

DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA GENERAR AGENDAS DE ROTACIÓN QUE MINIMICEN EL RIESGO POR MOVIMIENTOS REPETITIVOS

Sabina Asensio-Cuesta

José Antonio Diego-Más

Universitat Politècnica de Valencia

Lázaro Cremades-Oliver

Universitat Politècnica de Catalunya

Abstract

Nowadays, muscle-skeletal disorders constitute one of the main causes of work-related disorders. Therefore, a number of companies choose to implant job rotation schedules as alternative to the redesign of the most critical workstations.

This paper presents a genetic algorithm, named MOREOCRA, that allows the planner to generate job rotation schedules that aim to reduce the potential muscle-skeletal disorders in environments characterized by the presence of a high level of repetitive movements, as for example those typical from the assembly lines. For that reason the optimization effectiveness of the genetic algorithms is combined with the capacity of the OCRA method in repetitiveness assessment. This combination is obtained by means of the integration of the OCRA method in the procedure of job rotation schedules fitness calculation in the developed genetic algorithm. The obtained job rotation schedules by means of the ROTOCRA (Job rotation based on OCRA) algorithm allow workers rotate between different workstations and thus the exposed muscular groups can recover from the accumulated fatigue. In addition, the variation between workstations increases worker's polyvalence and decreases monotony.

Keywords: *Job rotation; OCRA; muscle-skeletal disorders*

Resumen

En la actualidad los trastornos músculo-esqueléticos (TME) constituyen una de las principales causas de enfermedad relacionadas con el trabajo. Frente a dicho problema numerosas empresas optan por implantar planes de rotación de puestos de trabajo como alternativa al rediseño de los puestos más críticos.

En este trabajo se presenta un algoritmo genético, denominado ROTOCRA (Rotación Ergonómica basada en OCRA) para la obtención de agendas de rotación cuyo objetivo es prevenir los trastornos músculo-esqueléticos (TME) en entornos caracterizados por la presencia de una elevada repetitividad de movimientos, como por ejemplo sucede en las líneas de ensamblaje. Para ello, se combina la eficacia de optimización de los algoritmos genéticos con la capacidad de evaluación de la presencia de riesgo por movimientos repetitivos del método de evaluación ergonómica OCRA. Dicha combinación se logra mediante la integración del método OCRA en el procedimiento de cálculo de la bondad de las agendas de rotación en el algoritmo genético desarrollado. Las agendas de rotación obtenidas mediante el algoritmo ROTOCRA permiten que los trabajadores roten entre

puestos distintos y así los grupos musculares expuestos puedan recuperarse de la fatiga acumulada. Además, la variación entre puestos favorece el aumento de la polivalencia de los trabajadores y la disminución de la monotonía.

Palabras clave: Rotación de puestos; OCRA; trastornos músculo-esqueléticos

1. Introducción

Los trastornos músculo-esqueléticos (TME) representan el 38,4% de los problemas de salud de las empresas españolas, siendo el problema de los accidentes laborales sólo un 1,2% superior (39,6%) (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2009). En España, el 74,2% de los trabajadores señala sentir algún TME. Entre las molestias más frecuentes figuran las localizadas en la zona baja de la espalda (40,1%), la nuca/cuello (27%) y la zona alta de la espalda (26,6%) (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2007).

La repercusión de los problemas músculo-esqueléticos no sólo afecta a la calidad de vida de los trabajadores (disminuyendo sus ingresos debido a las bajas laborales, aumentando sus gastos en fármacos, precisando consultas médicas, etc.), sino que además, suponen un importante coste social y económico: prestaciones económicas por incapacidad temporal o permanente, gastos hospitalarios, consultas médicas, prestación farmacéutica, etc. (Baldwin, 2004, Podniece et al., 2008). En Europa, el coste anual de los TME representa el 1,6% del PIB (European Agency for Safety and Health at Work, 2008). Como consecuencia, las empresas que ven afectada la salud de sus trabajadores y su productividad, así como los organismos oficiales encargados de velar por la salud y la seguridad de los trabajadores, prestan especial atención a este tipo de dolencias.

La prevención de los TME se centra en disminuir la exposición de los trabajadores a los factores de riesgo asociados con ellos, entre los que se encuentran: el mantenimiento de posturas forzadas, el levantamiento de cargas, la realización de movimientos repetitivos, la exposición a vibraciones o las condiciones psicosociales mediocres (Bernard, 1997). Dicha prevención puede realizarse mediante el rediseño de los puestos de trabajo de manera que se elimine el riesgo presente en ellos, o bien, cuando éste no es posible debido a limitaciones técnicas o económicas, planteando nuevas estrategias organizativas, como por ejemplo, la rotación de puestos de trabajo (Diego-Más et al., 2009).

Tal y como se ha indicado la exposición de los trabajadores a movimientos repetitivos es un importante factor de riesgo que puede derivar en lesiones músculo-esqueléticas en el cuello, los hombros (Ohlsson et al., 94), el codo, por ejemplo provocando epicondilitis (Shir et al., 2006), en la mano/muñeca ocasionando tendinitis (Byström et al., 1995; Latko et al., 1999) o causando el síndrome del túnel carpiano (Osorio et al., 1994; Liss et al., 1995; Bonfiglioli et al., 2007) e incluso, aunque en menor proporción, provocando dolencias músculo-esqueléticas en la espalda (Xiao et al., 2004). Dadas las repercusiones negativas de dicho factor de riesgo y la gran cantidad de trabajadores que se exponen a él, al tratarse de un riesgo generalmente presente en el trabajo en cadena o en el manejo de máquinas que requieren la manipulación repetitiva a alta frecuencia, se han desarrollado numerosos métodos de evaluación ergonómica que permiten determinar el nivel de riesgo al que se somete el trabajador al exponerse a la repetitividad de movimientos, entre los que se encuentran el método JSI (Job Strain Index) (Moore et al., 1995), el método OCRA y Check List OCRA (Colombini et al., 2002), o el Sue Rodgers (Rodgers, 1986; Rodgers, 1992), especialmente orientados a analizar dicho factor de riesgo. Existen otros métodos que, si bien están especializados en la evaluación de otros factores de riesgo, como la carga postural, el levantamiento de cargas o el estudio general de las condiciones de trabajo, también incluyen en su análisis la repetitividad. Es el caso del método RULA (McAtamney et

al., 1993), NIOSH (Waters et al., 1993), REBA (Hignett et al., 2000), Tablas de Snook y Ciriello (Snook et al., 1991) o LEST (Guélaud et al., 1977), entre otros.

La rotación de puestos de trabajo consiste en el intercambio de trabajadores entre diferentes puestos de trabajo que requieren diversas habilidades y responsabilidades (Huang, 1999). Dicha estrategia organizativa contribuye a aumentar la polivalencia de los trabajadores, logrando con ello que las empresas sean más flexibles frente a problemas como el absentismo laboral, las bajas por enfermedad o las variaciones en la demanda. La rotación de puestos también permite que las empresas adquieran un mayor conocimiento sobre las capacidades de sus empleados al observar su rendimiento en diversos puestos (Eriksson et al., 2006). Por otra parte, la variación en las habilidades y conocimientos requeridos a los trabajadores logra beneficios como la disminución de la monotonía y el aburrimiento (Azizi et al., 2009), la reducción del absentismo, el aumento de la formación (Cunningham and Eberle, 1990) e influye positivamente en su satisfacción laboral (Rissen et al., 2002). Además, el intercambio entre puestos diversos, siempre y cuando suponga un cambio efectivo de los grupos musculares implicados, disminuye la acumulación de fatiga de los trabajadores y con ello el riesgo de aparición de trastornos músculo-esqueléticos (TME) (Jonsson 1988, Hazzard et al. 1992, Rissen et al. 2002).

La rotación de puestos de trabajo es, por lo tanto, una estrategia organizativa capaz de actuar sobre la prevención de los TME y la eficiencia y satisfacción de sus trabajadores. Sin embargo, lograr diseñar agenda de rotación buscando dichos objetivos resulta un problema complejo, ya que son muchos los criterios que deberían considerarse a la hora de establecer las asignaciones de los trabajadores a los puestos. El problema planteado pertenece a la categoría de problemas de optimización combinatoria (Papadimitriou y Steiglitz, 1982) denominado Timetabling and Sheduling problems. Para la resolución de este tipo de problemas se ha aplicado programación entera (Carnahan et al., 2000; Tharmmaphornphilas et al., 2004) y técnicas metaheurísticas como los algoritmos genéticos, el simulated annealing, o algoritmos de hormigas (Carnahan et al., 2000; Nanthavanij et al. 2001; Kullpattaranirun et al., 2005; Yaoyuenyong et al., 2006; Tharmmaphornphilas et al., 2007; Seçkiner et al., 2007a; Seçkiner et al., 2007b; Diego-Mas et al., 2009). También se han propuesto metodologías que combinan modelos matemáticos con heurísticas (Azizi et al., 2009; Costa y Miralles 2009). En dichas investigaciones el diseño de las agendas de rotación se ha centrado en diferentes objetivos como la prevención de las lesiones de espalda (Carnahan et al., 2000), la disminución de la exposición al ruido (Nanthavanij et al. 2001; Kullpattaranirun et al., 2005), la disminución de la acumulación de fatiga de los trabajadores debido a la repetitividad de los movimientos (Diego-Mas et al. ,2009) y la disminución del aburrimiento y el estudio del efecto de la rotación sobre el aprendizaje y el olvido de habilidades (Azizi et al. 2009).

En este trabajo se presenta un algoritmo genético denominado ROTOCRA (Rotación Ergonómica basada en OCRA) para la obtención de agendas de rotación que permitan prevenir los TME en entornos caracterizados por la repetitividad de movimientos, como por ejemplo, las líneas de ensamblaje. El algoritmo evalúa la calidad de las soluciones o agenda de rotación mediante una ecuación basada en el método OCRA. La selección de dicho método se debe a su creciente difusión y valoración en el ámbito de la ergonomía, debido a su recomendación en la norma EN 1005-5 y en la norma ISO 11228-3 para la evaluación del riesgo por movimientos repetitivos. Además, el algoritmo establece un procedimiento para promover la alternancia entre puestos distintos con el objetivo de permitir la variación en los grupos musculares expuestos, la recuperación de la fatiga acumulada, aumentar la polivalencia de los trabajadores y disminuir la monotonía.

El trabajo sigue la siguiente estructura: en la sección 2 se describe el algoritmo genético ROTOCRA, en la sección 3 se aplica el algoritmo a un caso de estudio y se presentan los resultados. Finalmente, en la sección 4 se extraen conclusiones del estudio.

2. Descripción del algoritmo genético

El problema de obtención de agendas de rotación que minimicen la exposición de los trabajadores a la repetitividad de movimientos es un problema complejo que requiere la aplicación de técnicas de optimización. El tamaño del espacio de búsqueda de soluciones dependerá del número de rotaciones y del número de puestos a incluir en la rotación. La complejidad del problema viene dada por el número de restricciones de asignación y la importancia del orden en la asignación. Incluso para problemas de tamaño pequeño no es posible enumerar todas las posibles soluciones en un tiempo aceptable (Tharmmaphornphila et al., 2003). En este tipo de problemas el uso de **algoritmos genéticos (AG)** parece proporcionar buenos resultados en tiempos aceptables de cálculo para el planificador (Carnahan et al., 2000; Diego-Mas et al., 2009).

Los AG realizan una búsqueda estocástica guiada haciendo evolucionar un conjunto de estructuras (individuos) que representan soluciones al problema. Cada individuo se codifica en una cadena finita o cromosoma. El procedimiento de búsqueda de soluciones por el AG comienza creando de forma aleatoria un conjunto de individuos (población inicial). Dicha población se expone a diversas modificaciones que dan lugar a una nueva generación de individuos. Estas modificaciones se realizan mediante los denominados operadores genéticos, entre los que se encuentran la “selección”, el “cruce” y la “mutación”, que combinan o modifican los cromosomas que representan a los individuos. Para cada generación, la bondad o aptitud (*fitness*) de las soluciones (agendas de rotación) se determina mediante una función de evaluación. A partir de la bondad de las soluciones de una población, introduciendo cierta aleatoriedad, se obtienen los individuos que pasarán a la siguiente generación, que serán aquellos con mejores valores de su *fitness*. Este proceso se repite un número finito de veces, o número de generaciones, haciendo a los individuos evolucionar hacia mejores soluciones al problema.

Así pues, para poder aplicar un AG a la generación de agendas de rotación es necesario, en primer lugar, determinar el modo de codificación de las soluciones, en este caso de las agendas de rotación. Posteriormente, se debe definir la función evaluadora para determinar el *fitness* de cada solución. En el caso del presente trabajo, dada una solución (agenda de rotación), la función evaluadora deberá medir el nivel de riesgo por movimientos repetitivos al que se exponen los trabajadores implicados en la rotación. Además es necesario definir el modo de selección de los individuos, así como los operadores genéticos: cruce y mutación. En las siguientes subsecciones se describen dichos requerimientos para el algoritmo ROTOCRA.

2.1. Codificación de las soluciones y generación de la población inicial

Cada solución (individuo o agenda de solución) se codifica mediante una matriz de tamaño $n_{\text{wor}} \cdot n_{\text{rot}}$, donde n_{wor} es el número de trabajadores y n_{rot} el número de rotaciones. Cada celda de la matriz contiene un valor que indica el puesto asignado a un trabajador x en una rotación r .

La población inicial se obtiene generando aleatoriamente un número determinado de soluciones (“Tamaño de la población”). El número de individuos de la población inicial dependerá de las características del problema y su valor debe determinarse de forma experimental. Los puestos son asignados a las celdas de las matrices o soluciones de forma aleatoria, evitando que en la misma columna se repita el mismo puesto, ya que dicha solución no sería válida al representar la asignación de un mismo puesto a trabajadores diferentes en la misma rotación.

2.2. Función de evaluación (*Fitness*)

El *fitness* (aptitud) de una solución (**E**) representa la bondad de las asignaciones trabajador-puesto realizadas en las diferentes rotaciones. El algoritmo ROTOCRA determina dicha bondad en función de los valores de los índices OCRA multitarea de los trabajadores. Dicho índice OCRA multitarea permite determinar el nivel de riesgo global debido a la repetitividad de movimientos cuando un trabajador ocupa diferentes puestos a lo largo de su jornada. El valor de **E** también es función de los índices OCRA monotarea calculados para cada uno de los puestos implicados en la rotación. Dichos valores de los puestos se emplean para establecer la variabilidad entre niveles de riesgo presente en cada solución. De manera que se penalicen las soluciones en las que los trabajadores ocupen puesto con niveles altos o medios en rotaciones consecutivas. Una descripción detallada del cálculo de índice OCRA multitarea y monotarea puede consultarse en la norma EN 1005-5 y en la norma ISO 11228-3.

La función de evaluación se divide en dos partes (Ecuación 1). En la primera parte de la ecuación se suman los índices OCRA multitarea de todos los trabajadores (**IO(x)**). En la segunda parte de la ecuación se calcula la **Variabilidad (RLV(x))** entre los niveles de riesgo a los que se expone cada trabajador. Debido a que el índice OCRA multitarea y monotarea se calculan por separado para el lado derecho y para el izquierdo del cuerpo, en ROTOCRA se ha definido **E** como la suma de los índices OCRA multitarea y de la variabilidad (función del índice OCRA monotarea) para cada lado del cuerpo. Cuanto menor sea el valor de **E** mejor será la solución desde el punto de vista ergonómico. En definitiva, valores menores de **E** indicarán mejor calidad de la solución, por lo que el algoritmo tratará de minimizar el valor de **E**.

El índice OCRA multitarea, aplicado para obtener el primer sumando de la ecuación 1 (**IO(x)_s**), no considera que el orden de las asignaciones a los puestos influya en el valor final del índice. Así pues, ante las mismas condiciones, serían valoradas con idéntico índice OCRA multitarea dos soluciones s_1 y s_2 en las que: en s_1 un trabajador ocupara en dos rotaciones consecutivas puestos con elevado índice OCRA monotarea, y posteriormente fuera asignado a un puesto con índice OCRA monotarea bajo; y en s_2 el trabajador ocupara primero un puesto con elevado índice OCRA monotarea, después pasara a un puesto con índice OCRA monotarea bajo, y por último, ocupara un puesto con índice OCRA monotarea elevado. Siendo el resto de asignaciones trabajador-puesto idénticas para s_1 y s_2 . Sin embargo, la solución s_2 permite al trabajador recuperarse de la fatiga acumulada después de ocupar un puesto exigente antes de ocupar nuevamente otro puesto exigente. Para permitir la variación en los niveles de riesgo a los que se expone el trabajador y favorecer así su recuperación en puestos más ligeros de la fatiga acumulada en puestos más duros, se ha incluido en la ecuación 1 el segundo sumando (**RVL(x,r)_s**) denominado **Variabilidad**. El valor de **RVL(x,r)_s** aumenta en mayor medida si el trabajador **x** ocupa puestos en rotaciones consecutivas con índices OCRA monotarea altos (valores $\geq 3,5$) o medios ($2,3 \leq \text{valores} \leq 3,5$), mientras que el incremento es menor si el trabajador **x** pasa de ocupar puestos con niveles de riesgo alto o medio a puestos con niveles de riesgo bajo (valores $\leq 2,2$).

Por otra parte, en la función de evaluación se ha definido el coeficiente **c_s** (coeficiente de ponderación para cada miembro) que permiten dar más importancia a la minimización del riesgo para los miembros superiores derechos o izquierdos según se desee. También se ha definido un coeficiente de uniformidad **u** con el objetivo de evitar soluciones descompensadas, es decir, que se centren en limitar la repetitividad en un lado frente al otro y la exposición de unos trabajadores frente a otros.

A continuación se muestra la función de evaluación definida en ROTOCRA para la obtención del *fitness* de las soluciones:

$$E(x, r) = \sum_{s \in \{right, left\}} \sum_{x=1}^{n_{wor}} c_s \cdot (IO(x, r)_s + RLV(x, r)_s)^u \quad (1)$$

Donde:

n_{wor} es el número de trabajadores.

c_s es el coeficiente de importancia relativa de cada lado del cuerpo.

u es el coeficiente de uniformidad.

$IO(x)_s$ es el índice OCRA multitarea para el trabajador x y el lado s del cuerpo que se obtiene a partir de la siguiente ecuación 2:

$$IO(x, r)_s = \frac{ATA(x, r)_s}{RTA(x, r)_s} \quad (2)$$

Donde:

$ATA(x, r)_s$ es el número de acciones técnicas actuales realizadas por el trabajador x para el lado s del cuerpo que se obtiene mediante la siguiente ecuación 3:

$$ATA(x, r)_s = \sum_{r=1}^{n_{rot}} FF(p(x, r))_s \cdot t(r) \quad (3)$$

$p(x, r)$ es el puesto asignado al trabajador x en la rotación r .

$FF(p(x, r))_s$ es la frecuencia de acciones por minuto del puesto asignado al trabajador x en la rotación r .

$t(r)$ es la duración de la rotación, o tiempo de ocupación del puesto.

$RTA(x, r)_s$ es el número de acciones técnicas de referencia realizadas por el trabajador x para el lado s del cuerpo que se obtiene mediante la siguiente ecuación 4:

$$RTA(x, r)_s = \sum_{r=1}^{n_{rot}} [CF \cdot (F(p(x, r))_s \cdot P(p(x, r))_s \cdot R(p(x, r))_s \cdot A(p(x, r))_s) \cdot t(r)] \cdot (Rc \cdot Du) \quad (4)$$

CF es la “constante de frecuencia” de acciones técnicas por minuto fijada en 30 acciones/min según la norma EN 1005-5 y norma ISO 11228-3.

$F(p(x, r))_s$ es el multiplicador para el factor de riesgo fuerza para el puesto ocupado por el trabajador x en la rotación r para el lado s del cuerpo.

$P(p(x, r))_s$ es el multiplicador para el factor de riesgo postura para el puesto ocupado por el trabajador x en la rotación r para el lado s del cuerpo.

$R(p(x, r))_s$ es el multiplicador para el factor de riesgo repetitividad para el puesto ocupado por el trabajador x en la rotación r para el lado s del cuerpo.

$A(p(x, r))_s$ es el multiplicador para el factor de riesgo adicionales para el puesto ocupado por el trabajador x en la rotación r para el lado s del cuerpo.

Rc es el multiplicador para el factor riesgo “carencia de periodos de recuperación” referido a todo el turno.

Du es el multiplicador según la duración total de todas las tareas repetitivas durante un turno.

RVL(x,r) es la variabilidad del nivel de riesgo entre los puestos asignados al trabajador **x** para el lado **s** del cuerpo. Dicho valor se obtiene mediante la siguiente ecuación 5:

$$RLV(x,r)_s = \sum_{r=1}^{n_{rot}-1} Variability(r,r+1)_s \quad (5)$$

Variability(r,r+1)_s es un incremento que se calcula a partir del valor del índice OCRA monotarea del puesto ocupado por el trabajador **x** en la rotación **r** y del índice OCRA monotarea del puesto que pasa a ocupar el trabajador **x** en la siguiente rotación **r+1**. La siguiente ecuación muestra los valores que toma esta variable en función de los índices OCRA monotarea de los puestos.

$$Variability_s(r,r+1) = \left\{ \begin{array}{l} Si (OCRA(p(x,r+1))_s \leq 2,2) \text{ entonces } inc1 \\ Si (2,3 \leq OCRA(p(x,r))_s \leq 3,5) \text{ y } (2,3 \leq OCRA(p(x,r+1))_s \leq 3,5) \text{ entonces } inc2 \\ Si (2,3 \leq OCRA(p(x,r))_s \leq 3,5) \text{ y } (OCRA(p(x,r+1))_s > 3,5) \text{ entonces } inc3 \\ Si (OCRA(p(x,r))_s > 3,5) \text{ y } (2,3 \leq OCRA(p(x,r+1))_s \leq 3,5) \text{ entonces } inc4 \\ Si (OCRA(p(x,r))_s > 3,5) \text{ y } (OCRA(p(x,r+1))_s > 3,5) \text{ entonces } inc5 \end{array} \right\} \quad (6)$$

Inc₁ es el incremento cuando el trabajador **x** pasa a ocupar en la siguiente rotación **r+1** un puesto con nivel bajo de riesgo.

Inc₂ es el incremento cuando el trabajador **x** pasa de ocupar en la rotación **r** un puesto con nivel de riesgo medio a ocupar otro puesto también con nivel de riesgo medio.

Inc₃ es el incremento cuando el trabajador **x** pasa de ocupar en la rotación **r** un puesto con nivel de riesgo medio a ocupar otro puesto con nivel de riesgo alto.

Inc₄ es el incremento cuando el trabajador **x** pasa de ocupar en la rotación **r** un puesto con nivel de riesgo alto a ocupar otro puesto con nivel de riesgo medio.

Inc₅ es el incremento cuando el trabajador **x** pasa de ocupar en la rotación **r** un puesto con nivel de riesgo alto a ocupar otro puesto también con nivel de riesgo alto.

Los valores **inc₁** a **inc₅** tomarán valores dependiendo del problema y deberán determinar de forma experimental. Si bien debe cumplirse que: **inc₁ < inc₂**; **inc₂ < inc₃**; **inc₃ ≤ inc₄**; **inc₄ < inc₅**. De esta forma se garantiza que sean mejor valoradas las soluciones en las que existen transiciones entre niveles de riesgo beneficiosas para el trabajador, es decir, que suponen el paso de puestos con niveles medios/altos a puestos con niveles bajos, y se penalicen aquellas soluciones en las que se mantengan niveles de riesgo medios o altos entre rotaciones consecutivas.

OCRA(p(x, r))_s es el índice OCRA monotarea para el lado **s** del cuerpo del puesto ocupado por el trabajador **x** en la rotación **r**. Dicho valor se obtiene a partir de la siguiente ecuación 7:

$$OCRA(p(x,r))_s = \frac{FF(p(x,r))_s * D}{(F(p(x,r))_s \cdot P(p(x,r))_s \cdot R(p(x,r))_s \cdot A(p(x,r))_s) \cdot t(r) \cdot Rc \cdot Du} \quad (7)$$

D es la duración total del movimiento repetitivo, es decir, la suma de las duraciones de las rotaciones. La ecuación 7 calcula el riesgo del puesto en el caso de que no existiera rotación y fuera ocupado toda la jornada.

2.2.1. Aplicación de penalizaciones

La función de evaluación definida valoraría positivamente una asignación en la que un trabajador es asignado al un mismo puesto en varias rotaciones sucesivas si su nivel de riesgo es medio o bajo. Esto supone que no se cumple con la alternancia entre puestos distintos necesaria para lograr los beneficios esperados de la rotación. Para evitar la repetición del mismo puesto en rotaciones consecutivas se define el parámetro t_{max} (tiempo máximo de permanencia continuada en el mismo puesto). Si la duración total de la ocupación del mismo puesto supera t_{max} se penaliza al individuo incrementando el valor de su *fitness* de manera que la probabilidad de ser seleccionado sea nula.

También pueden existir otras asignaciones que se desee evitar debido a incompatibilidades entre las capacidades físicas, psíquicas y/o de comunicación requeridas en los puestos y limitadas en ciertos trabajadores. Otros motivos pueden desaconsejar ciertas asignaciones trabajador-puesto pueden ser: el cumplimiento de recomendaciones médicas, restricciones organizativas o productivas. Las asignaciones no deseadas derivadas de las capacidades, junto con las debidas a otros motivos, forman el denominado “Conjunto de asignaciones vetadas”. El algoritmo ROTOCRA evaluará cada individuo de la población y penalizará aquellos que contengan asignaciones incluidas en dicho conjunto.

2.3 Procedimiento de Selección y reemplazo

Una vez evaluados y penalizados los individuos de la población se seleccionan aquellos que sobrevivirán y pasarán a la siguiente generación (supervivientes), y los individuos sobre los que actuará el operador cruce (reproductores). Para ello el algoritmo ROTOCRA utiliza la selección por ruleta (Goldberg, 1989). En este procedimiento de selección la probabilidad de que un individuo sea seleccionado es inversamente proporcional a E , ya que se desea minimizar dicho valor. Las mejores soluciones de una generación son siempre seleccionadas para sobrevivir en la siguiente (élite). El número de individuos élite queda determinado por el parámetro I_e . El parámetro p_c (probabilidad de cruce) indica el número de individuos de la siguiente generación que serán creados por cruzamiento. Así, $ni \cdot p_c$ individuos de la población futura serán el resultado del cruce de reproductores de la generación anterior, $ni \cdot (1 - p_c) - I_e$ serán individuos supervivientes de la generación anterior, y I_e serán individuos élite.

2.4 Operador genético “Cruce”

El operador cruce actúa seleccionando $ni \cdot p_c$ individuos reproductores de forma aleatoria y agrupándolos en parejas. Para cada pareja de padres, codificados como una matriz de $n_{wor} \cdot n_{rot}$, se elige un **punto de cruce** como un número aleatorio entre 1 y $n_{rot}-1$. El individuo hijo se obtiene combinando las rotaciones (columnas de la matriz) que quedan a la izquierda y a la derecha del **punto de cruce** en cada uno de los padres. Esta forma de realizar el cruce garantiza que los descendientes representen soluciones factibles, dado que se evita que un mismo trabajador sea asignado a dos puestos diferentes en una misma rotación.

2.5 Operador genético “Mutación”

El operador mutación se aplica a individuos seleccionados de manera aleatoria entre los individuos que forman la nueva generación: descendientes ($ni \cdot p_c$), supervivientes ($ni \cdot (1 - p_c)$) y élite I_e .

El número de individuos a los que se les aplicará el operador mutación está determinado por el parámetro p_m (probabilidad de mutación), de forma que mutarán $ni \cdot p_m$ individuos. Escogido un individuo de forma aleatoria el operador mutación actúa seleccionando aleatoriamente una rotación y dos trabajadores e intercambiar los puestos asignados a los

trabajadores en dicha rotación. Para cada individuo se realizan tantos intercambios como indique el parámetro i_m (intensidad de mutación).

3 Aplicación del algoritmo ROTOCRA a un caso de estudio

En esta sección se describen los experimentos realizados para validar el algoritmo propuesto. En la sección 3.1 se plantea el caso de estudio. En la sección 3.2 se muestra la información recopilada sobre los puestos incluidos en la rotación necesaria para determinar la calidad de las soluciones mediante la función de evaluación (ecuación 1). En la sección 3.3 se indican los parámetros de ejecución del algoritmo y en la 3.4 se presentan los resultados de los experimentos realizados.

3.1 Descripción del caso de estudio

Se deseaba obtener una agenda de rotación que minimizara el tiempo que los trabajadores se exponían a niveles altos de riesgo por repetitividad de movimientos. El caso de estudio que se planteó para 14 puestos: 5 de ellos con nivel de riesgo alto, 7 con nivel de riesgo medio y 8 con nivel de riesgo bajo (según el método OCRA). Todos los puestos estaban situados en una línea de ensamblaje, y suficientemente cercanos unos a otros como para que los desplazamientos de los trabajadores no causaran retrasos durante los intercambios. Uno de los trabajadores (trabajador 14) estaba en proceso de recuperación de una lesión músculo-esquelética leve en el codo que recomendaba que no ocupase los puestos 7, 8 y 12. Otro trabajador (trabajador 7) tenía problemas de visión, y por lo tanto, no podía realizar las tareas de precisión requeridas en el puesto 13. Todos los trabajadores poseían un nivel de formación suficiente para desarrollar las actividades requeridas en cualquiera de los puestos seleccionados.

La jornada laboral era de 8 horas (480 minutos) con una hora de descanso para el almuerzo. El objetivo era establecer 4 rotaciones de 2 horas de duración cada una, lo cual suponía 4 horas de trabajo repetitivo sin recuperación para los trabajadores.

Para poder llevar a cabo la fase de experimentación del algoritmo se desarrolló un software (ROT.OCRA 1.0) que lo implementaba. Dicho software, además, permitía almacenar información de los puestos y calcular sus índices OCRA monotarea (Figura 1).

Figura 1: Pantalla de visualización de los puestos en ROT.OCRA 1.0

The screenshot shows the ROT.OCRA 1.0 software interface. The main window is titled 'INFORMACIÓN DE LOS PUESTOS' and contains a table with the following data:

| Orden | Nombre | Sección | Tipo | Preced. | Suceso | T.Útil (m) | T.Útil (h) | OCRA (m) | OCRA (h) |
|-------|--------|-----------|--------|---------|--------|------------|------------|----------|----------|
| 1 | Job 1 | Sección 3 | Tipo 1 | 20 | 20 | 20 | 20 | 2,78 | 2,78 |
| 4 | Job 2 | Sección 3 | Tipo 1 | 45 | 45 | 15 | 15 | 3,37 | 3,37 |
| 7 | Job 7 | Sección 3 | Tipo 1 | 45 | 45 | 20 | 20 | 2,22 | 2,22 |
| 8 | Job 8 | Sección 3 | Tipo 1 | 20 | 20 | 20 | 20 | 3,94 | 3,94 |
| 9 | Job 9 | Sección 3 | Tipo 1 | 20 | 20 | 15 | 15 | 2,8 | 2,8 |
| 10 | Job 10 | Sección 3 | Tipo 1 | 20 | 20 | 15 | 15 | 3,39 | 3,39 |
| 11 | Job 11 | Sección 3 | Tipo 1 | 45 | 45 | 20 | 20 | 2,3 | 2,3 |
| 12 | Job 12 | Sección 3 | Tipo 1 | 45 | 45 | 20 | 20 | 3,53 | 3,53 |
| 13 | Job 13 | Sección 3 | Tipo 1 | 45 | 45 | 20 | 20 | 3,37 | 3,37 |
| 14 | Job 14 | Sección 3 | Tipo 1 | 20 | 20 | 15 | 15 | 2,78 | 2,78 |

3.2 Información de los puestos

Para determinar la bondad de las soluciones el algoritmo ROTOCRA aplica la función de evaluación descrita en el apartado 2.2 (ecuación 1). Para poder realizar dicho cálculo es necesario recopilar cierta información de los puestos necesaria para obtener los índices OCRA multitarea, para los trabajadores, y los índices OCRA monotarea, para los puestos.

Los índices OCRA monotarea y multitarea se obtienen a partir de seis multiplicadores asociados con los siguientes factores de riesgo: la postura forzada, la repetitividad, los factores adicionales (guantes, precisión, frío, etc.), la aplicación de fuerza, la duración de la jornada y el número de horas seguidas sin recuperación. Dichos valores se determinan consultando las tablas del método OCRA (ver EN 1005-5 o ISO 11228-3) y en base a las condiciones del puesto en relación a cada factor. A partir de los multiplicadores y de la frecuencia de las acciones técnicas por minuto realizadas en cada puesto, es posible obtener el índice OCRA (monotarea y multitarea).

Las Tablas 1 y 2 muestran los valores de los multiplicados y de las variables necesarias para el cálculo de índice OCRA monotarea y multitarea utilizados en la Ecuación 1. También se muestran los valores de los índices OCRA monotarea de los puestos. Dichos valores pueden ser obtenidos antes de la ejecución del algoritmo dado que no dependen de la duración de las rotaciones si no de la duración total del movimiento repetitivo (jornada).

Tabla 1: Valores de los multiplicadores y del índice OCRA monotarea de los puestos 1 a 7

| Variable | Definición | PUESTOS | | | | | | |
|-------------------------|---|---------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| P_R | Multiplicador de postura (derecha) | 1 | 1 | 0.7 | 1 | 1 | 0.7 | 1 |
| P_L | Multiplicador de postura (izquierda) | 1 | 1 | 0.7 | 1 | 1 | 0.7 | 1 |
| R_R | Multiplicador de repetitividad (derecha) | 0.6 | 1 | 0.7 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| R_L | Multiplicador de repetitividad (izquierda) | 0.6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A_R | Multiplicador de adicionales (derecha) | 0.9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A_L | Multiplicador de adicionales (izquierda) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| F_R | Multiplicador de fuerza (derecha) | 0.7 | 0.6 | 1 | 1 | 0.7 | 1 | 1 |
| F_L | Multiplicador de fuerza (izquierda) | 0.7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| FF_R | Frecuencia (derecha) | 60 | 40 | 53 | 60 | 30 | 45 | 35 |
| FF_L | Frecuencia (izquierda) | 60 | 30 | 53 | 60 | 30 | 45 | 35 |
| D | Multiplicador de duración (Jornada 8 h.) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| R_c | Multiplicador de recuperación (4 h. sin recuperación) | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| OCRA_R | Índice OCRA monotarea (derecha) | 8.82 | 3.7 | 4.21 | 3.33 | 2.38 | 3.57 | 2.22 |
| OCRA_L | Índice OCRA monotarea (izquierda) | 7.94 | 1.67 | 4.21 | 3.33 | 1.67 | 3.57 | 2.22 |

Tabla 2: Valores de los multiplicadores y del índice OCRA monotarea de los puestos 8 a 14

| Variable | Definición | PUESTOS | | | | | | |
|-------------------------|---|---------|------|------|------|------|------|------|
| | | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| P_R | Multiplicador de postura (derecha) | 1 | 1 | 0.7 | 0.85 | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| P_L | Multiplicador de postura (izquierda) | 1 | 0.7 | 0.7 | 1 | 1 | 0.7 | 0.7 |
| R_R | Multiplicador de repetitividad (derecha) | 1 | 0.85 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| R_L | Multiplicador de repetitividad (izquierda) | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A_R | Multiplicador de adicionales (derecha) | 1 | 1 | 1 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1 |
| A_L | Multiplicador de adicionales (izquierda) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| F_R | Multiplicador de fuerza (derecha) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| F_L | Multiplicador de fuerza (izquierda) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| FF_R | Frecuencia (derecha) | 35 | 30 | 20 | 40 | 40 | 45 | 35 |
| FF_L | Frecuencia (izquierda) | 35 | 30 | 20 | 40 | 40 | 45 | 35 |
| D | Multiplicador de duración (Jornada 8 h.) | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| R_c | Multiplicador de recuperación (4 h. sin recuperación) | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 |
| OCRA_R | Índice OCRA monotarea (derecha) | 1.94 | 1.96 | 1.59 | 2.9 | 3.53 | 3.97 | 2,78 |
| OCRA_L | Índice OCRA monotarea (izquierda) | 1.94 | 2.38 | 1.59 | 2.47 | 2.22 | 3.57 | 2.38 |

En las Tablas 1 y 2 los valores de los multiplicadores inferiores a 1 indican desviaciones con respecto a las condiciones ideales de trabajo en el puesto para cada factor de riesgo. Por otra parte, valores del índice OCRA monotarea mayores o iguales a 3,5 indican riesgo alto de lesión, valores entre 2,3 y 3,5 riesgo medio, y valores iguales o inferiores a 2,2 riesgo bajo.

3.3 Parámetros de ejecución

El número de parámetros que determinan el funcionamiento del AG propuesto es elevado, dado que a los parámetros habituales de cualquier algoritmo de este tipo (número de generaciones, individuos de la población, probabilidad de cruce y mutación) se añaden parámetros derivados: de las especificaciones del problema, del empleo del método OCRA en la función de evaluación y de la aplicación de penalizaciones. La Tabla 3 muestra los parámetros empleados por el algoritmo ROTOCRA y los valores establecidos tras una fase de parametrización para el problema planteado.

Tabla 3: Valores de los parámetros necesarios para ejecutar el algoritmo ROTOCRA

| Parámetro | Definición | Valor |
|---|---|---------|
| n_{wor} , n_{rot} | Número de trabajadores. Número de rotaciones. | 16 |
| Gen | Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo | 10000 |
| n | Individuos en cada generación | 50 |
| p_c | Probabilidad de cruce | 0.6 |
| p_m | Probabilidad de mutación | 0.3 |
| i_m | Intensidad de mutación | 2 |
| i_e | Intensidad del elitismo | 1 |
| D | Duración del turno | 480 |
| P_a | Pausas (min.) | 60 |
| t_{nr} | Tiempo de trabajo no repetitivo (min.) | 0 |
| t_{rec} | Tiempo de trabajo de recuperación (min.) | 0 |
| D_u | Duración total neta del trabajo repetitivo ($D - P_a t_{nr} - t_{rec}$) | 420 |
| t₁, t₂, t₃, t₄ | Duración de la rotación 1, 2, 3 y 4 | 2 horas |
| p_{2,3} | Pausa entre la rotación 2 y 3 | 1 hora |
| t_{sr} | Tiempo de trabajo sin recuperación | 4 horas |
| t_{max} | Tiempo máximo consecutivo de permanencia en el mismo puesto | 4 horas |
| t_o | Tiempo máximo de permanencia continuada en puestos | 4 horas |
| Inc₁ | Incremento asignación a un puesto con nivel bajo de riesgo | 0 |
| Inc₂ | Incremento paso de puesto de nivel de riesgo medio a puesto de nivel medio | 2 |
| Inc₃ | Incremento paso de puesto de nivel de riesgo medio a puesto de nivel alto | 3 |
| Inc₄ | Incremento paso de puesto de nivel de riesgo alto a puesto de nivel medio | 2 |
| Inc₅ | Incremento paso de puesto de nivel alto de riesgo alto a puesto de nivel alto | 4 |

3.4 Resultados

El algoritmo ROTOCRA fue ejecutado 10 veces con los parámetros indicados en la Tabla 3. Las ejecuciones se realizaron en un PC equipado con procesador de 2,27 GHz y 4 Gb de memoria RAM. El tiempo empleado por el algoritmo para completar las 10 ejecuciones fue de 25 minutos. En todas las ejecuciones el algoritmo fue capaz de encontrar soluciones factibles al problema, es decir que cumplían con las restricciones derivadas de la existencia de trabajadores con limitaciones.

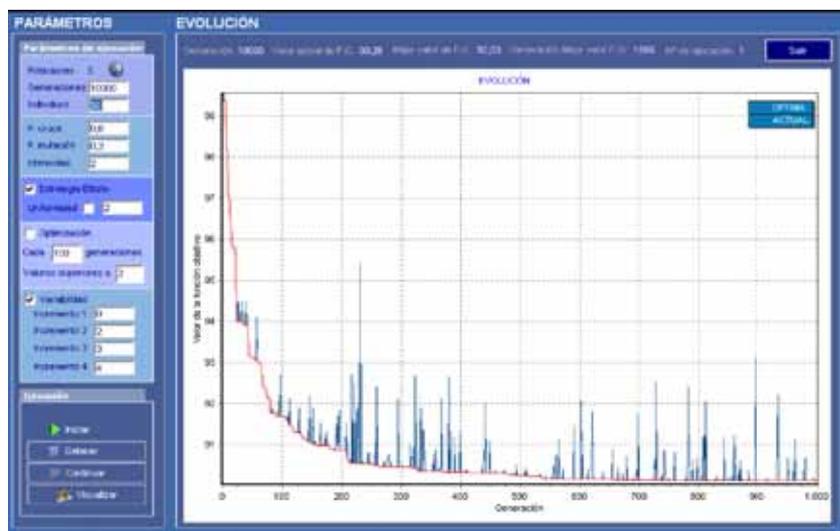
Tabla 4: Resumen de resultados de las 10 ejecuciones de ROTOCRA

| Ejecución | Generación | <i>Fitness</i> (Derecha) | <i>Fitness</i> (Izquierda) | <i>Fitness</i> (E) |
|-----------------------|---------------|--------------------------|----------------------------|--------------------|
| 1 | 2556 | 66.8 | 23.19 | 89.99 |
| 2 | 2053 | 66.81 | 23.18 | 90 |
| 3 | 3461 | 66.8 | 23.17 | 89.97 |
| 4 | 2462 | 66.79 | 23.2 | 89.98 |
| 5 | 3848 | 66.79 | 23.18 | 89.97 |
| 6 | 5688 | 66.81 | 23.17 | 89.99 |
| 7 | 8087 | 66.82 | 23.19 | 90.01 |
| 8 | 2468 | 66.77 | 23.22 | 89.99 |
| 9 | 2817 | 66.79 | 23.19 | 89.99 |
| 10 | 5141 | 66,8 | 23,18 | 89.98 |
| Valores medios | 3858.1 | 66.798 | 23.187 | 89.987 |

La mejor solución se obtuvo en la ejecución 5, en adelante E₅, aunque la ejecución 3 obtuvo el mismo valor del *fitness* se consideró mejor la solución con menor valor en el *fitness* para el lado derecho del cuerpo debido a que en el problema planteado la presencia de riesgo era mayor para dicho lado (ver Tabla 4).

El gráfico de la Figura 2 muestra la capacidad del algoritmo ROTOCRA para generar progresivamente mejores soluciones. El gráfico representa una evolución constantemente decreciente, salvo incrementos muy localizados provocados por la actuación de los operadores de cruce y mutación.

Figura 2: Evolución del *fitness* (E) a lo largo de las generaciones



Dado que no se encontró en la bibliografía problemas cuyos resultados pudieran ser comparados con los proporcionados por el algoritmo ROTOCRA, se decidió comparar la mejor solución obtenida tras las 10 ejecuciones del algoritmo E₅ (Tabla 5 y Figura 3), con la mejor solución de una población de 50 individuos generados de forma aleatoria cumpliendo con las restricciones del problema, en adelante E_R, (Tabla 6 y Figura 4) con los mismos parámetros y restricciones. En ambas soluciones se cumplían las restricciones de asignación según las cuales el trabajador 14 no podía ocupar los puestos 7, 8 y 12. Mientras

que el trabajador 7 no podía ocupar el puesto 13. Además ningún trabajador ocupaba el mismo puesto más de 4 horas seguidas.

Las Figuras 3 y 4 muestran las asignaciones de los puestos (número del panel) en cada rotación para cada trabajador para la solución E_5 y E_R respectivamente. El color de los paneles corresponde al nivel de riesgo de cada puesto según su índice OCRA monotarea (riesgo alto (rojo), riesgo medio (amarillo) y riesgo bajo (verde)). A la derecha de las figuras se muestran los valores de los índices OCRA multitarea para cada trabajador para el lado derecho ($OCRA_d$) y para el lado izquierdo ($OCRA_i$), así como el valor correspondiente a la **Variabilidad** para cada trabajador, también para el lado derecho (V_d) e izquierdo (V_i). El código de colores de dichas etiquetas también indica el nivel de riesgo según del valor del índice OCRA multitarea del trabajador.

El *fitness* de la solución aleatoria E_R fue de 104,41, mientras que RTOCRA logró un valor de la aptitud menor en la solución E_5 de 89,7. En la solución E_R se observó que 4 trabajadores (trabajador 1, 5, 9 y 11) se exponían a índices altos de riesgo con valores de sus índices OCRA multitarea superiores a 3,5 para el lado derecho. Mientras que en la solución E_5 el algoritmo conseguía reducir, para el lado derecho, el número de trabajadores expuestos a niveles altos de riesgo a dos (trabajadores 4 y 6). En ambas soluciones los niveles de exposición de los trabajadores para el lado izquierdo era aceptable. En la solución E_R el trabajador 1 estaba toda la jornada ocupando puestos de alto riesgo para el lado derecho del cuerpo, en la solución E_5 ningún trabajador presentaba dicho nivel de exposición para ningún lado. Los valores medios de los índices OCRA multitarea de los trabajadores para la solución E_R y E_5 fueron similares par ambos lados (ver Tablas 4 y 5). Sin embargo, sí se observó mayor diferencia en la variabilidad de los niveles de riesgo para los trabajadores entre la solución E_R y E_5 . El valor medio de la variabilidad para E_5 (lado derecho) fue de 2,09 mientras que para E_R fue de 2,96, para el mismo lado. La desviación estándar de la variabilidad de los trabajadores para el lado derecho del cuerpo fue de 1,00 en E_5 y de algo más del doble (2,03) en E_R para el mismo lado. Dicho dato pone de relieve la capacidad del algoritmo para buscar soluciones que permitan a todos los trabajadores alternar puestos exigentes con puestos menos exigentes y de esta forma facilitar su recuperación.

Tabla 5: Agenda de rotación de la solución E5.

| Trab. | Rot. 1 | Rot. 2 | Rot. 3 | Rot. 4 | Derecha | | Izquierda | |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|----------------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | | | | | OCRA multitarea | Variabilidad | OCRA multitarea | Variabilidad |
| 1 | 3 | 11 | 7 | 3 | 3.26 | 1 | 3.13 | 0 |
| 2 | 5 | 9 | 6 | 10 | 2.68 | 2.75 | 2.24 | 0 |
| 3 | 7 | 12 | 11 | 1 | 3.41 | 2.5 | 2.86 | 0 |
| 4 | 4 | 1 | 4 | 12 | 3.86 | 4 | 3.4 | 0 |
| 5 | 13 | 8 | 3 | 11 | 3.11 | 1 | 2.91 | 0 |
| 6 | 1 | 4 | 12 | 4 | 3.86 | 3 | 3.4 | 0 |
| 7 | 14 | 2 | 10 | 6 | 2.88 | 1.5 | 2.33 | 0 |
| 8 | 8 | 3 | 14 | 2 | 3.02 | 2.5 | 2.5 | 0 |
| 9 | 10 | 13 | 9 | 5 | 2.75 | 2 | 2.24 | 0 |
| 10 | 2 | 14 | 13 | 8 | 2.94 | 2 | 2.37 | 0 |
| 11 | 11 | 6 | 5 | 14 | 3.01 | 3.5 | 2.53 | 0 |
| 12 | 6 | 5 | 8 | 13 | 2.94 | 1 | 2.53 | 0 |
| 13 | 12 | 7 | 1 | 7 | 3.15 | 0.75 | 2.78 | 0 |
| 14 | 9 | 10 | 2 | 9 | 2.68 | 1.75 | 1.97 | 0 |
| | | | | Media | 3.11 | 2.09 | 2.66 | 0 |
| | | | | Desviación Estándar | 0.38 | 1.00 | 0.44 | 0 |
| <i>Fitness (E) : 89.97</i> | | | | | | | | |

Tabla 6: Agenda de rotación de la solución E_R.

| Trab. | Rot. 1 | Rot. 2 | Rot. 3 | Rot. 4 | Derecha | | Izquierda | |
|------------------------------------|--------|--------|--------|----------------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | | | | | OCRA multitarea | Variabilidad | OCRA multitarea | Variabilidad |
| 1 | 12 | 1 | 13 | 12 | 4.23 | 6.5 | 3.11 | 0 |
| 2 | 5 | 6 | 14 | 9 | 3 | 3.5 | 2.51 | 0 |
| 3 | 3 | 10 | 8 | 1 | 3.17 | 0 | 3.11 | 0 |
| 4 | 9 | 7 | 5 | 11 | 2.63 | 1.5 | 2.16 | 0 |
| 5 | 1 | 12 | 2 | 7 | 3.61 | 4.25 | 2.62 | 0 |
| 6 | 10 | 5 | 1 | 8 | 2.84 | 1.75 | 2.44 | 0 |
| 7 | 4 | 14 | 10 | 14 | 2.69 | 1 | 2.69 | 0 |
| 8 | 6 | 3 | 12 | 10 | 3.22 | 4.25 | 2.83 | 0 |
| 9 | 11 | 2 | 3 | 2 | 3.61 | 5.75 | 2.36 | 0 |
| 10 | 7 | 8 | 4 | 13 | 2.75 | 1.5 | 2.7 | 0 |
| 11 | 13 | 4 | 6 | 4 | 3.5 | 4 | 3.43 | 0 |
| 12 | 8 | 9 | 7 | 5 | 2.35 | 0 | 2.03 | 0 |
| 13 | 14 | 13 | 11 | 3 | 3.44 | 4 | 3.2 | 0 |
| 14 | 2 | 11 | 9 | 6 | 3.24 | 3.5 | 2.44 | 0 |
| | | | | Media | 3.16 | 2.96 | 2.69 | 0 |
| | | | | Desviación Estándar | 0.50 | 2.03 | 0.41 | 0 |
| <i>Fitness (E) : 104.41</i> | | | | | | | | |

4. Conclusiones

La aplicación del algoritmo ROTOCRA a un caso de estudio ha permitido comprobar su capacidad para obtener agendas de rotación en las que se minimiza el riesgo debido a la exposición continuada de los trabajadores a una elevada repetitividad de movimientos. El algoritmo logra diversificar el contenido de las tareas realizadas en la jornada, favoreciendo la polivalencia de los trabajadores y disminuyendo la monotonía, al tiempo que evita la sobreexposición de los trabajadores a niveles altos de riesgo por repetitividad. Por otra parte, el algoritmo tiene en cuenta las incapacidades físicas, transitorias o permanentes, de los trabajadores. Además, ROTOCRA proporciona buenos resultados en tiempos aceptables de cálculo lo que lo convierte en una herramienta útil en entornos reales de trabajo.

El algoritmo ROTOCRA ha sido implementado en un software ROT.OCRA 1.0. que facilitará la aplicación real del algoritmo propuesto. Dicho software también implementa el cálculo del índice OCRA monotarea y permite al planificador almacenar información de los puestos y de los trabajadores, incluido su índice OCRA monotarea.

Por último, aunque se ha validado la capacidad del algoritmo ROTOCRA para generar agendas de rotación factibles bajo criterios ergonómicos, queda pendiente validar si efectivamente suponen la disminución de la incidencia de los trastornos músculo-esqueléticos asociados con la repetitividad entre los trabajadores.

Figura 3: Sección de la pantalla de visualización del software ROTOCRA 1.0 de E₅

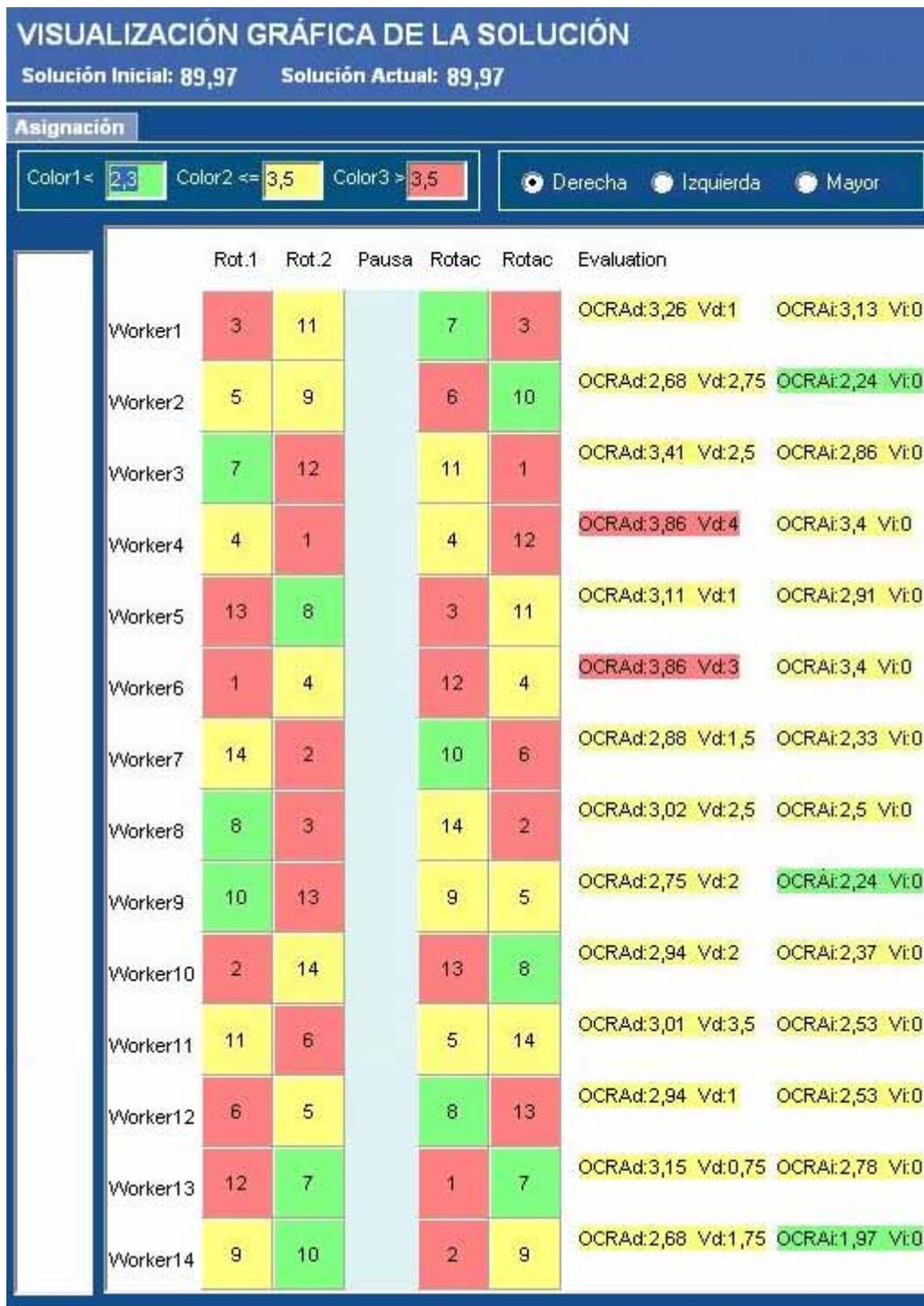
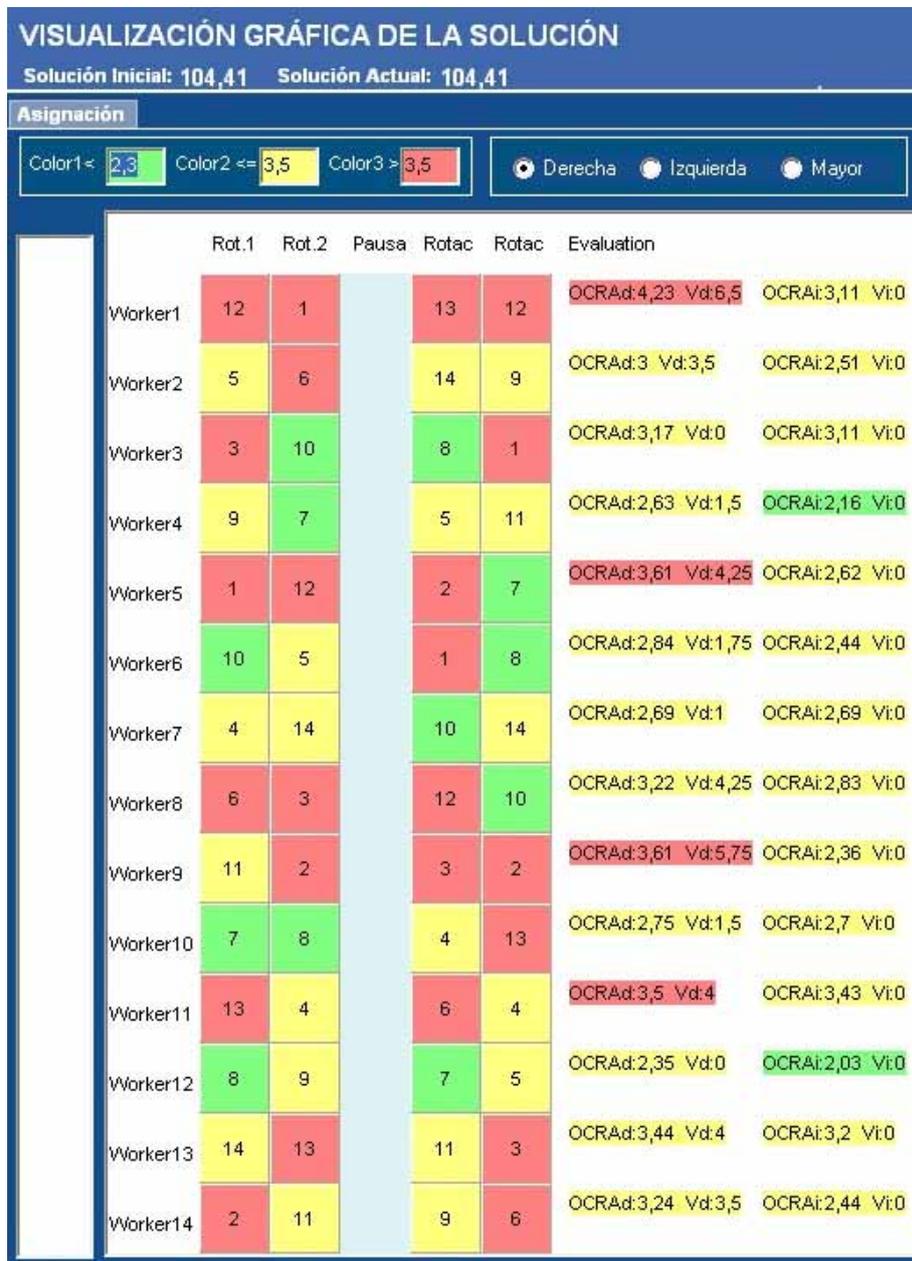


Figura 4: Visualización en el software ROTOCRA 1.0 de E_R



5. Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Politécnica de Valencia su apoyo a esta investigación a través de su Programa de Apoyo a la Investigación y Desarrollo 2009 y su financiación a través del proyecto PAID-06-09/2902.

6. Referencias

- Azizi, N., Zolfaghari, S. & Liang, M. (2010). Modeling job rotation in manufacturing systems: The study of employee's boredom and skill variations. *International Journal of Production Economics*, 123, 69-85.
- Baldwin, M.L. (2004). Reducing the costs of work-related musculoskeletal disorders: targeting strategies to chronic disability cases. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 14, 33-41.
- Bernard, B. (1997). *Musculoskeletal disorders and workplace factors: A critical review of epidemiological evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back*. Cincinnati, Ohio. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH).
- Bonfiglioli R., Mattioli, S., Fiorentini, C., Graziosi, F., Curti, S., & Violante, F.S. (2007). Relationship between repetitive work and the prevalence of carpal tunnel syndrome in part-time and full-time female supermarket cashiers: a quasi-experimental study. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 80, 248-253.
- Byström S., Hall, C., Welander, T. & Kilbom, Å. (1995). Clinical disorders and pressure-pain threshold of the forearm and hand among automobile assembly line workers. *Journal of hand surgery [BR]*, 20, 782-790.
- Carnahan, B.J., Redfern, M.S. & Norman, B. (2000). Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search. *Ergonomics*, 43, 543-560.
- Costa, A. M. & Miralles, C. (2009). Job rotation in assembly lines employing disabled workers, *International Journal of Production Economics*, 120, 625-632.
- Cunningham, B.J. & Eberle, T. (1990). A guide to job enrichment and redesign. *Personnel Journal*, 56-61.
- Diego-Mas J.A., Asensio-Cuesta, S., Sanchez-Romero, M.A., & Artacho-Ramirez, M.A. (2009). A multi-criteria genetic algorithm for the generation of job rotation schedules, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, 23-33.
- Eriksson T. & Ortega, J. (2006). The adoption of job rotation: Testing the theories. *Industrial & Labor Relations Review*, 59, 653-666.
- European Agency for Safety and Health at Work, Podniece, Z. (2008). Work-related musculoskeletal disorders: prevention report, *European Agency for Safety and Health at Work*.
- Goldberg, D.E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Company Inc. Massachusetts.
- Guelaud F., Beauchesne, M.N., Gautrat, J. & Roustang, G. (1977). *Pour une analyse des conditions du travail ouvrier dans l'entreprise*, Paris: A.Colin.
- Hazzard, L., Mautz, J., & Wrightsman, D. (1992). Job rotation cuts cumulative trauma cases. *Personnel Journal*, 71, 29-32.
- Hignett S. & McAtamney, L. (2000). Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31, 201-205.
- Huang, H.J. (1999). Job Rotation from the Employees' Point of View. *Research and Practice in Human Resource Management*, 7, 75-85.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (2007). V Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (2009). Encuesta Nacional de Gestión de la Seguridad y Salud de las Empresas.
- Jonsson, B. (1988). Electromyographic studies of job rotation. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 14, 108-109.
- Kullpattaranirun T., Nanthavanij, S. (2005). A heuristic genetic algorithm for solving complex safety-based work assignment problems. *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice*, 12, 45-57.

- Latko W.A., Armstrong, T.J., Franzblau, A., Ulin, S.S., Werner, R.A. & Albers, J.W. (1999). Cross-sectional study of the relationship between repetitive work and the prevalence of upper limb musculoskeletal disorders. *American Journal of Preventive Medicine*, 36, 248-259.
- Liss G.M., Jesin, E., Kusiak, R.A. & White, P. (1995). Musculoskeletal problems among Ontario dental hygienists. *American Journal of Industrial Medicine*, 28, 521-540.
- McAtamney, L. & Corlett, E. N. (1993). RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24, 91-99.
- Nanthavanij, S. & Kullpattaranirun, T. (2001). A genetic algorithm approach to determine minimax work assignments. *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice*, 8, 176-185.
- Ohlsson, K., Hansson, G.A., Balogh, I., Strömberg, U., Palsson, B., Nordander, C., Rylander, L., & Skerfving, S. (1994) Disorders of the neck and upper limbs in women in the fish processing industry. *Journal of occupational and environmental medicine*, 54, 826-832.
- Osorio A.M., Ames, R.G., Jones, J., Castorina, J., Rempel, D., & Estrin, W. (1994). Carpal tunnel syndrome among grocery store workers. *American Journal of Industrial Medicine*, 25, 229-245.
- Papadimitriou, C.H. & Steiglitz, K. (1982). Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity. Dover Publications Inc. New York.
- Podniece, Z. & Taylor, N.T. (2008). Work-related musculoskeletal disorders: prevention report, *European Agency for Safety and Health at Work*.
- Rissen D., Melin, B., Sandsjö, L., Dohms, I., & Lundberg, U. (2002). Psychophysiological stress reactions, trapezius muscle activity, and neck and shoulder pain among female cashiers before and after introduction of job rotation. *Work & Stress*, 16, 127-137.
- Rodgers, S.H. (1986). Ergonomic design for people at work. Edit.:Van Nostrand Reinhold, Eastman Kodak Co. New York.
- Rodgers, S. H. (1992). A functional job analysis technique. *Occupational medicine: State of the art reviews*, 7, 679-711.
- Seçkiner, S.U. & Kurt, M. (2007). A simulated annealing approach to the solution of job rotation scheduling problems. *Applied Mathematics and Computation*, 188, 31-45.
- Seçkiner, S.U. & Kurt, M. (2008). Ant colony optimization for the job rotation scheduling problem. *Applied Mathematics and Computation*, 201, 149-160.
- Shir R., Viikari-Juntura, E., Varonen, H., & Heliövaara, M. (2006). Prevalence and Determinants of Lateral and Medial Epicondylitis: A Population Study. *American Journal of Epidemiology*, 164, 1065-74.
- Snook S.H. & Ciriello, V.M. (1991). The Design of Manual Handling Tasks - Revised Tables of Maximum Acceptable Weights and Forces. *Ergonomics*, 34, 1197-1213.
- Tharmmaphornphila, W., Green, B., Carnahan, B.J. & Norman, B.A. (2003). Applying mathematical modeling to create job rotation schedules for minimizing occupational noise exposure. *Aiha Journal*, 64, 401-405.
- Tharmmaphornphilas, W. & Norman, B. (2004). A quantitative method for determining proper job rotation intervals. *Annals of operations research*, 128, 251-266.
- Tharmmaphornphilas, W. & Norman, B.A. (2007). A methodology to create robust job rotation schedules. *Annals of operations research*, 155, 339-360.
- Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A. & Fine, L. J. (1993). Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics*, 7, 749-776.
- Xiao G.B., Dempsey, P.G., Lei, L., Ma, Z.H. & Liang, Y.X. (2004). Study on musculoskeletal disorders in a machinery manufacturing plant, *Occupational and Environmental Medicine*, 46, 341-346.
- Yaoyuenyong S. & Nanthavanij, S. (2006). Hybrid procedure to determine optimal workforce without noise hazard exposure. *Computers & Industrial Engineering*, 51, 743-764.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Sabina Asensio Cuesta.
Phone: 963877007- 85683
E-mail : sasensio@dpi.upv.es