

## MODELO MATEMÁTICO DE ROTACIÓN DE PUESTOS DE TRABAJO PARA LA MINIMIZACIÓN DE TRASTORNOS MÚSCULO-ESQUELÉTICOS LUMBARES

**María Fernanda Ramos Márquez**

Ingeniera Industrial, Universidad de Córdoba  
Carrera 6 No. 76-10, Montería - Córdoba, Colombia  
mf\_ramos91@hotmail.com

**Diego Armando Soto De la vega**

Ms(e) Ingeniería de Producción, Universidade Federal de São Carlos  
Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Km 110 Bairro do Itinga, Sorocaba – SP, Brasil  
die-soto@hotmail.com

**Giselle Rossana Badel Mendez**

Ingeniera Industrial, Universidad de Córdoba  
Carrera 6 No. 76-10, Montería - Córdoba, Colombia  
gisellebadel@gmail.com

**Jorge Mario Lopez Pereira**

Prof. Ms. Ingeniería Industrial, Universidad de Córdoba  
Carrera 6 No. 76-10, Montería - Córdoba, Colombia  
jotamlopez@gmail.com

### RESUMEN

El presente artículo tiene como objetivo presentar un modelo matemático para determinar las asignaciones y rotaciones de los trabajadores en los diferentes turnos y puestos de trabajo en una empresa productora de baldosas en mármol para minimizar el impacto músculo – esquelético lumbar de los trabajadores cuando cargas pesadas deben ser levantadas. Este impacto es medido con un indicador llamado Job Severity Index (JSI). Un estudio de caso fue abordado para demostrar la eficiencia del modelo entero mixto propuesto. Varios escenarios en las áreas de producción y almacén fueron analizados para determinar el intervalo de rotación más adecuado y la mejor función objetivo de las propuestas. Los resultados demuestran la eficacia del modelo, arrojando mejores resultados que los actuales en tiempo computacionales aceptables para la empresa.

**PALABRAS CLAVE.** Trastornos músculo – esqueléticos (TME), programación lineal entera mixta, Job Severity Index (JSI).

### ABSTRACT

This article aims to present a mathematical model to determine the assignments and rotations of workers in different shifts and jobs in a company that produces marble tiles to minimize the lumbar muscle - skeletal impact of workers when heavy loads must be raised. This impact is measured by a tool called the Job Severity Index (JSI). A case study was addressed to demonstrate the efficiency of the mixed integer proposed model. Various stages in the production and warehouse areas were analyzed to determine the most appropriate rotation interval and the best of the proposed objective function. The results demonstrate the effectiveness of the model, obtaining better results than the current acceptable computational time for the company.

**KEYWORDS.** Musculoskeletal disorder, mixed integer linear programming, Job Severity Index.

## 1. Introdução

Kumar (2001) asegura que con el avance de la ciencia, la tecnología y la industrialización, las tensiones laborales y físicas han cambiado dramáticamente causando un evolutivo malestar, la demanda de esfuerzo, la repetición de actividades o posturas que se asumen por períodos prolongados, estresó los sistemas físicos humanos, pues estos procesos son inherentemente poco naturales. Por lo tanto, los seres humanos no están ni anatómicamente adaptados para soportar los esfuerzos físicos de hoy ni son mentalmente aptos para soportar las tensiones psicológicas. La repetitividad de la actividad laboral ha demostrado ser un fuerte factor de riesgo para los trastornos de trauma acumulativo.

Por tanto, para disminuir el riesgo de adquisición de lesiones musculoesqueléticas, la repetitividad de la actividad y variar el esfuerzo físico es necesaria la rotación de puestos de trabajo, que no solo trae beneficios económicos a largo plazo para el empleado y el empleador sino que disminuye el riesgo de desarrollar enfermedades al mediano y largo plazo que pueden afectar la calidad de vida de los trabajadores en general (KOIKE, 1984).

Según apuntan investigadores, ante la preeminencia de las organizaciones por obtener grandes beneficios, nace la necesidad de desenvolver alternativas al margen de costos en equipamiento y rediseño de los puestos para prevenir los Trastornos músculo-esqueléticos (TME). Una estrategia viable puede ser la rotación de puestos, ya supone un bajo costo potencial de puesta en marcha. En contraste, la efectividad de tal estrategia reside en su correcta implementación. Muchas veces el objetivo de la rotación de puestos es que el trabajador pase de un cargo a otro en un periodo de tiempo definido, con el fin de minimizar la carga biomecánica acumulada en una parte específica del cuerpo. La efectividad de la rotación de puestos estriba, en cierta medida, del modo en que se balancee la carga biomecánica entre las distintas partes del cuerpo. Si un operario rota de un trabajo que demanda un estrés exorbitante en un punto determinado del cuerpo a otro que también lo exige en esa misma área, la agenda de rotación puede terminar siendo ineficaz como mecanismo de prevención del riesgo de lesiones. Por otro lado, una buena agenda de rotaciones puede disminuir el estrés en zona del cuerpo si se asegura que la agenda de rotación alterna las exigencias físicas de las diferentes partes del cuerpo (JORGENSEN et al., 2005).

Investigadores y profesionales de la ergonomía y factores humanos tratan de comprender y optimizar el rendimiento de las personas en los sistemas de trabajo. Investigadores de las áreas de administración e investigación de operaciones tienen una motivación similar por comprender los sistemas de trabajo y hay ejemplos útiles de los esfuerzos para incluir aspectos de rendimiento humano en modelos matemáticos y simulaciones de sistemas o partes de sistemas (BAINES et al., 2004; MASON et al., 2005). Sin embargo, hay pocos ejemplos de colaboración entre las disciplinas de los factores humanos y la investigación operativa.

Es por ello que un punto de encuentro entre ambas corrientes, es la aplicación de modelos matemáticos que generen rotaciones de puestos de trabajo con el fin de minimizar factores humanos que afecten la salud de los trabajadores, ya sea el estrés, el ruido, la iluminación, etc.

Así, el objetivo de este artículo es presentar una propuesta de modelo de optimización que permita disminuir la ocurrencia de trastornos músculo-esquelético a través del tiempo mediante la asignación adecuada a turnos y rotación de puestos de trabajo. El modelo considera el número de turnos de trabajo por día (mañana, tarde, noche), el número de intervalos de rotación por turno y la severidad del impacto lumbar dependiendo de la secuencia proyectada para el operario y de las habilidades inherentes del mismo. El modelo se desarrolló para atender a las necesidades y especificaciones de la empresa de estudio, pero puede ser fácilmente extendido variando los parámetros del modelo para procesos similares en otras organizaciones.

El trabajo se organiza de la siguiente forma: la sección 2 presenta una revisión de la bibliografía pertinente a la investigación, la sección 3 describe el problema, incluidas las suposiciones y limitaciones, bien como el modelo matemático propuesto; en la sección 4 se presenta

el caso de estudio, en el apartado 5 los resultados computacionales y sus interpretaciones son presentadas, y finalmente, la sección 6 resume las conclusiones de este estudio.

## 2. Revisión bibliográfica: Rotación de puestos de trabajo

Varios estudios de casos realizados por Koike (1984) en 1950 aseguran que para esa época las empresas Japonesas ya practicaban la rotación de puestos de trabajo. Inspirándose en los éxitos económicos de las empresas japonesas, surgió un crecimiento interesante en el desenvolvimiento y estudio por la rotación en E.U. (FARRANT, 1987)

Varios autores han aportado teorías sobre la adopción de prácticas de rotación de puestos de trabajo (OSTERMAN, 1994; BAILEY 1994; PIL y MACDUFFIE, 1996; GITTLEMAN et al., 1998; ERIKSSON, 2002) pero entre sus aportes no se explica claramente la importancia de la rotación de los puestos de trabajo, y muchas de sus teorías no son comprobables. E incluso, existen trabajos de la misma época, como los de Campion et al. (1994), Kusunoki y Numagami (1998), que muestran que la aplicación del método de rotación de puestos de trabajo no muestra beneficios estadísticamente representativos para la empresa e incluso puede traer consecuencias negativas. Sin embargo, dichos trabajos son aplicaciones de información muy particular, difícilmente generalizables.

Muchas de las investigaciones de rotación de puestos de trabajo fueron tomando perspectivas interesantes, incluyendo factores relativos a la salud. En el siglo XXI las lesiones de espalda baja y muñecas son los temas más discutidos en la rotación laboral (ERIKSSON y ORTEGA, 2002). Frazer (2003), expone un método de programación de rotación de puestos de trabajo, teniendo en cuenta la espalda y otros trastornos relacionados con el trabajo, y se estudia con el uso de factores de ponderación de tiempo. Tharmmaphornphilas (2004), describe un método cuantitativo para evaluar las tareas de levantamiento manual. El mismo autor, en 2007, aborda la cuestión de rotación de cargos mediante la adopción de un índice que evalúa la gravedad de tareas de levantamiento, el Job Severity Index, con el fin de determinar el programa de que disminuyera la probabilidad de lesión en la espalda baja debido al levantamiento.

Aryanezhad et al. (2009) propusieron el desarrollo de un programa de rotación de puestos de trabajo seguro basado en las habilidades de los trabajadores para encontrar el mejor patrón de asignación de trabajadores a las categorías de trabajo en función de su nivel de habilidad, en donde se utiliza el JSI para restringir el modelo, permitiéndole un JSI menor o igual al JSI máximo permitido para cada puesto de trabajo.

Los trastornos musculo-esqueléticos también se encuentran entre los principales temas de investigaciones anteriores. La eficiencia de rotación en el empleo, en relación con el esfuerzo musculo-esquelético, se basa en el equilibrio adecuado de tensiones a través del cuerpo del empleado (JORGENSEN et al., 2005).

Por otra parte, programación entera y algoritmos genéticos han sido utilizados como herramientas para la evaluación de los criterios de seguridad de programación de rotación en el trabajo. Carnahan (2000), Chryssolouris y Subramaniam (2001) propusieron un método para la planificación dinámica de trabajo aproximando el problema a un *Scheduling job shops* e usaron algoritmos genéticos para resolverlo. Zulch, Rottinger e Vollstedt (2004) se centraron en los aspectos más tecnológicos, relacionados con la reorganización de estructuras de personal, en lugar de rotación en el trabajo. Bhadury e Radovilsky (2006) discute a rotación de personal desde una perspectiva económica, centrándose en los costos y el fastidio del operador. En este trabajo, la rotación se dirige, después de haber tenido en cuenta, factores que se enfocan en el desarrollo de la producción, la productividad de planta, fatiga de los empleados, la calidad del producto y el coste.

Azizi et al. (2010) desarrollan una metodología de rotación de puestos de trabajo que busca aliviar el tedio del empleado y aprovechar el efecto de los intervalos de rotación en la habilidad del trabajador de aprender y olvidar. Siguiendo este mismo enfoque, Fægria et al. (2010) se enfocaron en explorar los beneficios y desafíos de mejorar la redundancia del conocimiento entre los

desarrolladores que participan en la rotación de puestos de trabajo. Michalos et al (2010) presentaron un método capaz de generar planes de rotación de cargos para sistemas de montaje.

Finalmente, as investigaciones más recientes de rotación para prevención de TME están también preocupadas con métodos de solución y enfoques multi-criterio. El diseño de los planes de rotación se basa no sólo en criterios ergonómicos, sino también en temas relacionados con la calidad del producto y la satisfacción del empleado (ASENSIO-CUESTA et al., 2011). Asensio-Cuesta et al. (2012) propusieron un algoritmo genético multi-criterio para generar planes de rotación de puestos de trabajo con objetivo de prevenir los trastornos musculo-esqueléticos causados por la acumulación de fatiga; este algoritmo proporciona la mejor adecuación disponible entre los trabajadores y las competencias necesarias para realizar las tareas. En ese mismo año, Asensio et al. (2012a) presentaron un algoritmo genético para obtener programaciones de rotación destinados a prevenir TME en entornos caracterizados por la presencia de altas repeticiones de movimientos; para ello, combina la eficacia de los algoritmos genéticos con el método de evaluación ergonómica OCRA.

En la literatura se puede visualizar una laguna en la implementación de métodos exactos para determinar las rotaciones más adecuadas de puestos de trabajo, si bien varios trabajos han sido propuestos, pocos han tenido en cuenta los TME y son todavía menos los trabajos basados en la medición de índices de severidad de la carga. Este trabajo abordara precisamente esos factores.

### 3. Descripción del problema

El problema específico de la investigación, pertenece al conjunto de problemas de optimización combinatoria, concretamente al grupo de *Timetabling and Scheduling Problems* (Problemas de horarios y secuenciación), en el cual se pretende determinar la mejor configuración de un grupo de variables que, al cumplir ciertas restricciones, minimicen o maximicen la función objetivo. Para más detalles de este problema el lector puede consultar a Sigl et al. (2003).

No sólo se trata de asignar trabajadores a un cargo, sino que también se propende encontrar la mejor secuencia de trabajo a través de los intervalos de rotación de todas las combinaciones posibles que minimicen el JSI de los operarios. Los trabajadores a lo largo de los días permanecerán en el mismo turno en que fueron asignados. En un determinado caso, es posible que la mejor secuencia de trabajo sea aquella donde el trabajador ocupe el mismo cargo a través de los intervalos de rotación, o donde el trabajador deba siempre cambiar de puestos de trabajo en cada intervalo.

Para nuestro caso, fue de interés determinar la veracidad de las siguientes aseveraciones: la primera indica que un aumento en el número de periodos de rotación, disminuye los valores de JSI y consecuentemente a probabilidad de ocurrencia de lesiones. La segunda se refiere a que independientemente del número de rotaciones realizadas, los valores de JSI no disminuirán del umbral máximo a menos que se haga una evaluación y reestructuración del contenido de actividades de cada cargo.

Los supuestos del modelo son los siguientes:

- Los trabajadores están distribuidos entre varios turnos de trabajo, los cuales son de la misma duración.
- Los trabajadores tienen habilidades y dificultades diferentes, en este sentido dos trabajadores asignados a la misma secuencia de rotación pueden generar índices de impacto distintos.
- En cada turno, existen varios intervalos de rotación, los cuales son defendidos previamente por el proceso productivo.
- Los cargos pueden no estar disponibles en todos los turnos, debido a eso, el número de trabajadores por turno no siempre debe ser el mismo.

La Figura 1 es una representación adecuada para el problema estudiado. Note que el problema puede ser fácilmente dividido en dos etapas: asignación y secuenciación. Los cuáles serán

abordados de manera conjunta en el modelo matemático propuesto. Los índices y notaciones pueden ser verificados en la modelación abajo.

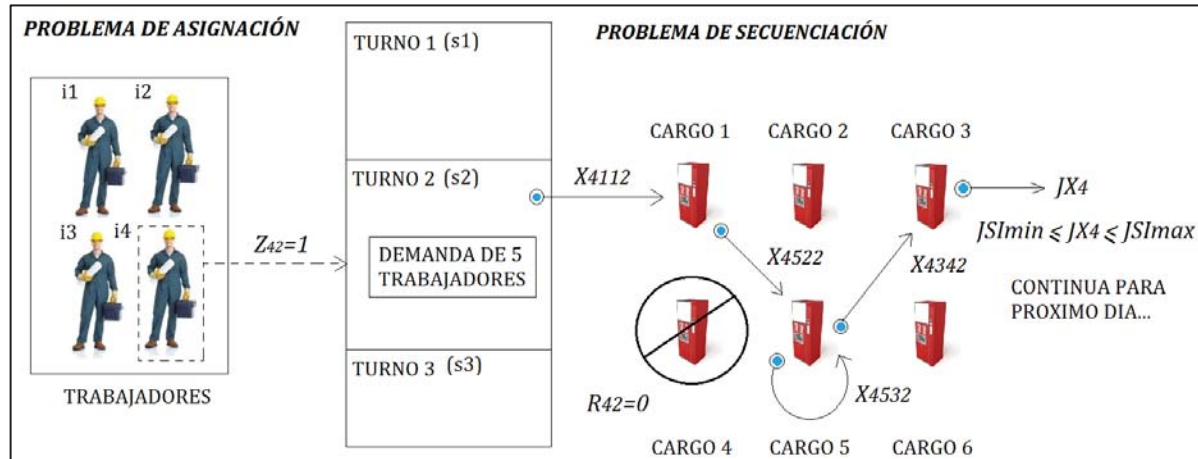


Figura 1. Problema de asignación y rotación de trabajadores.

La siguiente notación será empleada para describir el modelo con 3 periodos de rotación, pero un número diferente de periodos puede ser considerado variando el número de índices utilizados:

### Índices y parámetros.

- $i$  Índice de trabajadores
- $j, k, l$  Índices de cargos donde  $j$  es el cargo ocupado en el período de rotación 1,  $k$  es el cargo ocupado en el período de rotación 2 y  $l$  es el cargo ocupado en el período de rotación 3. El número de índices utilizados debe ser igual al número de periodos de rotación analizados, para este caso usaremos 3 periodos de rotación (puede ser variado modificando el número de índices).
- $t$  Índice de periodos de rotación
- $s$  Índice de turnos de trabajo al día
- $d$  Conjunto de días laborales
- $C_{ijkl}$  Índice de esfuerzo en el trabajo (JSI) para el trabajador  $i$  tras haber estado en los cargos  $j, k$  y  $l$  en los periodos de rotación 1, 2 y 3 respectivamente durante el día  $d$ .
- $JSI_{max}$  Valor máximo deseado para el JSI al final del día  $d$ .
- $JSI_{min}$  Valor mínimo deseado para el JSI, lo cual es 0.
- $R_{js}$  1 si el cargo  $j$  está disponible para ser ocupado en el turno  $s$ ; 0 caso contrario.

### Variables de decisión

- $X_{ijtsd}$  1 si el trabajador  $i$  es asignado al cargo  $j$  en el periodo de rotación  $t$  durante el turno  $s$  el día  $d$ ; 0 caso contrario.
- $z_{is}$  1 si el trabajador  $i$  es asignado al turno  $s$ ; 0 caso contrario.
- $JX_{id}$  Valor de JSI del trabajador  $i$  al final del día  $d$ .
- $y_{id}$  Desviación del JSI con respecto al valor máximo deseado para el trabajador  $i$  en el día  $d$

La variable  $z_{is}$  es de gran importancia ya que evita que un trabajador sea trasladado de un turno a otro tras un cambio de intervalo de rotación, además, permite asignar a cada trabajador en un único turnos. Cabe agregar que el modelo hace la asignación de los trabajadores en el mismo turno durante todo el horizonte de planeación por condiciones de la empresa. Entonces siendo asignado el primer día, de ahí en adelante los trabajadores permanecen en el turno que fueron asignados, convirtiéndose esta variable en un parámetro.

Las funciones objetivos propuestas para este problema y las restricciones están dada por:

$$\text{Minimizar } \sum_i y_{id} \quad (1)$$

$$\text{Minimizar } \sum_i JX_{id} \quad (2)$$

$$\text{Minimizar } JX_{id} \quad (3)$$

La primera función objetivo (1) busca minimizar las desviaciones positivas (por encima del límite) o negativas (por debajo del límite) con respecto a un intervalo deseado de JSI, llámese DJSI. La F.O. (2) procura minimizar la sumatoria del valor del JSI de cada trabajador al final del período de estudio, llámese SJSI. La última (3) procura minimizar el valor máximo del JSI del trabajador  $i$  al final del período de estudio.

Sujeto a:

$$\sum_s z_{is} = 1 \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_j x_{ijtsd} = z_{is} \quad \forall i, t, s, d \quad (5)$$

$$\sum_i x_{ijtsd} = R_{js} \quad \forall j, t, s, d \quad (6)$$

$$JX_{id} - y_{id} \leq JSI_{max} \quad \forall i, d \quad (7a)$$

$$JX_{id} + y_{id} \geq JSI_{min} \quad \forall i, d \quad (7b)$$

$$JX_{id} \geq \left( (x_{i,l,t+1,s,d} + x_{i,k,t,s,d} + x_{i,j,t-1,s,d}) - (T - 1) \right) \cdot C_{ijkla} \quad \forall i, j, k, l, t, s, d \quad (8)$$

$$y_{id} \in \mathbb{R}^+; JX_{id} \in \mathbb{R}^+; x_{ijtsd} \in (0,1); z_{is} \in (0,1) \quad (9)$$

La restricción (4) asegura que todo trabajador debe ser asignado a un único turno. La restricción (5) garantiza que todo trabajador en cada turno será asignado a un único puesto de trabajo durante cada periodo de rotación para cada día del horizonte de planeación si el trabajador está asignado en el turno  $s$ . La restricción (6) asegura que para cada puesto de trabajo en todos los periodos de rotación de todos los turnos, debe haber un único trabajador asignado, si el puesto de trabajo está disponible en ese turno para ser ocupado.

Las restricciones (7a) y (7b) capturan las desviaciones por encima y por debajo del intervalo deseado del JSI. La restricción (8) evalúa el valor total del JSI para el trabajador  $i$  al final de cada día, este valor será la suma de los JSI luego de haber pasado por los cargos  $j$ ,  $k$  y  $l$  en los periodos  $t - 1$ ,  $t$  y  $t + 1$  respectivamente. Finalmente, la restricción (9) especifica el dominio de las variables.

#### 4. Estudio de caso: rotación de trabajadores en producción y almacén en una empresa productora de baldosas de mármol

El modelo propuesto fue utilizado para optimizar las rotaciones en el área de producción y almacén en una empresa colombiana productora de baldosas y productos derivados del mármol. Inicialmente, se adaptaron ciertas especificaciones de la empresa al modelo para poder implementarlo.

En la empresa se llevan a cabo actividades tales como el corte, manipulación y transporte de piedras de gran peso y volumen, lo cual trae consigo riesgos muy altos para la salud de los operarios. Tan sólo en el último año se presentaron 10 lesiones lumbares que provocaron incapacidades mayores a 3 meses, y 60 accidentes laborales.

Las medidas adoptadas por la empresa para mitigar los riesgos, según la literatura revisada, son indispensables para la prevención de las enfermedades tipo lumbar, por lo que su aplicación debe ser controlada con mayor fuerza empleando a su vez técnicas cuantitativas que prevean la aparición de los riesgos y disminuya los tiempos de exposición de los trabajadores a cargos de alto estrés.

Para el área de producción se englobaron 12 cargos por turno, para tres turnos por día. Para el área de almacén se consideraron 6 cargos por turno, para un único turno por día.

Bajo las especificaciones anotadas a continuación se evaluó el modelo:

- Cada trabajador debe permanecer en el turno asignado del primer día durante toda la semana
- Aunque el horizonte de planeación fue establecido como una semana, las optimizaciones se hacen día por día durante 7 días, y los resultados de la optimización de un día cualquiera constituye los datos de entrada para actualizar los valores de JSI del día subsiguiente y así poder hacer la optimización pertinente.
- El modelo fue evaluado con dos y tres intervalos de rotación al día.
- Los niveles de demanda en la empresa, dependiendo de si altos o bajos, restringen el número de trabajadores disponibles para ser rotados.
- El valor máximo deseado para el JSI de cada trabajador al final de la semana fue establecido como 1.5, basado en Liles et al. (1986) y en las demandas de la empresa.

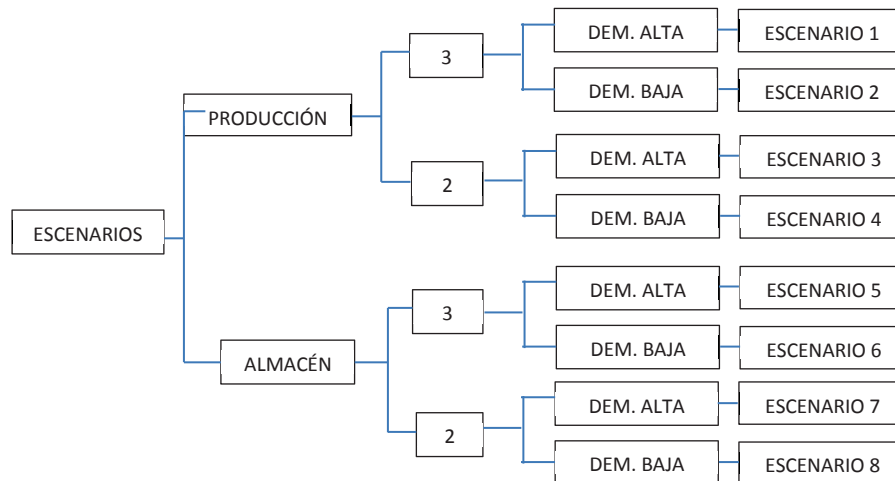
De acuerdo con el conjunto de especificaciones mencionadas, análisis con base en diferentes escenarios fueron realizados (sección 5). Los modelos para los diferentes escenarios fueron resueltos en la plataforma CPLEX10.1, utilizando el lenguaje para modelación GAMS con un tiempo límite de 3.600 segundos. Los experimentos fueron realizados en un computador de escritorio Intel(R) Core(R) i7-3.40GHz.

#### 5. Resultados

Las evaluaciones computacionales fueran realizadas con datos reales obtenidos directamente de la empresa estudiada para analizar el comportamiento general del modelo y verificar si es una representación válida del sistema real. Resultados óptimos y cercanos a él fueron obtenidos, y comparados con los resultados actuales.

Los análisis realizados son basados en los resultados de los escenarios presentados en el árbol de la Figura 2. Donde las áreas de producción y mantenimiento tienen trabajadores diferentes y

el nivel de demanda define el número de trabajadores necesarios. Los intervalos de rotación definen el número de veces que el trabajador debe ser rotado, aunque bien puede ser asignado al mismo cargo durante todos los periodos del turno.



**Figura 2.** Escenarios estudiados.

Para el primer escenario la función objetivo DJSI arrojó los mejores resultados, comparados con las otras funciones programadas (SJSI y MJSI). Los valores de estos indicadores cuando el DJSI fue optimizado son presentados en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Resultados escenario 1 minimizando la función objetivo DJSI

Función Objetivo: DJSI	
ESCENARIO 1	
<b>DJSI</b>	0,0
<b>SJSI</b>	25,65
<b>MJSI</b>	1,43

La tabla 2 presenta los resultados de los escenarios 1, 2, 3 y 4, para cuando la función objetivo MJSI es optimizada. Los valores DJSI y SJSI son utilizados como indicadores para cuantificar los resultados.

**Tabla 2.** Resultados escenario 1-4 minimizando la función objetivo MJSI

Función Objetivo: MJSI				
Funciones Objetivos	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 3	ESCENARIO 4
<b>DJSI</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>SJSI</b>	23,5929243	22,0655195	23,0526745	21,7130953
<b>MJSI</b>	0,92309921	0,80577267	0,77230976	0,76135916
Gap	20%	14%	0%	0%



Al comparar los resultados de las Tablas 1 y 2 para el primer escenario, nótese que la función objetivo MJSI obtuvo mejores resultados que los obtenidos por la DJSI. Este resultado fue constante para los otros escenarios, por lo cual concluimos que la función objetivo que minimiza el máximo de los JSI es mejor que aquella que minimiza la suma y los desvíos.

En la Tabla 2 se puede observar también que para los escenarios con tres periodos de rotación (Escenario 1 y 2) los valores óptimos no fueron obtenidos después de 1 hora de ejecución. Para los escenarios con dos periodos de rotación, la ejecución fue más rápida y resultados óptimos fueron obtenidos en pocos segundos.

Análogamente, en el área de almacén se estudiaron las mismas condiciones para la minimización de la función objetivo MJSI, los resultados se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 2.** Resultados en almacén con la función objetivo MJSI

Función Objetivo: MJSI				
Funciones Objetivos	ESCENARIO 5	ESCENARIO 6	ESCENARIO 7	ESCENARIO 8
<b>DJSI</b>	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>SJSI</b>	4,5591832	5,98480764	4,61091504	5,9521455
<b>MJSI</b>	0,81899073	0,7780412	0,82958405	0,79851596
Gap	0%	0%	0%	0%

Note en la Tabla 3 que los resultados para tres intervalos de rotación son siempre mejores que los resultados para dos intervalos de rotación, independientemente del nivel de demanda. Es decir, el Escenario 5 fornece mejores resultados que el Escenario 7, y el Escenario 6 mejores que el Escenario 8. En relación al GAP, todos los resultados fueron óptimos en tiempos cortos (segundos).

Finalmente, con objetivo de comparar los resultados óptimos obtenidos con los resultados actuales de la empresa, se determinaron los indicadores de JSI para las áreas estudiadas con las rotaciones semanales reales. Los valores son mostrados en la tabla 4.

**Tabla 3.** Indicadores reales de la empresa

Nivel de Demanda	PRODUCCION		ALMACEN	
	D. Alta	D. Baja	D. Alta	D. Baja
<b>Suma de las desviaciones</b>	0,6305686	0,86694873	0,22241547	0,22241547
<b>Suma de los JSI</b>	21,4583084	21,6723753	4,14063226	5,27540143
<b>Máximo JSI</b>	1,61091162	1,61091162	1,72241547	1,72241547

Al comparar los resultados de la Tabla 4 con los obtenidos por el modelo matemático en las Tablas 2 y 3, puede observarse la gran contribución de la herramienta utilizada. Note por ejemplo, para el caso real en el área de producción (con demanda alta), la suma de desviaciones, la suma de los JSI y el máximo de los JSI fueron: 0.63, 21.45 y 1.61 respectivamente. Para la Tabla 1, por el contrario los valores de primer escenario fueron mucho mejores (0, 23.59 y 0.923) y dentro de los límites deseados. Igualmente para el área de almacén.

Al no haber rotación alguna, los valores de JSI rebosan el umbral máximo permisible de 1,5 tanto en producción como en almacén. Por ello, puede esperarse una mayor tasa de enfermedades

profesionales e incapacidades, repercutiendo esto tanto en los costos de la empresa como en su productividad.

## 6. Conclusiones

Esta investigación presentó una propuesta de solución a un problema de salud ocupacional en una empresa colombiana productora de baldosas de mármol, en la que la aparición de enfermedades lumbares en los operarios es bastante frecuente por los grandes pesos que transportan o por la adopción de una sola postura o repetición monótona de la misma.

Para la resolución de tal problema fue utilizado el software GAMS como herramienta de modelación matemática, para poder optimizar los valores de JSI de los trabajadores a través de las rotaciones. Diversos escenarios y tres funciones objetivo fueron propuestos y analizados para verificar el comportamiento del modelo. Los resultados muestran que el modelo en cuestión es una representación aceptable del sistema real, generando soluciones que, aunque no óptimas, son sustancialmente mejores que las condiciones actuales. En cuanto a los tiempos computacionales, estos varían dependiendo del tamaño del problema, para más de cuatro periodos de rotación por turno, el problema fue inviable computacionalmente. Por tanto heurísticas o métodos de relajación deberán ser usados para resolver problema de tamaños considerables.

En cuanto a las funciones objetivo, aquella que arroja mejores resultados es la que procura minimizar el máximo de los JSI aunque no sea la que registre los mejores tiempos de computacionales.

El modelo demostró ser ajustable a los escenarios, permitiendo a la empresa objeto de estudio realizar las variaciones pertinentes en las rotaciones según sean las necesidades y demandas de mano de obra del momento. Más allá de la aplicación práctica, al comparar los resultados óptimos, se puede comprobar que a medida que la longitud de un intervalo de rotación es más corta, se tiende a disminuir aún más el estrés y la severidad en la carga de los puestos de trabajo, pero esto posiblemente disminuye la productividad del trabajador.

Este modelo se limita al enfoque de la salud ocupacional, por tanto, como trabajos futuros, se propone el desarrollo de modelos multiobjetivo, que abarquen aspectos como el aprendizaje y tedio de los trabajadores en los puestos de trabajo, la motivación y satisfacción de los empleados, las habilidades de los operarios y la productividad de los operarios o balanceo de línea.

## Referencias

- Asensio-Cuesta., Mas, J.A., Canós, L. y Romano, C.** (2012). A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Volume 60, Issue 9-12, pp 1161-1174.
- Asensio Cuesta., Mas, J.A., Cremades, L y Cruz, M.** (2012a). A method to design job rotation schedules to prevent work-related musculoskeletal disorders in repetitive work. *International Journal of Production Research*, 7467-7478.
- Aryanezhad, Kheirkhah, Deljoo, y Al-e-hashem.** (2009). Designing safe job rotation schedules based upon workers' skills. *Int J Adv Manuf Technol* 41, 193-199.
- Azizi, N., Zolfaghari, S., y Liang, M.** (2010). Modeling job rotation in manufacturing systems: The study of employee's boredom and skill variations. *Int. J. Production Economics*, 69-85.
- Baines, T., Mason, S., Siebers, P. y Ladbroke, J.** (2004). Humans: the missing link in manufacturing simulation? *Simulation Modeling. Practice and Theory*, 12, 515-526.
- Bhadury, J., y Radovilsky, Z.** (2006). Job rotation using the multi-period assignment model. *International Journal of Production Research*, 44, 4431-4444.

- Carnahan, B., Redfern, M., y Norman, B.** (2000). Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search. *Ergonomics*, 43, 543-560.
- Chryssolouris, G., y Subramaniam, V.** (2001). Dynamic scheduling of manufacturing job shops using genetic algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 12, 281–293.
- Eriksson, T., y Ortega, J.** (2002). The Adoption of Job Rotation: Testing the Theories. *Industrial & Labor Relations Review*, 653.
- Fægri, T. E., Dybå, T., y Dingsøy, T.** (2010). Introducing knowledge redundancy practice in software development: Experiences with job rotation in support work. *Information and Software Technology* 52, 1118–1132.
- Farrant, A. W.** (1987). Job Rotation is Important. *Supervision*, 49, 14-15.
- Frazer, M., Norman, W., Wells, R., y Neumann, P.** (2003). The effects of job rotation on the risk of reporting low back pain. *Ergonomics*, 46, 904-919.
- Gittleman, M., Horrigan, M. y Joyce, M.** (1998). “Flexible” workplace practices: evidence from a nationally representative survey. *Industrial and Labor Relations Review*, Vol. 52, No. 1, pp. 99-115.
- Jorgensen, M., Davis, K., Kotowski, S., Aedla, P. y Dunning, K.** (2005). Characteristics of job rotation in the Midwest US manufacturing sector. *Ergonomics*, 48, 1721-1733.
- Koike, K.** (1984). Skill Formation Systems in the U. S. and Japan: A Comparative Study. *The Economic Analysis of the Japanese Firm*, North Holland: Amsterdam pp. 47-75 in M. Aoki (ed.).
- Kumar, S.** (2001). Theories of musculoskeletal injury causation. *Ergonomics* 44, 17-47.
- Kusunoki, K. y Numagami, T.** (1998). Interfunctional Transfers of Engineers in Japan: Empirical Findings and Implications for Cross Sectional Integration. *IEEE Transactions on Engineering Management*, Vol. 45, No. 3, 250–62.
- López, G., Yeras, I., Beltrán, M., Aparicio, G., Valdés, M y Hernández, E.** (2004). Utilidad del mapa de riesgo laboral en el diagnóstico de salud de las empresas. *Revista Cubana de Medicina General Integral* v.20 n.2 Ciudad de La Habana.
- Mason, S., Baines, T., Kay, J.M. & Ladbroke, J.** (2005). Improving the design process for factories: modeling human performance variation. *Journal of Management Systems*, 24, 47–54.
- Michalos, G., Makris, S., Rentzos, L., & Chryssolouris, G.** (2010). Dynamic job rotation for workload balancing in human based assembly systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2, 153–160.
- Osterman, P.** (1994). How Common is Workplace Transformation and Who Adopts It?. *Industrial and Labor Relations Review*, 47(2), 173-88.
- Pil, F. K. & Macduffie, J. P.** (1996), “The Adoption of High Involvement Work Practices,” *Industrial Relations*, 35, 423-55.
- Sigl, B., Golub, M. & Mornar, V.** (2003). Solving Timetable Scheduling Problem by Using Genetic Algorithms. Tomado del portal de la Universidad de Zagreb. Recuperado de <http://zemris.fer.hr/~golub/clanci/iti2003.pdf>
- Tharmmaphornphilas, W. N. & Norman, B.** (2004). A quantitative method for determining proper job rotation intervals. *Annals of Operations Research*, 128, 251-266.
- Tharmmaphornphilas, W. N. & Norman, B.** (2007). A methodology to create robust job rotation schedules. *Annals of Operations Research*, 155, 339–360.
- Zulch, G., Rottinger, S., & Vollstedt, T.** (2004). A simulation approach for planning and re-assigning of personnel in manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 90, 265–277.