento ($AREAS_i$) y el área máxima que se puede utilizar como ubicaciones temporales de los departamentos ($TURNAREA$).
- Variables: la producción de cada producto en cada turno (PN_{js}), el inventario al final de cada día de cada producto (INV_{jd}), una variable auxiliar para asegurar la capacidad de producción de los departamentos (PNM_{jsi}), el turno en que cada departamento inicia ($TINI_{is}$) y termina ($TFINI_{is}$) el traslado a su posición final, turno de inicio ($DTINI_{is}$) y turno de finalización ($DTFIN_{is}$) del movimiento del departamento a su posición temporal, la duración total del proyecto ($TMAX$), si un departamento va a una posición temporal (Y_i), si un departamento está fuera de funcionamiento o no en cada turno (SD_{is}), y si un departamento está en una posición temporal o no en cada turno ($TURN_{is}$).
- Función objetivo: minimizar los costos del proyecto. Los cuales se pueden resumir en la suma de los costos de los movimientos a posiciones temporales, ya que todos los demás costos son fijos.
- Restricciones: la (2) y la (3) garantizan un solo inicio y un solo final respectivamente, para movimientos de departamentos a su posición final, las restricciones (4) y (5) se encargan de garantizar un solo inicio y un solo final respectivamente para movimientos de departamentos a una posición temporal. Las restricciones (6) y (7) sirven para definir el momento en el que finaliza el movimiento a la posición final y temporal respectivamente. La restricción (8) limita la duración del proyecto a un tiempo máximo dado. La restricción (9) define el

inventario del día uno, mientras que la restricción (10) define este para todos los demás días. La restricción (11) limita la producción diaria según la capacidad de las máquinas, mientras que la restricción (12) se encarga de limitarla según el tiempo disponible. Las restricciones (13) y (14) se encargan de definir la duración de los movimientos. Las restricciones (15) y (16) definen las precedencias si no va al temporal y si va respectivamente, la restricción (17) sirve para definir que el tiempo de finalizar el movimiento final debe ser mayor al tiempo final de ir al temporal para cada departamento. Las restricciones (18), (19), (20) y (21) limitan el área del espacio temporal a lo largo del proyecto. La restricción (22) limita la duración del proyecto.

El modelo de optimización completo se presenta a continuación.

Conjuntos

Departamentos i

Turnos s

Productos j

Días d

Parámetros

D_{ji} : Demanda diaria de cada producto.

$DPER_{sd}$: Turnos correspondientes a cada día.

$DEPTMOV_i$: Si el departamento se mueve.

PT_{ji} : Tiempo de producción de cada producto en cada departamento.

PR_{ji} : Ruta de producción.

PTA : Cantidad de tiempo de un turno.

PRT_i : Tiempo de preparación de cada departamento.

TT_i : Tiempo de transporte de cada departamento.

TA_i : Tiempo de ajuste de cada departamento.

P_{ii} : Indica si el movimiento de un departamento es predecesor de otro.

$INVINI_j$: Inventario inicial de cada producto.

$TMAXX$: Tiempo máximo de duración del proyecto.

$MPER$: Numero total de turnos.

M : Un número grande.

$MOVC_i$: El costo de mover cada departamento.

$AREAS_i$: El área de cada departamento.

TURNAREA: Área del espacio temporal.

Variables

PN_{js} : Producción del producto j en el turno s .

INV_{jd} : Inventario del producto j el día d .

PNM_{jsi} : Producción producto j en turnos en el departamento i .

$TINI_{is}$: Turno s en el que el departamento i inicia el movimiento a su posición final.

$TFIN_{is}$: Turno s en el que el departamento i finaliza el movimiento a su posición final.

$DTINI_{is}$: Turno s en el que el departamento i inicia el movimiento a su posición temporal.

$DTFIN_{is}$: Turnos en el que el departamento i finaliza el movimiento a su posición temporal.

Y_i : Indica si el departamento i va a una posición temporal (binaria).

SD_{is} : Indica si el departamento i se encuentra funcionando en el turno s (binaria).

$TMAX$: Duración del proyecto

$TURN_{is}$: Indica si el departamento i se encuentra funcionando en el turno s (binaria).

Función Objetivo

$$\text{Min } Z = \sum_i Y_i * \text{MOVC}_i \quad (1)$$

Restricciones

$$\sum_s TINI_{is} = \text{DEPTMOV}_i \quad \forall_i \quad (2)$$

$$\sum_s TFIN_{is} = \text{DEPTMOV}_i \quad \forall_i \quad (3)$$

$$\sum_s TINI_{is} = Y_i \quad \forall_i \quad (4)$$

$$\sum_s DTFIN_{is} = Y_i \quad \forall_i \quad (5)$$

$$\sum_s (TFIN_{is} * S) = \sum_s (TINI_{is} * S) + (PRT_i + TT_i + TA_i) \text{DEPTMOV}_i \quad \forall_i \quad (6)$$

$$\sum_s (DTFIN_{is} * S) = \sum_s (DTINI_{is} * S) + (PRT_i + TT_i + TA_i) Y_i \quad \forall_i \quad (7)$$

$$\sum_s (TFIN_{is} * S) \leq TMAX \quad \forall_i \quad (8)$$

$$INV_{j1} = \sum_s (\text{DPER}_{j1} * PN_{j1}) + \text{INVINI}_j - D_{j1} \quad \forall_j \quad (9)$$

$$INV_{jd} = \sum_1^s (\text{DPER}_{s,d} * PN_{js}) + INV_{jd-1} - D_{jd} \quad \forall_j \forall_{d \geq 2} \quad (10)$$

$$PN_{js} \leq \text{PNMAQ}_{jsi} \quad \forall_j \forall_s \forall_i \quad (11)$$

$$\sum_j (\text{PNMAQ}_{jsi} PT_{ji} PR_{ji}) \leq PTA(1 - SD_{is}) \quad \forall_i \forall_s \quad (12)$$

$$SD_{is} \geq \sum_{s=PRT_i-TT_i-TA_i+1}^s TINI_{il} + \sum_{s=PRT_i-TT_i-TA_i+1}^s DTINI_{il} \quad \forall_i \forall_{s \geq PRT_i+TT_i+TA_i} \quad (13)$$

$$SD_{is} \geq \sum_1^s TINI_{il} + \sum_1^s DTINI_{il} \quad \forall_{s \leq PRT_i+TT_i+TA_i-1} \quad \forall_i \quad (14)$$

$$\sum_s(TINI_{is} * S) + PRT_i + TT_i - 1 + Y_i M \geq (\sum_s(TINI_{is} * S) + PRT_i - 1)P_{ii} \quad \forall_{i \neq j} \quad (15)$$

$$\sum_s(TINI_{is} * S) + PRT_i + TT_i - 1 + (1 - Y_i) * M \geq (\sum_s(DTINI_{is} * S) + PRT_i - 1)P_{ii} \quad \forall_{i \neq j} \quad (16)$$

$$\sum_s(TINI_{is} * S) + (1 - Y_i)M \geq \sum_s(DTFIN_{is} * S) \quad \forall_i \quad (17)$$

$$TURN_{is} \geq \sum_1^s(DTFIN_{il}) - \sum_1^{s-PRT_i}(TINI_{il}) \quad \forall_i \quad \forall_{MPER-TA_i \leq s \leq PRT_{i+1}} \quad (18)$$

$$TURN_{is} = 0 \quad \forall_i \quad \forall_{s \leq PRT_i} \quad (19)$$

$$TURN_{is} = 0 \quad \forall_i \quad \forall_{s \geq MPER-TA_{i+1}} \quad (20)$$

$$\sum_i(TURN_{is} * AREA_i) \leq TURNAREA \quad \forall_s \quad (21)$$

$$TMAX \leq TMAXX \quad (22)$$

Para ilustrar este modelo realizamos un ejemplo de un proyecto de redistribución de planta. La distribución inicial y la distribución final se muestran en las Figuras 1(a) y 1(b) respectivamente, donde la cafetería, el espacio vacío y la estatua no representan departamentos productivos.

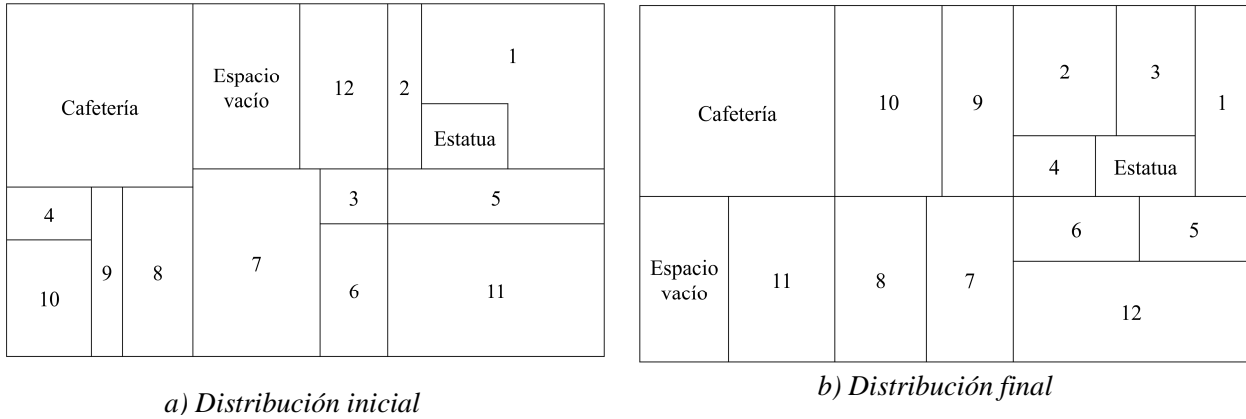


Figura 1: Distribuciones de planta [3]

La Figura 2 muestra el grafo de precedencias de los traslados de los departamentos. Por ejemplo el departamento 1 es precedencia del departamento 2, de tal manera que se debe mover el departamento 1 primero para que el departamento 2 pueda llegar a su posición final.

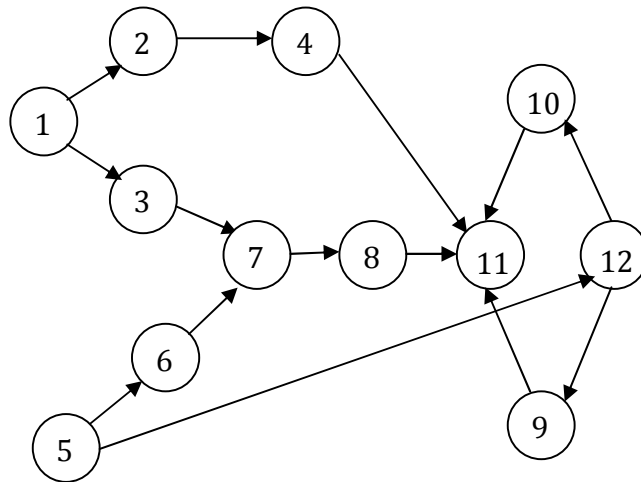


Figura 2: Grafo de precedencias

Los datos utilizados en el ejemplo son los siguientes:

	PRT	TT	TA	MOVC	ÁREAS	DEPTMOV
Dept 1	2	3	1	8000	8000	1
Dept 2	1	2	1	4800	2400	1
Dept 3	2	1	1	2800	2800	1
Dept 4	1	1	1	2000	2000	1
Dept 5	2	2	1	8400	4200	1
Dept 6	1	1	1	3600	3600	1
Dept 7	2	4	1	8000	8000	1
Dept 8	1	2	1	5200	5200	1
Dept 9	1	2	1	3900	3900	1
Dept 10	2	2	1	22500	4400	1
Dept 11	1	5	1	54000	10800	1
Dept 12	1	2	1	4800	4800	1

Numero de departamentos	12
Numero de turnos	15
Tiempo máximo	15
Área posición temp.	19000
PTA	480

	Día				
	1	2	3	4	5
Producto 1	12	15	14	10	13
Producto 2	17	11	17	12	8
Producto 3	14	10	11	12	10
Producto 4	10	9	11	14	14

Tabla 1. Demanda (D)

	Departamento											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dept 1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dept 2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Dept 3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Dept 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Dept 5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Dept 6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Dept 7	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Dept 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Dept 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Dept 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Dept 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Dept 12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0

Tabla 2. Precedencias (P)

	Día				
	1	2	3	4	5
Turno 1	1	0	0	0	0
Turno 2	1	0	0	0	0
Turno 3	1	0	0	0	0
Turno 4	0	1	0	0	0
Turno 5	0	1	0	0	0
Turno 6	0	1	0	0	0
Turno 7	0	0	1	0	0
Turno 8	0	0	1	0	0
Turno 9	0	0	1	0	0
Turno 10	0	0	0	1	0
Turno 11	0	0	0	1	0
Turno 12	0	0	0	1	0
Turno 13	0	0	0	0	1
Turno 14	0	0	0	0	1
Turno 15	0	0	0	0	1

Tabla 3. Turnos por día(DPER)

	Departamento											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Producto 1	5	4	5	6	7	9	2	2	4	5	6	2
Producto 2	2	3	4	4	3	3	3	9	9	5	6	5
Producto 3	4	3	5	2	2	6	5	2	6	4	2	5
Producto 4	3	2	4	6	2	5	4	3	2	3	3	5

Tabla 4. Tiempo de producción(PT)

	Departamento											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Producto 1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1
Producto 2	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0
Producto 3	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0
Producto 4	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0

Tabla 5. Ruta de producción (PR)

La Figura 3 muestra la programación de los movimientos de los departamentos obtenida, en esta podemos ver por ejemplo dado que el departamento 1 era precedencia del departamento 2, este ultimo solo puede trasladarse a su posición final, cuando el departamento 1 la halla desocupado, en este caso esto se dio en el periodo 7. Las Tablas 6 y 7 muestran la producción en cada turno y el inventario al final de cada día de cada producto obtenido como resultado del modelo.

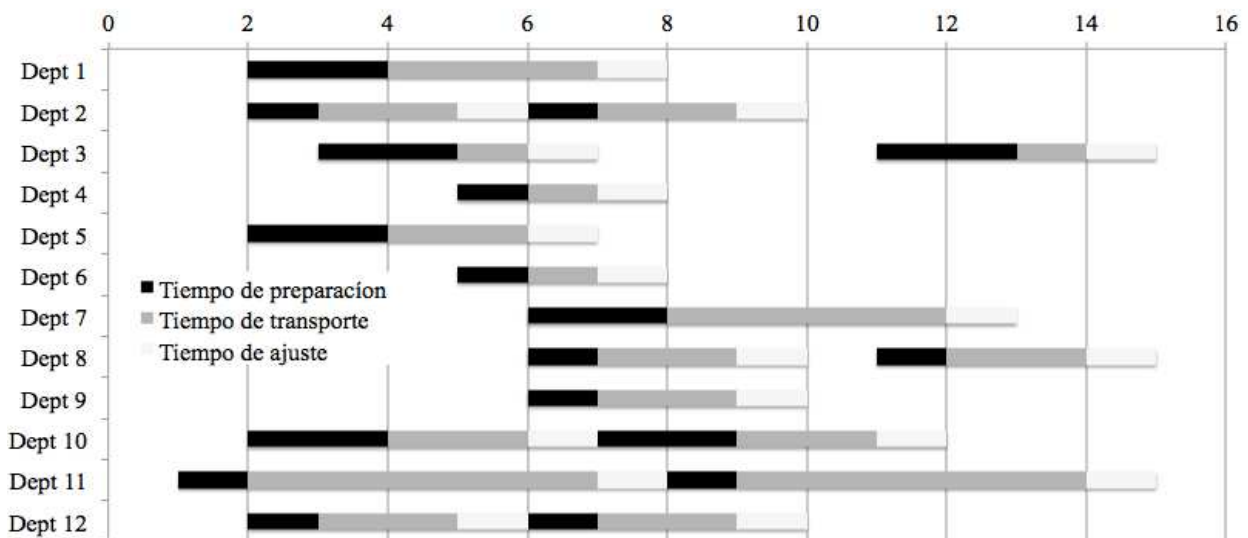


Figura 3: Programación de las actividades.

	Prod 1	Prod 2	Prod 3	Prod 4
Turno 1	41	10	47	30
Turno 2	0	47	0	0
Turno 3	0	0	0	0
Turno 4	0	0	0	0
Turno 5	0	0	0	0
Turno 6	0	0	0	0
Turno 7	0	0	0	0
Turno 8	0	0	0	0
Turno 9	0	0	0	0
Turno 10	10	0	0	14
Turno 11	0	0	0	0
Turno 12	0	0	0	0

	Prod 1	Prod 2	Prod 3	Prod 4
Día 1	29	40	33	20
Día 2	14	29	23	11
Día 3	0	12	12	0
Día 4	0	0	0	0
Día 5	0	0	0	0

Tabla 7. Inventario

Turno 13	0	0	0	0
Turno 14	0	0	0	0
Turno 15	13	8	10	14

Tabla 6. Producción

El proyecto tuvo una duración de 14 días, y el costo de traslado de los departamento fue de \$94.100 para hallar este costo no se tuvo en cuenta el costo de trasladar los departamentos no productivos.

4. RESULTADOS

El modelo planteado por Lacksonen & Hung [3] no tiene en cuenta la planeación de la producción al momento de minimizar los costos de traslado de los departamentos y la duración del proyecto. Cuando la utilización de las máquinas de la planta es muy baja, no es necesario tener en cuenta la planeación de la producción durante el proyecto de redistribución, ya que las máquinas tienen capacidad de sobra para cumplir con la demanda. Sin embargo cuando la utilización de las máquinas de la planta es alta, es necesario tener en cuenta la planeación de la producción durante el proyecto de redistribución para que la planta pueda cumplir con la demanda. En esta sección, hallamos la utilización de las máquinas de la planta donde es necesario tener en cuenta la planeación de la producción durante el proyecto de redistribución de planta.

Para encontrar esta utilización generamos 30 escenarios aleatorios como se muestran en la Tabla 8, en los cuales el número de departamentos oscila entre 3 y 14, y se producen entre 3 y 13 productos. En cada uno de estos escenarios, encontramos la utilización de las máquinas de la planta mínima que hace necesario tener en cuenta la planeación de la producción durante el proyecto de redistribución de planta.

Escenarios	No. Deptos	No. Turnos	No. Productos	Utilización
1	4	12	3	49%
2	4	19	3	43%
3	3	19	3	53%
4	4	19	3	50%
5	4	19	3	37%
6	4	19	3	62%
7	3	19	3	54%
8	4	19	3	56%
9	4	19	3	57%
10	3	19	3	65%
11	4	19	3	55%
12	4	19	3	37%
13	3	19	3	55%

14	4	19	3	41%
15	4	19	3	43%
16	3	19	3	50%
17	4	19	3	45%
18	4	19	3	66%
19	9	17	8	65%
20	9	17	8	67%
21	9	17	8	60%
22	9	17	8	54%
23	9	17	8	63%
24	9	17	8	69%
25	9	17	8	62%
26	9	17	8	64%
27	9	17	8	57%
28	9	17	8	59%
29	14	22	13	68%
30	14	22	13	60%

Tabla 8. Resultados utilización de las máquinas de la planta

A partir de la Tabla 8 encontramos la probabilidad que sea necesario considerar la planeación de la producción durante el proyecto de redistribución dada la utilización de las máquinas de la planta (Figura 4). Por ejemplo, para una utilización del 10% hay una probabilidad del 0% de que sea necesario considerar la planeación de la producción, mientras que para una utilización del 60% hay una probabilidad del 63% de que sea necesario considerar la planeación de la producción.

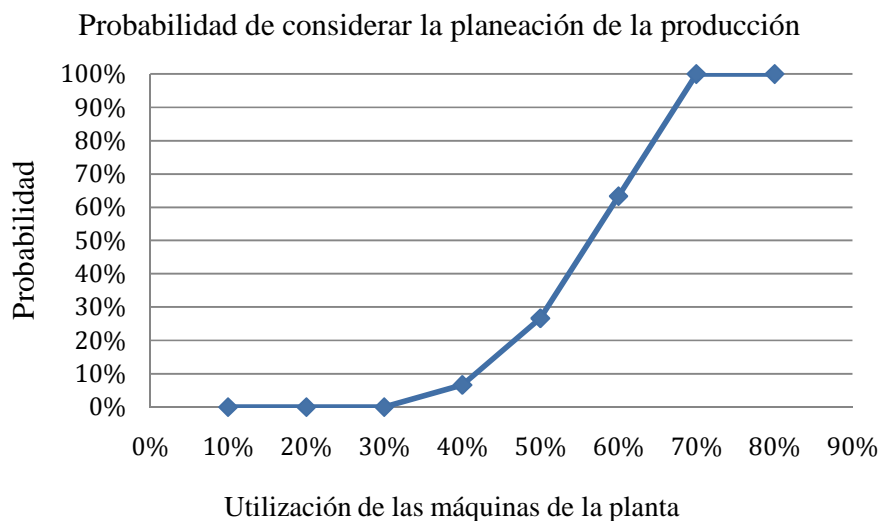


Figura 4. Análisis de la Utilización de las Máquinas de la planta

A partir de los resultados obtenidos podemos concluir que para una utilización de las máquinas de la planta mayor al 60% es mejor utilizar nuestro modelo, ya que al utilizar el modelo de Lacksonen & Hung [3] existe un 63,3% de probabilidad de que no sea posible cumplir con la demanda. Por otro lado, para utilizations de las máquinas de la planta menores al 40% no es necesario considerar la planeación de la producción durante el proyecto de redistribución.

5. CONCLUSIONES Y CAMPOS FUTUROS DE INVESTIGACIÓN

En este artículo planteamos un modelo de programación lineal entera mixta para realizar la programación de las actividades en un proyecto de redistribución de planta conjuntamente con la planeación de la producción de tal manera que se garantice el cumplimiento de la demanda durante el proyecto de redistribución de planta.

Nuestro modelo es aplicable en empresas que tengan maquinaria liviana en las cuales los costos asociados con el traslado e instalación de los departamentos son bajos de tal manera que estos pueden producir en una posición temporal. Adicionalmente al garantizar el cumplimiento de la demanda nuestro modelo se vuelve más aplicable en la realidad, pues no cumplir con la demanda es una de las mayores preocupaciones de las empresas a la hora de realizar un proyecto de redistribución de planta [6].

Encontramos que empresas que tengan una utilización de las máquinas mayor al 60% deben utilizar nuestro modelo a la hora de realizar la programación de las actividades en un proyecto de redistribución de planta, pues al utilizar el modelo propuesto por [3] existe un 63,3% de probabilidades de no cumplir con la demanda.

En el futuro se puede incluir en el modelo la disminución de la eficiencia que existe cuando un departamento se encuentra produciendo en una posición temporal ya que esto afecta directamente el cumplimiento de la demanda y de tener en cuenta esta disminución el resultado sería mucho más cercano a la realidad. Con este mismo propósito se puede modificar el modelo para que reciba una demanda estocástica.

En muchos proyectos de redistribución de planta se incluye nueva maquinaria y estaciones de trabajo lo que implica una expansión o contracción de algunos departamentos, por lo cual es importante que el modelo pueda considerar estos cambios. Adicionalmente se puede incluir en el

modelo un algoritmo que permita determinar las precedencias que actualmente son encontradas manualmente sobreponiendo la distribución final con la inicial.

En algunas industrias como la química o la médica existen departamentos productivos que no pueden estar juntos, debido a esto es relevante agregar al modelo una matriz de adyacencias que indique cuales departamentos pueden estar juntos.

6. REFERENCIAS

- [1] L. Nicol y R. Hollier, «Plant layout in practice,» *Material flow*, vol. 1, pp. 101-107, 1985.
- [2] S. Kulturel-Konak, A. Smith y B. Norman, «Bi-objective facility expansion and relayout considering monuments,» *IIE Transactions*, vol. 39, pp. 747-761, 2007.
- [3] T. Lacksonen y C.-Y. Hung, «Project scheduling algorithms for re-layout projects,» *IIE Transactions*, vol. 30, pp. 91-99, 1998.
- [4] J. Driscoll y J. Sawyer, «A computer model for investigating the re-layout of batch production areas,» *International Journal of Production Research*, vol. 23, n° 4, pp. 783-794, 1985.
- [5] T. Lacksonen y M. Vijayvargiya, «Project scheduling for re-layout projects,» *Industrial Engineering Research Conference*, pp. 566-570, 1994.
- [6] L. Rivera, L. Cardona, L. Vásquez y M. Rodríguez, «Selección de alternativas de redistribucion de planta: Un enfoque desde las organizaciones,» *Revista S&T*, vol. 10, n° 23, pp. 9-26, 2012.
- [7] M. Rosenblatt, «The dynamics of plant layout,» *Managment Sci*, vol. 32, n° 1, pp. 76-86, 1986.
- [8] R. Batta, «The dynamics of plant layout,» *Management Science*, vol. 33, n° 8, pp. 10-65, 1987.
- [9] Urban, «Solution procidures for the dynamic facility layout problem,» *Ann. Opper*, vol. 76, pp. 323-342, 1998.
- [10] T. Urban, «Computacional performance and efficiency of lower-bound procidures for the dinamic facility layout problem,» *Eur. J. Opper*, vol. 57, n° 2, pp. 271-279, 1992.
- [11] J. Balakrishnan, «The dynamics of plant layout,» *Management Science*, vol. 39, n° 5, pp. 654-655, 1993.
- [12] W. Liu, *Tabu search for the dynamic facility layout problem*, 2005.
- [13] B. Montreuil y U. Venkaatadri, «Strategic interpolative design of dynamic manufacturing systems layout,» *Managment Sci*, vol. 37, n° 6, pp. 682-694, 1991.
- [14] B. Montreuil y A. Laforge, «Dynamic layout design giving a scenario tree of probable futures,» *Eur J Oper Res*, vol. 63, n° 2, pp. 271-286, 1992.
- [15] T. Lacksonen y E. Enscore, «Quadratic assigment algorithms for the dynamic layout problems,» *Int J Prod Res*, vol. 31, pp. 503-517, 1993.

- [16] T. Lacksonen, «Static and dynamic layout problems with varying areas,» *Journal of the Operational Research Society*, vol. 45, n° 1, pp. 59-69, 1994.
- [17] J. Balakrishnan y C. Cheng, «Dynamic layout algorithms: a state of the art survey,» *Omega*, vol. 26, n° 4, pp. 507-521, 1998.
- [18] M. Mazinani, M. Abedzadeh y N. Mohebbali, «Dynamic facility layout problem base on flexible bay structure and solvig by genetic algorithm,» *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 65, pp. 929-943, 2013.
- [19] J. Tompkins y J. White, *Facilities planning*, New York, NY: Jhon Wiley, 1984.
- [20] R. A. Millen, M. M. Solomon y P. Afentakist, «The impact of a single input/output device on layout considerations in flexible manufacturing systems,» *International Journal of Production Research*, vol. 30, n° 1, pp. 89-93, 1992.
- [21] K. Han, S. Bae y D. Jeong, «A Matrix-Based Approach to the Facility Re-Layout Problem,» *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciencies*, vol. 7, n° 5, pp. 584-591, 2013.
- [22] P. Hicks y T. Lowan, «CRAFT-M for layout arregment,» *Indust. Engrg*, vol. 8, n° 5, pp. 30-35, 1976.
- [23] E. Ferrari, A. Pareschi, A. Persona y A. Regattieri, « Plant Layout Computerized Design and Relayout Program (LRP),» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, pp. 917-922, 2003.
- [24] M. Savsar, «Flexible facility layout by simulation,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 20, n° 1, pp. 155-165, 1991.
- [25] A. Baykasoglu, T. Dereli y I. Sabuncu, «An ant colony algorithm for solving budget constrained and unconstrained dynamic facility layout problems,» *Omega*, vol. 34, n° 4, p. 385-396, 2006.
- [26] Sadan y Kulturel-Konak, «Approaches to uncertainties in facility layout problems: Perspectives at the beginning of the 21st Century,» *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 18, n° 2, pp. 273-284, 2007.
- [27] G. .. H. S. S. & Z. W. Meng, «Reconfigurable layout problem,» *International Journal of production research*, vol. 42, n° 22, pp. 4709-4729, 2004.