

**CREACIÓN DE AGENDAS DE ROTACIÓN DE TRABAJO QUE CONSIDEREN
EL RIESGO DE DESARROLLO DE TRASTORNOS MUSCULOESQUELÉTICOS
Y RIESGOS FÍSICOS**

ING. JAIRO DANIEL OCHOA GUERRA

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍAS – ÉNFASIS INGENIERÍA INDUSTRIAL
CARTAGENA
2014**

**CREACIÓN DE AGENDAS DE ROTACIÓN DE TRABAJO QUE CONSIDEREN
EL RIESGO DE DESARROLLO DE TRASTORNOS MUSCULOESQUELÉTICOS
Y RIESGOS FÍSICOS**

AUTOR

ING. JAIRO DANIEL OCHOA GUERRA

**TRABAJO DE TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA**

DIRECTOR

**ING. FABIÁN ALFONSO GAZABÓN ARRIETA. MÁSTER EN DIRECCIÓN DE
OPERACIONES Y CALIDAD. DOCENTE TITULAR UNIVERSIDAD
TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍAS – ÉNFASIS INGENIERÍA INDUSTRIAL
CARTAGENA**

2014

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Cartagena 13 De Abril Del 2014

AGRADECIMIENTOS

EL AUTOR de la presente investigación agradece a:

A Dios, por brindarnos la sabiduría para culminar nuestros estudios.

A mi familia por el apoyo durante el transcurso de esta Maestría

A todos los docentes de la Maestría, por su asesoría y amistad

A el ingeniero Fabián Gazabón por su constante apoyo y asesoría

A todos los compañeros del grupo y demás personas que contribuyeron a
alcanzar esta meta.

DEDICATORIA

Dedicamos nuestra tesis con amor y cariño a:

A Dios por darnos la oportunidad de mejorar como personas y profesionales de la ingeniería y a nuestros familiares por que su compañía nos motivó en el logro de este sueño.

Jairo Daniel Ochoa Guerra

Fabián Gazabón Arrieta

CONTENIDO

RESUMEN.....	14
INTRODUCCIÓN.....	15
CAPITULO I. GENERALIDADES.....	17
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	17
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	19
1.3. OBJETIVOS.....	21
1.3.1. Objetivo General.....	21
1.3.2. Objetivos Específicos.....	21
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	22
2.1. Rotación de puestos de trabajo (enfoque ergonómico).....	22
2.2. ALGUNAS DEFINICIONES DE ROTACIÓN DE PUESTOS DE TRABAJOS	25
2.3. JOB ROTATION SCHEDULING PROBLEM.....	25
2.4. MÉTODO DE EVALUACIÓN DE TRASTORNOS MUSCULOESQUELÉTICOS, JSI (JOB STRAIN INDEX).....	27
2.4.1. PASOS PARA EL MÉTODO.....	28
2.4.2. MÉTODO REBA.....	29
2.5. RUIDO INDUSTRIAL.....	31
2.5.1. Nivel de presión sonora.....	33
2.5.2. Unidades de medida del ruido.....	33
2.5.3. DOSIS DE RUIDO.....	35
2.5.4. TEMPERATURA INDUSTRIAL.....	37
2.5.5. Metodología del índice WBGT.....	37
2.6. METAHEURÍSTICAS.....	39
2.6.1. Enjambre de abejas.....	39
2.6.2. Algoritmo Genético.....	45
2.7. Optimización Multiobjetivo.....	48
2.7.1. Métrica de comparación para frentes de Pareto.....	51

2.7.2. Métrica Tasa de Error	51
2.8. ESTADO DEL ARTE	52
CAPITULO 3. METODOLOGÍA	57
3.1 Tipo y diseño de la investigación.....	57
3.2. Formulación del modelo matemático.....	58
3.2.1. Función objetivo.....	58
3.2.2. Variables.....	59
3.2.3. Índices	59
3.2.4. Parámetros	59
3.2.5. Sistema de restricciones.....	60
3.3. MODELO MATEMÁTICO JRSP MULTIOBJETIVO MIP	61
3.3.1 Justificación de las variables del modelo.....	63
3.4. Metodología para la solución del problema MULTIOBJETIVO.....	64
3.5. Obtención de parámetros de validación para el modelo matemático	64
Fuente: autor	67
3.6. Instancias de validación del modelo.....	67
3.7. Instancias y obtención de datos para las corridas experimentales.....	68
CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....	70
4.1. VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	70
4.2. Comportamiento de las variables del problema con respecto a las instancias de validación	77
4.3. Obtención de la agenda por medio de la metaheurística PSO.....	79
4.3.1 Pruebas experimentales para toma de los parámetros de la metaheurística PSO.....	81
4.3.1 Corridas de la metaheurística PSO	81
4.3.2. Frente de Pareto para cada instancia de validación del problema de la metaheurística PSO.....	82
4.4. Obtención de la agenda por medio de la metaheurística algoritmo genético	82
4.4.1 Corridas de la metaheurística algoritmo genético.....	84

4.5. Comparación de frentes de Pareto del modelo exacto, la metaheurística PSO y el algoritmo genético	85
4.6 Comparación de las soluciones de los algoritmos con PF true y tasa de error.....	86
4.7 Comparación de las soluciones de los algoritmos con los valores de exposición en la empresa.....	89
4.8 Comparación de las soluciones de los algoritmos con PF true y tasa de error de las Instancia de experimentación	90
4.8.1 Comparación Para La Instancia De Experimentación 1, 2 Y 3.....	90
4.8.2 Comportamiento de las variables del problema en las instancias de experimentación 1, 2 y 3	91
4.8.3 Comparación Para La Instancia De Experimentación 4, 5 Y 6.....	93
4.8.4 Comportamiento de las variables del problema en las instancias de experimentación 4, 5 y 6	94
4.8.5 Comparación Para La Instancia De Experimentación 7, 8 Y 9.....	97
4.8.6 Comportamiento de las variables del problema en las instancias de experimentación 7, 8 y 9	98
4.8.7 Comparación Para La Instancia De Experimentación 10, 11 Y 12.....	101
4.8.8 Comportamiento de las variables del problema en las instancias de experimentación 10, 11 y 12	102
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	104
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	108
6.1 CONCLUSIONES	108
6.2 Trabajos futuros	109
BIBLIOGRAFÍA.....	110

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos y ejemplos de intervenciones organizacionales del trabajo.....	24
Tabla 2. Definiciones	25
Tabla 3. Niveles de puntuación REBA	31
Tabla 4. Criterios para la exposición a estrés térmico (WBGT)	38
Tabla 5. Parámetros enjambre de abejas	41
Tabla 6. Parámetros Algoritmo Genético	46
Tabla 7. Parámetros de validación del modelo	66
Tabla 8. Parámetros de validación del modelo con reducción en el parámetro ruido.....	67
Tabla 9. Instancias de validación del problema	68
Tabla 10. Instancias de experimentación del problema	69
Tabla 11. Frente Pareto instancia validación 1	70
Tabla 12. Frente Pareto instancia validación 2	73
Tabla 13. Frente Pareto instancia validación 3	74
Tabla 14. Comportamientos de las variables del modelo a validar	77
Tabla 15. Parámetro del algoritmo PSO	81
Tabla 16. Numero de soluciones en el frente de Pareto de la metahurística PSO.....	82
Tabla 17. Parámetro del algoritmo Genético	84
Tabla 18. Comparación de la instancia de validación 1	87
Tabla 19. Comparación de la instancia de validación 2	87
Tabla 20. Comparación de la instancia de validación 3	88
Tabla 21. Análisis datos de validación empresa vs algoritmos	89
Tabla 22. Instancia experimental 1. (15 trabajadores - 15 trabajos – 2 turnos)	90
Tabla 22. Instancia experimental 2.(15 trabajadores - 15 trabajos – 3 turnos)	90
Tabla 23. Instancia experimental 2.(15 trabajadores - 15 trabajos – 4 turnos)	91
Tabla 24. Comportamientos de las variables de la instancia de experimentación (I.E.1 , I.E.2 y I.E.3).....	91
Tabla 25. Comportamientos promedios de las variables de la instancia de experimentación 1, 2 y 3.....	92
Tabla 26. Instancia experimental 4. (20 trabajadores - 20 trabajos – 2 turnos) ...	94
Tabla 27. Instancia experimental 5.(20 trabajadores - 20 trabajos – 3 turnos)	94
Tabla 28. Instancia experimental 6.(20 trabajadores - 20 trabajos – 4 turnos) ...	94
Tabla 29. Comportamientos de las variables de la instancia de experimentación 4, 5 y 6.....	95
Tabla 30. Comportamientos promedios de las variables de la instancia de experimentación 4, 5 y 6.....	95
Tabla 31. Instancia experimental 7. (25 trabajadores - 25 trabajos – 2 turnos) ...	97

Tabla 32. Instancia experimental 8.(25 trabajadores - 25 trabajos – 3 turnos)	97
Tabla 33. Instancia experimental 9.(25 trabajadores - 25 trabajos – 4 turnos) ..	98
Tabla 34. Comportamientos de las variables de la instancia de experimentación 7, 8 y 9.....	98
Tabla 35. Comportamientos promedios de las variables de la instancia de experimentación 7, 8 y 9.....	99
Tabla 36. Instancia experimental 10. (30 trabajadores - 30 trabajos – 2 turnos)	101
Tabla 37. Instancia experimental 11.(30 trabajadores - 30 trabajos – 3 turnos)	101
Tabla 38. Instancia experimental 12.(30 trabajadores - 30 trabajos – 4 turnos)	101
Tabla 39. Comportamientos de las variables de la instancia de experimentación 10, 11 y 12.....	102
Tabla 40. Comportamientos promedios de las variables de la instancia de experimentación 10, 11 y 12.....	102
Tabla 41. Resumen de resultados de la validación.....	105
Tabla 42. Resumen de resultados de la experimentación	106
Tabla 43. Resumen de resultados de la variable	107
Tabla 44. Intensidad del esfuerzo	119
Tabla 45. % de duración del esfuerzo.....	120
Tabla 46. Esfuerzos por minuto Postura mano-muñeca	121
Tabla 47. Postura mano-muñeca Velocidad de trabajo	121
Tabla 48. Velocidad de trabajo	122
Tabla 49. Duración de la tarea por día.....	122
Tabla 50. Cálculo de los factores multiplicadores	123

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Onda acústica aérea. Comportamiento ondulatorio y variaciones sobre la presión atmosférica.....	32
Figura 2. Atenuación para las escalas de ponderación A, B y C	35
Figura 3. Frontera de Pareto.....	50
Figura 4. Comportamiento de las variables	77
Figura 5. Comportamiento de dosis ruido	78
Figura 6. Comportamiento de JSI, REBA; luxes; temperatura.....	78
Figura 7. Comportamiento dosis ruido IE1, IE2 y IE3	92
Figura 8. Comportamiento de JSI, REBA; luxes; temperatura en IE1, IE2 , IE3....	93
Figura 9. Comportamiento de las variables IE4, IE5 y IE6.....	95
Figura 10. Comportamientos del ruido, JSI, REBA; luxes; temperatura en IE4, IE5 , IE6.	96
Figura 11. Comportamiento de las variables IE7, IE8 y IE9.....	99
Figura 12. Comportamientos del ruido, JSI, REBA; luxes; temperatura en IE7, IE8 , IE9	100
Figura 13. Comportamiento de las variables IE7, IE8 y IE9.....	103
Figura 14. Comportamientos del ruido, JSI, REBA; luxes; temperatura en IE10, IE11 , IE12.....	103

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Actualización de posición de las partículas en PSO	41
Ilustración 2. Enjambre de Abejas	42
Ilustración 3. Diagrama de bloques del algoritmo genético.....	47

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Metodología JSI.....	119
Anexo 2. Alfas MULTIOBJETIVO	124
Anexo 3. Parámetros para las instancias de validación.....	150
Anexo 4. Pruebas experimentales	151
Anexo 5. Parámetros para las instancias de experimentación, 15 trabajadores en todos los posibles turnos de rotación.....	154
Anexo 6. Parámetros para las instancias de experimentación, 20 trabajadores en todos los posibles turnos de rotación.....	155
Anexo 7. Parámetros para las instancias de experimentación, 25 trabajadores en todos los posibles turnos de rotación.....	156
Anexo 8. Parámetros para las instancias de experimentación, 30 trabajadores en todos los posibles turnos de rotación.....	157
Anexo 9. Soluciones Frente de Pareto Instancia De Validación.	158
Anexo 10. Programación del modelo en GAMS.....	165
Anexo 11. Programación enjambre.....	174
Anexo 12. Programación algoritmo genético	181

RESUMEN

La presente investigación está enmarcada en un grupo de problemas de scheduling clasificados como problemas de programación de personal; llamado Job rotation (rotación de trabajadores). En esta se desarrolla un modelo matemático multiobjetivo para realizar agendas de rotación que minimicen la exposición a riesgos ergonómicos y físicos, de tal manera que para este fin, se realizó una validación del modelo en una empresa o entorno real. Encontrando que los algoritmos aplicados (modelo exacto, Metaheurística Particle swarm optimization y algoritmo genético) generaron mejoras en la exposición a los factores de riesgos estudiados en los operarios. Por otra parte en esta investigación se realizó experimentación con el modelo matemático solucionado a través de las metaheurística y algoritmo genético, encontrando que el PSO presentó mayor representación o participación en los frentes de Pareto obtenidos.

ABSTRACT

This research is framed in a group scheduling problems classified as staff scheduling problems; called Job rotation (workers). This a multi-objective mathematical model is developed for rotation agendas that minimize exposure to ergonomic and physical risks, so that for this purpose a model validation was performed in a company or real environment. Finding that the algorithms applied (exact model, metaheuristic Particle swarm optimization (PSO) and Genetic Algorithm) generated improvements in exposure to risk factors studied operators. Moreover in this investigation conducted experiments with the mathematical model solved through the metaheuristic and genetic algorithm, finding that the PSO had higher representation or participation in Pareto fronts obtained

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la gestión de los riesgos industriales es de vital importancia en las actividades rutinarias de cada empresa. En el mundo se observa la tendencia que tienen los negocios a gestionar los riesgos desde la misma planificación. Se sabe que el trabajador es un recurso invaluable para alcanzar las metas, pero además es un ser humano con un entorno social y familiar, al cual hay que devolverlo en las mismas condiciones en las que ese entorno no los proporciona, “sano”.

El objetivo de las empresas, es la maximización de las utilidades, basados en la producción y distribución de sus bienes y servicios, teniendo en cuenta las necesidades y exigencias del mercado, lo cual conlleva a que las mismas tengan que decidir qué tipo de configuración productiva y de personal, es la más apropiada para lograr su objetivo. Estas configuraciones pueden aumentar la productividad y eficiencia de los procesos, lo que en ocasiones conlleva a que los empleados se encuentren expuestos a factores de riesgo físicos así como a desordenes musculoesqueléticos que generan la aparición de limitaciones físicas a los mismos.

La preocupante situación que enfrentan todos los días los trabajadores en sus puestos, evidencia la prioritaria necesidad de considerar los efectos generados a los trabajadores por la exposición a factores de riesgos y condiciones poco favorables en los entornos laborales, a la hora de diseñar los planes de trabajos.

Dado ese conjunto de ideas se estudia en el ámbito científico herramientas útiles para la gestión de los riesgo laborales (ocupacionales), tal es el caso del presente trabajo, el cual busco encontrar un modelo matemático que proporcione rotaciones de puesto de trabajo que minimicen la exposición a ciertos peligros o factores de riesgo. El modelo propuesto contiene 5 funciones objetivos que

obedecen a factores de riesgo propios de muchas empresas, como lo son el ruido, la temperatura, la iluminación, los movimientos repetitivos y la carga postural.

El objetivo fundamental es generar rotaciones de puesto de trabajos, donde los trabajadores no se vean afectados por un factor más que otro, se busca entonces, una igualdad en las exposiciones que minimice la aparición de enfermedades profesionales y trastornos musculoesqueléticos. El modelo matemático propuesto fue validado con datos obtenidos de una empresa, en el cual se demostró que las herramientas utilizadas ayudarían a minimizar la exposición a los factores de riesgos estudiados. Entre esas herramientas tenemos a la solución del modelo exacto y la programación de metaheurísticas PSO y algoritmo genético.

Dada la complejidad de los ambientes industriales se decide también, experimentar con el modelo, desarrollando instancias con más puestos de trabajos y trabajadores, para verificar las soluciones y establecer como se comportaban las metaheurística al complejizar el problema. Para el trabajo computacional se programa el modelo exacto en Gams (General Algebraic Modeling System) y las metaheurísticas en Matlab, se utilizó también Excel para el tratamiento de los datos.

Entonces, en este documento se encontrara el modelo de rotación propuesto por los autores, así mismo, el proceso de validación de dicho modelo y por último se presentan el análisis de los resultados de las formas alternativas de solucionarlo por medio de metaheurísticas.

CAPITULO I. GENERALIDADES

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La presencia de desórdenes musculoesqueléticos (DME) o trastornos musculoesqueléticos (TME) es una de las grandes preocupaciones de los encargados de la salud ocupacional dentro de las empresas y una de las causas de ausentismo laboral, por ejemplo en Europa el 24% de los trabajadores afirma sufrir dolor de espalda y el 22,8% se queja de dolores musculares [1]. Así mismo en Colombia las enfermedades del tipo osteomuscular fueron el 80,8% del total de enfermedades registradas para el 2007 según FASECOLDA (Federación de Aseguradores Colombianos). Para los TME las principales herramientas de evaluación de tipo ergonómico son JSI (Strain Index), RULA (Rapid Upper Limb Assessment), NIOSH EQUACIÓN (ecuación de Niosh), OWAS (Ovako Working Analysis System), OCRA (Occupational Repetitive Action), REBA (Rapid Entire Body Assessment), estas valoran aquellos esfuerzos que conllevan a los desórdenes musculoesqueléticos como los movimientos repetitivos, la carga postural o el levantamientos manual de carga. Tales métodos ofrecen la posibilidad al evaluador de generar alternativas para el mejoramiento, permitiendo aplicar mejoras a las condiciones de trabajo ya existente de acuerdo a los resultados de los métodos. De tal forma que se necesitan metodologías más robustas para tratar este tipo de riesgo y otros asociados a él.

Una opción válida es la rotación de puesto de trabajo. El problema de este concepto es que una rotación sin planeación o un cambio arbitrario en las tareas no asegura la prevención de los riesgos, de modo que se debe profundizar acerca de metodologías exactas y científicas para diseñar rotaciones de trabajo que reduzcan efectivamente los TME y los riesgos relacionados. Una de estas metodologías es el Job Rotation Scheduling Problem, que es un subconjunto de los Scheduling Problem [2], que ayuda a programar tareas de forma óptima fijando

una función objetivo con criterio ergonómico. Otra forma puede ser a través de las aproximaciones computacionales utilizando algoritmos metaheurísticos los cuales permiten encontrar soluciones cercanas al óptimo.

La rotación de puesto también trae consigo una posible exposición de otros factores de riesgo diferentes al ergonómico, por parte del operario. En consecuencia, se debe vincular a la programación de rotación como insumos, la evaluación de puesto, la identificación de otros factores relevantes para la toma de decisiones, los niveles actuales de los factores, los valores permisibles de esos factores y su forma de control.

Considerando todos los factores anteriores y la oportunidad investigativa, se desarrollara un algoritmo PSO (Particle Swarm Optimizatio [3]) para crear agendas o programaciones de rotación de puesto de trabajos para disminuir los trastornos musculo esqueléticos (TME) originados por movimientos repetitivos en extremidades superiores utilizando el método JSI (Job Strain Index), dichas agenda deberán considerar otros factores asociados a la producción o las tareas, de tal forma que a la vez se deben minimizar la exposición a factores de riesgo físico. Para los riesgo físicos se utilizara los valores limites permisible legales vigentes, así como también la utilización de los criterio internacionales como lo de NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health, USA).

1.2. JUSTIFICACIÓN

La rotación de puesto de trabajo es un problema que se encuentra en la mayoría de empresas y su utilización está limitada a la competencia del personal encargado. En la rotación pueden intervenir muchas variables que dependen del entorno laboral o de los objetivos de la organización, de tal modo que se tiene que tener en cuenta el número de empleados, el número de puestos de trabajo, la demanda de trabajos, la frecuencia de la rotación, el número de días de descanso, el tipo de factor de riesgo a considerar, la exposición a diversos factores de riesgo, la capacidad o cualificación de los obreros, la motivación o el aburrimiento, etc. Resulta difícil generar una agenda de forma óptima y que contengan la combinación de dos o más variable; en tal sentido es necesario crear un método para el diseño de rotaciones de puesto de trabajo con el fin de minimizar los factores de riesgo de interés.

Para el estudio y la evaluación de los TME por movimientos repetitivos se usará El JSI (Job Strain Index). Tal selección es justificada con el resultado del estudio realizado por Dempsey [4] en el cual estipula que el método es una de las herramientas más utilizadas por los ergónomos (39,3%) y sugerido por Triggs [5] para clasificar los puestos de trabajo para su rotación. El método permite evaluar el riesgo de desarrollar desórdenes musculo esqueléticos en tareas en las que se usa intensamente el sistema mano-muñeca, por lo que es aplicable a gran cantidad de puestos de trabajo [6] Su utilidad y validez es probada en otras investigaciones [7] y [8].

Se implementará un algoritmo PSO (Particle Swarm Optimization) puesto que en la literatura consultada muestra que la metaheurísticas en adaptable a muchos problemas, permite controlar como se explora el espacio de búsqueda, es un método simple con el cual se obtiene buenos resultados, además, hasta ahora no se ha encontrado la aplicación de este algoritmo al problema de la rotación de

trabajos en un enfoque multiobjetivo. El PSO es una metaheurística basada en población [9] en la cual el Movimiento de cada partícula es influenciada por su mejor posición local conocida y se orienta también hacia las mejores posiciones conocidas en la búsqueda del espacio. Ha sido ampliamente utilizada para problemas de Scheduling como por ejemplo; Flow Shop Scheduling [10], flexible job shop scheduling problema [11], Vehicle Routing [12]. También se ha comparado con otras metaheurísticas como el algoritmo genético en un problema de Multi-task Scheduling [13] encontrando que la convergencia de las partículas a las soluciones óptimas puede ser más rápida.

Finalmente, la importancia de esta investigación también radica en que se desarrollara un modelo restringido donde se vinculan simultáneamente varios factores.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar un algoritmo PSO para crear agendas de rotación de trabajo con el objetivo de disminuir el riesgo de desarrollo de trastorno musculoesqueléticos y la disminución de la exposición a riesgos físicos

1.3.2. Objetivos Específicos

- Realizar revisión literatura sobre el eje central de la investigación
- Formular un modelo matemático para la rotación de trabajo que considere disminución de riesgo de desarrollo de desórdenes musculoesqueléticos y la disminución de la exposición a riesgos físicos
- Resolver de forma óptima el modelo matemático planteado en el lenguaje GAMS (General Algebraic Modeling Systems) para encontrar el conjunto de soluciones a comparar con los resultados de las metaheurísticas
- Programar la Metaheurística particle Swarm Optimization (PSO) para creación de agendas de rotación de puestos de trabajos
- Comparar los frentes de Pareto de las metaheurística con respecto al modelo matemático formulado y a las instancia optimas encontradas
- Comparar instancias experimentales utilizando diferentes metaheurísticas

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Rotación de puestos de trabajo (enfoque ergonómico)

La rotación de puesto de trabajos se entiende como una forma de organización del trabajo, que implica el movimiento de la personas por distintos puestos o tareas. También puede entenderse como “el cambio de un operario entre dos o más puestos de trabajo del mismo nivel y contenido tecnológico y/o funcional” [6].. La idea de la rotación de trabajo es la disminución de la exposición de riesgo en los trabajadores, principalmente los riesgos ergonómicos. La rotación requiere que los trabajadores se trasladen a diferentes puntos o estaciones de trabajo en periodos fijos o irregulares de tiempo [14]. Básicamente la rotación es una asignación donde se encuentra la ubicación del personal para reducir o favorecer aspectos específicos a favor del operario, también la podemos ver como “una forma de organización del trabajo basada en el intercambio sistemático de los trabajadores entre puestos, y cuyo objetivo último es mejorar las condiciones ergonómicas en las que desarrollan su labor los trabajadores. [6].

La rotación de puesto busca el beneficio de los empleados y de la empresa, favoreciendo el entorno productivo y la salud. Muchos son los efectos reconocidos en la literatura y en el medio empresarial que ofrecen los movimientos repetidos, las posturas forzadas, la larga jornada de trabajo, etc. Uno de estos son los desórdenes musculoesqueléticos.

“Las lesiones músculo-esqueléticas pueden aparecer a pesar de tratarse de lugares de trabajo con buenos diseños de los puestos y herramientas [15]. Esta paradoja, mejores condiciones ergonómicas y elevada tasa de lesiones, puede deberse, en entornos productivos, a que los ergónomos, por lo general, intervienen únicamente en una pequeña fracción del problema y se concentran en un factor del riesgo de forma individual (carga, ruido, etc.), o en el diseño del puesto de

trabajo o de las herramientas, pero dejan de lado la base del problema, el diseño de la producción [16]. Los ergónomos no han tenido, tradicionalmente, posibilidad de actuar sobre el sistema productivo quedando su diseño en manos de los ingenieros de producción o gestores. Nuevos enfoques organizativos, como la rotación de puestos de trabajo, tratan de adecuar las exigencias impuestas por el sistema productivo al trabajador desde una perspectiva ergonómica” [1].

Es posible que una gran parte de las lesiones o enfermedades ocupacionales que obtienen los trabajadores provengan de su puesto de trabajo, que aun cuando son diseñados por personas idóneas o no, en ocasiones es imposible por diversas razones establecer situaciones de confort. Bajo tales condiciones, la ergonomía debe hallar soluciones que al menos sitúen el trabajo en condiciones permisibles o, de lo contrario, establecer regímenes de trabajo y descanso, rotación de tareas, etc. para los cuales existen también determinadas técnicas. Dicho con otras palabras, conseguir un entorno que imponga una carga lo más pequeña posible para el sistema termorregulador corporal, teniendo en cuenta la eficiencia productiva del sistema [17].

Así mismo, la rotaciones promueve la variación de tareas, la cual permite disminuir la fatiga y el riesgo de aparición de lesiones músculo-esqueléticas y desórdenes traumáticos acumulativos (DTAs) [18], [19], [20], [21] siempre y cuando la alternancia de actividades suponga un cambio efectivo de los grupos musculares implicados [1].

La rotación de trabajos ha sido generalmente reconocida entre los ergónomos e investigadores como uno de los controles administrativos efectivos para prevenir lesiones musculoesqueléticas de origen ocupacional [22].

Según el Departamento del Trabajo de los Estados Unidos, el principal objetivo de la rotación por tareas es la mitigación de la fatiga física y el estrés de un solo

grupo de músculos a través de la rotación de los trabajadores por diferentes tareas donde se puedan utilizar diferentes tipos de grupos musculares [23].

Por otra parte. La rotación por puestos es uno de los varios tipos de intervenciones que se pueden realizar en las organizaciones laborales con la finalidad de mejorar los objetivos de las mismas [24], otras pueden ser:

Tabla 1. Tipos y ejemplos de intervenciones organizacionales del trabajo

Tipos de intervenciones de Organización del trabajo.	Ejemplos
Gestión del tiempo	Horarios alternativos de descanso.
	Flexibilidad horaria.
	Auto-horario.
	Horarios alternativos.
	Trabajo compartido.
Incrementar la variedad	Rotación de puestos de trabajo.
	Ampliación del trabajo.
	Entrenamiento funcional cruzado.
Incrementar el contenido del trabajo y la responsabilidad	Enriquecimiento del trabajo.
	Carga vertical de trabajo.
	Control sobre el lugar de trabajo
Crear equipos de trabajo	Grupos de trabajo Semi-autónomos.
	Equipos de proyecto.
	Ergonomía participativa.
	Círculos de calidad.
Diseño organizacional	Organización horizontal o plana.
	Descentralización.
	Diseño de sistemas electrónicos de monitorización.
	Organizaciones saludables.
Gestión	Aumento de la comunicación, retroalimentación,
	Intercambios de información.
	Formación de supervisión
	Programas justo a tiempo (Just- in- time)

Fuente: [24].

2.2. ALGUNAS DEFINICIONES DE ROTACIÓN DE PUESTOS DE TRABAJOS

Son varios los autores que ofrecen definiciones acerca de la rotación de puestos de trabajo, algunos como Huang la perciben como una transferencia, Well por su parte la define como un movimiento que requiere diversas habilidades. Varias fuentes coinciden desde el punto de vista organizacional, algunas de estas definiciones las podemos ver a continuación:

Tabla 2. Definiciones

Autor	Año	Definición
Cheraskin [25]	1994	“La rotación de puestos es una transferencia de empleados entre puestos en la organización
Huang [26]	1999	“Transferencia de empleados entre un número diferente de posiciones y tareas que requiere diversas habilidades y responsabilidades”
Well [14]	2004	“La rotación de puestos es el movimiento de trabajadores entre diferentes puestos. Esto requiere que los trabajadores se trasladen a diferentes puestos o estaciones de trabajo en periodos fijos o irregulares de tiempo”
Karwowski y Rodrick [23]	2006	“La rotación de puestos puede definirse como una transferencia sistemática de empleados entre trabajos, tareas, asignaciones o proyectos dentro de una organización para alcanzar diferentes objetivos.”

Fuente: [6]

2.3. JOB ROTATION SCHEDULING PROBLEM

El problema de la rotación de trabajo es conocido por sus siglas **JRSP** (Job Rotation Scheduling Problem), su formulación matemática más reciente se debe a Carnahan [27] , el cual propone un modelo de programación entera y un algoritmo

genético para su solución, dicho modelo ha sido generalmente aceptado para la investigación en este tipo de problemas [28]. El modelo de Carnahan fue:

Modelo N°1

$$\text{Minimize } Z = JSI$$

Subject to :

$$\sum_{i=1}^I X_{ijt} = 1 \quad \forall j \text{ y } \forall t$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ijt} = 1 \quad \forall i \text{ y } \forall t$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T C_{ijt} X_{ijt} \leq JSI \quad \forall i$$

$$X_{ijt} \in (0,1) \quad C_{ijt} \in \text{reales}$$

$$X_{ijt} \begin{cases} 1 & \text{si el trabajador } i \text{ desarrolla la tarea } j \text{ durante el periodo } t \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

$$C_{ijt} \{ \text{el valor } js_i \text{ del trabajador } i \text{ que desarrolla la tarea } j \text{ durante el periodo } t \}$$

Su interés fue generar rotaciones de trabajo para minimizar el Job Severity Index (JSI), el cual es un índice de levantamiento de carga.

El **JRSP** se puede clasificar dentro de los problemas conocidos como de optimización combinatoria [29]. Otros autores han formulado o modificado el modelo de Carnahan, como por ejemplo el modelo de Kurt [28] donde considera la carga de trabajo, para tal caso el modelo de programación entera:

Modelo N°2

$$\text{Minimize } Z = W$$

Subject to :

$$\sum_n^N X_{nmik} = D_{mik} \quad i = 1 \dots 7 \quad k = 1, \dots, K \quad m = 1, \dots, M$$

$$\sum_m^M \sum_k^K X_{nmik} \leq 1 \quad i = 1 \dots 7 \quad n = 1, \dots, n$$

$$\sum_m^M \sum_i^I \sum_k^K C_{mik} X_{nmik} \leq W \quad n = 1, \dots, n$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} X_{nmik} \leq rn = 1, \dots, N$$

$X_{nmik} \begin{cases} 1 & \text{si el trabajador } n \text{ desarrolla la tarea } m \text{ en el día } i \text{ durante el turno } k \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$

$X_{nmik} \in (0,1) C_{mik} \in R$

En este modelo matemático el índice **i** muestra los días de la semana, el índice **k** es el cambio de turno, el índice **n** indica el número de empleados, el índice **m** el tipo de trabajo, el **r** muestra el número de asignaciones de cada empleado, **D_{mik}** es el número de empleados asignados en el turno k realizando el trabajo m en el día i; **C_{mik}** indica el costo variable de cada empleado al realizar la tarea m en términos de carga de trabajo, **W** de la carga de trabajo. La variable entera X_{nmik} expresa si un empleado es asignado o no, a un turno k en la realización de un tipo del trabajo m.

2.4. MÉTODO DE EVALUACIÓN DE TRASTORNOS MUSCULOESQUELÉTICOS, JSI (JOB STRAIN INDEX)

El método JSI [30] es un método de evaluación de puestos de trabajo que permite valorar si los trabajadores que los ocupan están expuestos a desarrollar

desórdenes traumáticos acumulativos en la parte distal de las extremidades superiores debido a movimientos repetitivos [6]

Combina la utilización de variables que se pueden estimar de manera cuantitativa y subjetiva, están se obtiene de principios biomecánicos y fisiológicos. El método se concentra en el sistema mano muñeca y evalúa el riesgo de desarrollar lesiones por movimeintos repititivos.

2.4.1. PASOS PARA EL MÉTODO

Para la aplicación de método primero se encunatra el valor de las siguientes variables:

1. Intensidad del esfuerzo (IE)
2. Medición de la duración de los esfuerzos (DE)
3. Esfuerzos por minuto (EM)
4. Estimación de la posición anatómica de la mano (HWP)
5. Estimación cualitativa de la velocidad con la que el trabajador realiza la tarea (SW)
6. Duración de la tarea por día (DD)

La tablas de orientación para el valor de cada variable se pueden ver en anexo 1.

La aplicación del método podría entenderse como la resume Cuesta [6], de la siguiente forma:

- Determinar los ciclos de trabajo y observar al trabajador durante varios de estos ciclos
- Determinar las tareas que se evaluarán y el tiempo de observación necesario (generalmente se hace coincidir con el tiempo de ciclo)

- Observar cada tarea y dar un valor a cada una de las seis variables de acuerdo con las escalas propuestas por el método
- Determinar el valor de los multiplicadores de la ecuación de acuerdo a los valores de cada variable
- Obtener el valor del JSI y determinar la existencia de riesgos

Luego de aplicar la metodología el valor del índice se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$JSI = IE \times DE \times EM \times HWP \times SW \times DD \quad (\text{Ecuación N}^\circ 1)$$

Así mismo, podemos evaluar los puestos de trabajo de acuerdo a la valoración de la puntuación obtenida, se realiza con base al siguiente criterio [6]:

- Valores de JSI inferiores o iguales a 3 indican que la tarea es probablemente segura.
- Puntuaciones superiores o iguales a 7 indican que la tarea es probablemente peligrosa.

2.4.2. MÉTODO REBA

Sue Hignett y Lynn McAtamney propusieron el método REBA (Rapid Entire Body Assessment) como una metodología de evaluación ergonómica de tareas, este fue publicado por la revista especializada Applied Ergonomics en el año 2000.

REBA es un método que facilita la evaluación de un puesto de trabajo en términos de las posturas asociadas a él. Analizando los miembros superiores como lo son: brazo, antebrazo, muñeca ; y estudiando además, la posición del tronco, el cuello y las piernas. Su utilización comprende posturas fijas y en movimiento.

Este método ha sido ampliamente utilizado, puede entenderse como una herramienta según Cuesta [6] que lo explica así:

“El método REBA es una herramienta de análisis postural especialmente sensible con las tareas que conllevan cambios inesperados de postura, como consecuencia normalmente de la manipulación de cargas. Su aplicación previene al evaluador sobre el riesgo de lesiones asociadas a una postura, principalmente de tipo músculo-esquelético, indicando en cada caso la urgencia con que se deberían aplicar acciones correctivas. Se trata, por tanto, de una herramienta útil para la prevención de riesgos capaz de alertar sobre condiciones de trabajo inadecuadas”.

2.4.2.1. Aplicación del método

La forma de aplicación del método se puede verificar [31] , pero su desarrollo podría entenderse como se resume a continuación:

- Separar el cuerpo en dos partes, grupo A (cuello, tronco y piernas) y grupo B (brazo, antebrazo y muñeca). Según las tablas de valoración asignar la puntuación; de acuerdo a la postura en el momento del desarrollo de la tarea, ver figura 1.
- Obtención de la puntuación inicial del grupo A, a partir de las puntuaciones individuales
- Obtención de la puntuación inicial del grupo B, a partir de las puntuaciones individuales
- Modificar las puntuaciones de A y B según la fuerza aplicada y el tipo de agarre
- De la puntuación final de grupo a y b obtener la puntuación C
- Por último se modifica de la "Puntuación C" según el tipo de actividad muscular desarrollada para la obtención de la puntuación final del método

Consulta del nivel de acción, riesgo y urgencia de la actuación correspondientes al valor final, como muestra la tabla 3.

Tabla 3. Niveles de puntuación REBA

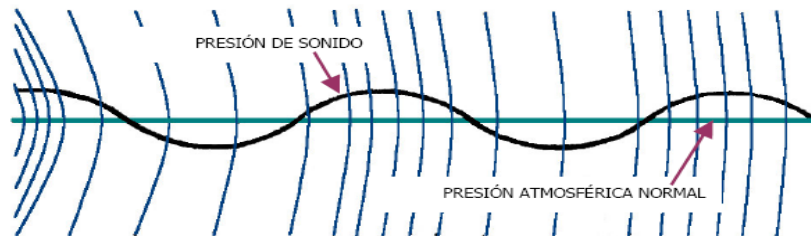
Puntuación Final	Nivel de acción	Nivel de Riesgo	Actuación
1	0	Inapreciable	No es necesaria actuación
2-3	1	Bajo	Puede ser necesaria la actuación.
4-7	2	Medio	Es necesaria la actuación.
8-10	3	Alto	Es necesaria la actuación cuanto antes.
11-15	4	Muy alto	Es necesaria la actuación de inmediato.

Fuente: [6]

2.5. RUIDO INDUSTRIAL

El ruido es un factor de riesgo (peligro) que se encuentra presente en muchos de los ambientes de producción. Como le explica el manual de Higiene Mapfre, “Desde el punto de vista físico el ruido se considera un movimiento ondulatorio producido en un medio elástico por una vibración. El desplazamiento complejo de las moléculas de aire se traduce en una sucesión de variaciones muy pequeñas e la presión, estas alteraciones de presión pueden percibirse por el oído humano y se denomina presión sonora” [32]. Ver figura 1.

Figura 1. Onda acústica aérea. Comportamiento ondulatorio y variaciones sobre la presión atmosférica.



Fuente: [32]

Por otro lado, también se considera ruido a todo sonido indeseable [32] que produce molestia o que puede afectar la salud y el bienestar de las personas. Dentro de los diferentes tipos de ruido [33] [34] están:

- Ruido continuo estable: Es aquel cuyo nivel de presión sonora permanece casi constante con fluctuaciones inferiores o iguales a dB(A) durante un periodo de medición de 1 minuto
- Ruido continuo fluctuante: Es aquel que presenta variaciones en los niveles de presión sonora mayores a 5 dB(A) durante un periodo de medición de 1 minuto.
- Ruido de impulso o impacto: Es aquel que presenta elevaciones bruscas del nivel de presión sonora de corta duración y que se producen con intervalos regulares o irregulares con tiempo entre pico y pico iguales o superiores a un segundo. Cuando los intervalos sucesivos son menores a un segundo, el ruido se considera como continuo.

2.5.1. Nivel de presión sonora

Para efecto del estudio y medición de ruido y su afectación al ser humano se han definido el nivel de presión sonora, el cual es 20 veces el logaritmo de base 10 de la relación entre una presión sonora determinada (p) y la presión sonora de referencia (P_0) [35].

$$db = 20 * \log \frac{P}{P_0} \quad \text{Ecuación N}^\circ 2$$

2.5.2. Unidades de medida del ruido

La Unidad en la que se expresa el nivel de presión sonora es el decibel, que es en general la relación entre dos valores de presión, tensión eléctrica, o potencia.

Análogamente lo podemos definir el decibelio como el valor relativo de una energía respecto a un valor de referencia, que se corresponde con el valor estadístico de la energía sonora mínima capaz de sensibilizar el oído humano, puede formularse mediante la siguiente expresión [35]

$$db = 10 * \log \frac{E}{E_0} \quad \text{Ecuación N}^\circ 3$$

Cuando se expresa de este modo se denomina **nivel** de energía, intensidad y/o presión sonora.

Según el reglamento técnico de ruido del ministerio de protección social, se puede entender como la Unidad de nivel o dimensional que denota la relación 10 veces el logaritmo base 10 entre una cantidad medida y una cantidad de referencia. El

decibelio es la décima parte del belio y se utiliza para describir niveles de intensidad, de potencia y de presión sonora, el símbolo es dB.

De acuerdo al comportamiento del oído humano en las curvas de igual sensación sonora, se han establecido diferentes escalas de ponderación para decibels [35].

Los tipos de decibeles que existen son:

DECIBEL A: Unidad del nivel sonoro en el cual se expresan habitualmente los resultados de las mediciones de ruido con fines legales o para determinación de riesgo auditivo.

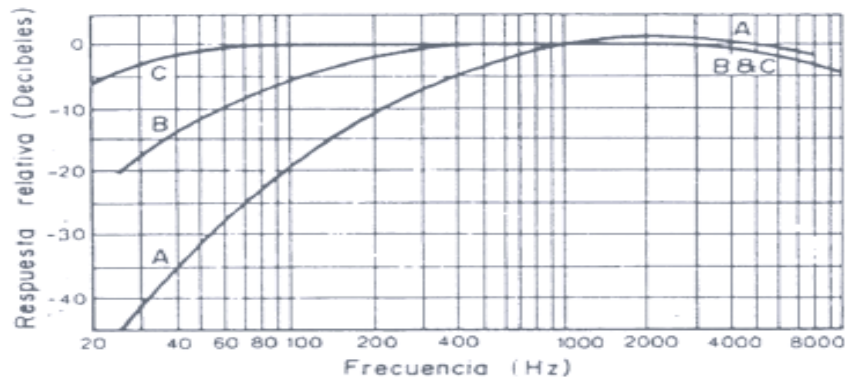
DECIBEL B: Representa atenuación para niveles intermedios

DECIBEL C: Unidad de nivel sonoro utilizada para algunas mediciones de ruido impulsivo o en aquellos casos en que se requiere una aproximación del nivel de presión sonora. También permite, en conjunción con la medición en **dB_A**, deducir si un determinado ruido tiene predominio de bajas frecuencias.

DECIBEL D: Representa atenuación para niveles muy altos por encima de 120 dB.

Las diferentes atenuaciones de cada escala se muestran a continuación, ver figura 2.

Figura 2. **Atenuación para las escalas de ponderación A, B y C**



Fuente: Manual de higiene industrial. FUNDACIÓN MANPFRE 1991.

2.5.3. DOSIS DE RUIDO

Es la energía sonora recibida por el oído durante un periodo de tiempo determinado. Está dada en función del producto del nivel sonoro en dB(A) y el periodo de exposición a dicho nivel.

El nivel máximo admisible para ruidos de carácter continuo en los lugares de trabajo, será el de 85 decibeles de presión sonora, medidos en la zona en que el Trabajador habitualmente mantiene su cabeza, el cual será independiente de la Frecuencia (ciclos por segundo o Hertz). (Resolución 2400 del 79)

De acuerdo con el criterio NIOSH el máximo tiempo de duración a la exposición al ruido T_j para la tarea j puede ser calculada por al siguiente expresión [29]:

$$T_j = \frac{8}{2^{(L_j - 85)/3}}$$

Ecuación N°4

Donde L_j representa el nivel de ruido en la tarea j en db(A).

Para evaluar la exposición del ruido y la duración de la exposición del trabajador a cada nivel de ruido L_j , este debe ser medido en términos de dosis de exposición D_j para cada nivel de ruido en un tiempo T_j , la cual se calcula mediante la siguiente expresión [29]:

Ecuación N°5

$$D_j = \frac{C_j}{T_j}$$

La dosis total de exposición D para un día entero de trabajo se calcula con la suma de todas las dosis parciales a las que estuvo expuesto el trabajador durante el día, a través de la siguiente fórmula:

Ecuación N°6

$$D = 100 * \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{T_j}$$

En el cual n es el número de tareas ejecutadas. Una vez el total de la dosis ha sido calculada entonces se calcula el TWA como se muestra a continuación:

Ecuación N°7

$$TWA = 10 * \log \frac{D}{100} + 85$$

El resultado es comparado con el criterio NIOSH de 85 dB para un máximo de 8 horas.

2.5.4. TEMPERATURA INDUSTRIAL

La temperatura industrial es un factor de riesgo físico, que puede ser entendido mediante la asociación de la falta de confort térmico en un puesto de trabajo. Se puede establecer que el ambiente térmico es un conjunto de factores (temperatura, humedad, actividad del trabajo, etc.) que caracteriza los diferentes puestos de trabajo [33] [32]

Este factor es evaluado por medio de muchos índice, entre ellos tenemos el índice WBGT que alerta acerca de los límites de exposición para el ambiente térmico. Como advierte la norma técnica de prevención 322 [36], el índice WBGT se presenta como criterio internacional por la ISO 7243; se utiliza por su sencillez para discriminar rápidamente si es o no admisible la situación de riesgo de estrés térmico, aunque su cálculo permite a menudo tomar decisiones, en cuanto a las posibles medidas preventivas que hay que aplicar.

2.5.5. Metodología del índice WBGT

Para calcular el índice WBGT se requiere medir una serie de parámetros [33] [32] como son:

- La temperatura de globo TG
- La temperatura húmeda natural THN.
- La temperatura seca del aire, TA.
- La velocidad del aire

Al obtener los datos o parámetros, se procede a utilizar una de las siguientes ecuaciones según sea el lugar de trabajo:

Ecuación N°8

$$WBGT = 0.7 THN + 0.3 TG (I)$$

(En el interior de edificaciones o en el exterior, sin radiación solar)

Ecuación N°8

$$WBGT = 0.7 THN + 0.2 TG + 0.1 TA \text{ (II)}$$

(En exteriores con radiación solar)

Posterior al proceso de cálculo, los valores encontrados se comparan con los máximos permisibles establecidos por la ACGIH en los TLV's. En la tabla 4 se pueden apreciar estos límites:

Tabla 4. Criterios para la exposición a estrés térmico (WBGT)

Distribución de Trabajo en un Ciclo de Trabajo y Recuperación	Persona Aclimatada				Persona no Aclimatada			
	Ligero	Moderado	Pesado	Muy pesado	Ligero	Moderado	Pesado	Muy pesado
100% Trabajo Continuo	31.0	28.0	-	-	28.0	25.0	-	-
75% trabajo y 25% descanso.	31.0	29.0	27.5	-	28.5	26.0	24.0	-
50 % Trabajo y 50% descanso.	32.0	30.0	29.0	28.0	29.5	27.0	25.5	24.5
25% trabajo y 75% descanso	32.5	31.5	30.5	30.0	30.0	29.0	28.0	27.0

Fuente: "TLVs and BEIs", edición 2014.

2.6. METAHEURÍSTICAS

2.6.1. Enjambre de abejas

La Optimización por Enjambre de Partículas o PSO (por su sigla en inglés, Particle Swarm Optimization) es una técnica de optimización desarrollada por Kennedy y Eberhart (1995). El concepto original consistía en una simulación de un sistema social, intentando simular gráficamente el vuelo de una bandada de aves [3] [37] . No obstante dicha técnica desde su desarrollo ha ido cambiando constantemente y siendo aplicada en muchos lugares y trabajos [38] . Al ser una técnica evolutiva, es similar al Algoritmo Genético (GA) debido a que su inicialización se da de forma aleatoria, sin embargo difiere de esta debido a que a cada solución potencial le es asignada una velocidad aleatoria, y las soluciones potenciales, llamadas partículas, “vuelan” a través del espacio de soluciones.

El PSO es un sistema multi-agente. Las partículas son agentes simples que se mueven por el espacio de búsqueda [39]. Cada partícula mantiene el historial de las coordenadas de su trayectoria en el espacio de soluciones asociándolas con la mejor solución alcanzada hasta el momento por cada una de las partículas, llamada *pbest*. Otro valor almacenado es el mejor valor general, y su ubicación, obtenido hasta el momento por cualquiera de las partículas perteneciente al enjambre, llamado *gbest*. Este último incluido en una adaptación mejorada del PSO llamada versión global de PSO. En el algoritmo, las partículas son arrastradas cambiando su velocidad hacia las ubicaciones de *pbest* y *gbest*, pero además las partículas vuelan arrastradas por su propia inercia, evitando atascarse en óptimos locales y explorando un mayor espacio de soluciones.

En PSO, se empieza con una población (enjambre) de partículas. La dimensión y la velocidad de una partícula i en un espacio de búsqueda con d dimensiones pueden ser representadas como $X_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,d}]$ y $V_i = [v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d}]$ respectivamente.

Entonces, conociendo el $pbest$ y $gbest$, la nueva velocidad de las partículas es calculada con la siguiente fórmula:

$$v_{i,j}(t + 1) = \omega * v_{i,j}(t) + c_1 * r_1 * (pbest_{i,j} - x_{i,j}(t)) + c_2 * r_2 * (gbest_{i,j} - x_{i,j}(t))$$

Donde j , representa las d dimensiones de la partícula, r_1 y r_2 son dos números aleatorios independientes uniformemente distribuidos en el intervalo de $[0,1]$. Luego se actualiza la posición de la partícula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$x_{i,j}(t + 1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t + 1)$$

La función de la velocidad está compuesta por tres partes. La primera parte es el impulso anterior con el que se viene moviendo la partícula, también conocido como *inercia*. La segunda parte es la parte *cognitiva* que representa el aprendizaje o el conocimiento independiente de la propia partícula debido a su propia experiencia. Y la tercera parte es la parte *social*, que representa el aprendizaje grupal del enjambre.

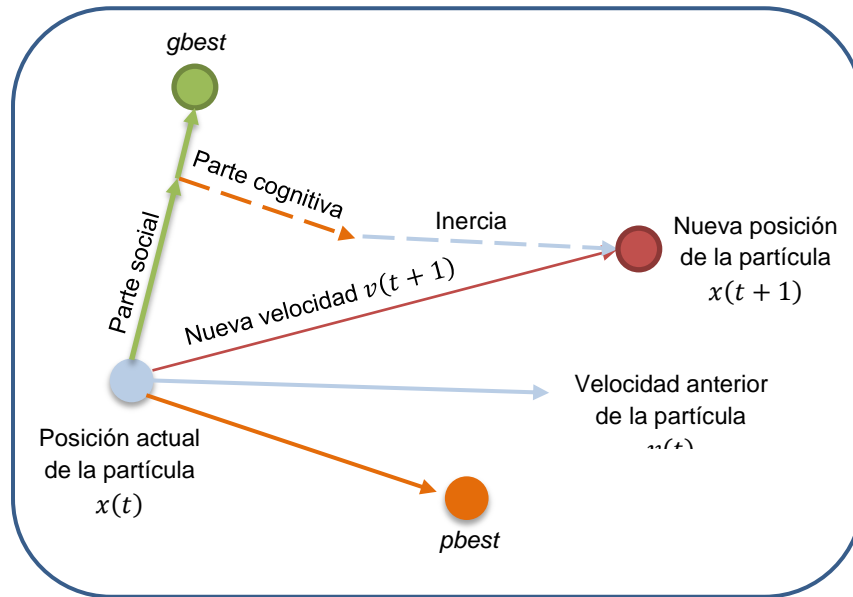
Cada parte de la ecuación de velocidad está ponderada por un factor. El factor inercial ω , el factor cognitivo c_1 que influencia la partícula en dirección de la posición de $pbest$ y el factor social c_2 que influencia la partícula en dirección de la posición de $gbest$.

El valor de $v_{i,j}$ para las dimensiones binarias de las partículas puede ser limitado por los valores $Vmin$ y $Vmax$ para evitar que la partícula vuele hacia zonas no útiles del espacio de soluciones. A esta operación se le denomina, *recuperación de partículas* y se realiza de la siguiente manera:

$$v_{i,j}(t + 1) = \begin{cases} Vmax, & \text{si } v_{i,j}(t + 1) > Vmax \\ v_{i,j}(t + 1), & \text{si } Vmin \leq v_{i,j} \leq Vmax \\ Vmin, & \text{si } v_{i,j}(t + 1) < Vmin \end{cases}$$

La actualización de la posición de la partícula se puede ver en la siguiente figura:

Ilustración 1. Actualización de posición de las partículas en PSO



Fuente: Autores

Los parámetros del algoritmo son los siguientes:

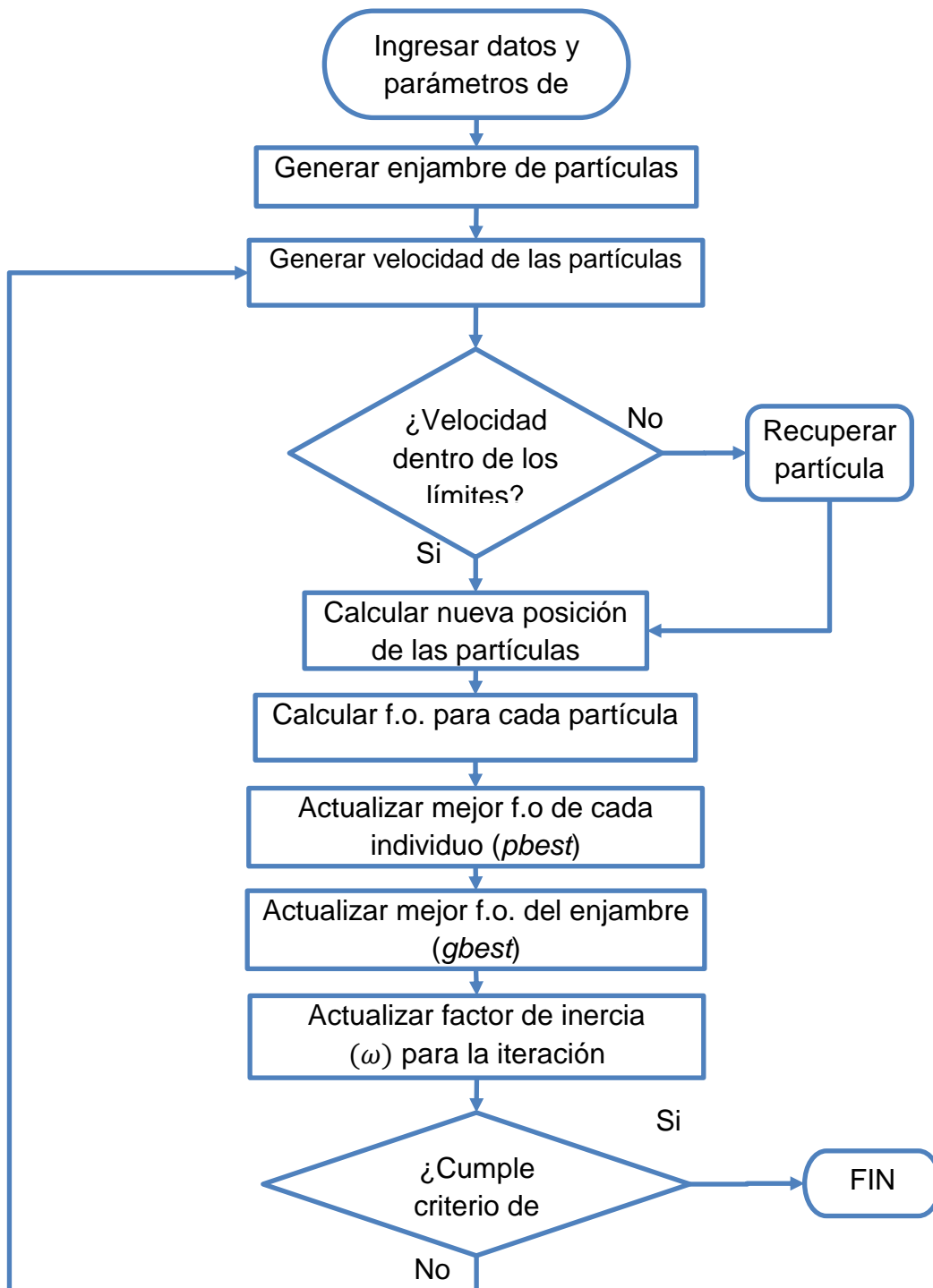
Tabla 5. Parámetros enjambre de abejas

SIMBOLOGÍA DEL PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN DEL PARÁMETRO
<i>Pob</i>	Tamaño de la nube
<i>Iter</i>	Número máximo de iteraciones
<i>c1</i>	Componente cognitivo
<i>c2</i>	Componente social
<i>wmax</i> <i>wmin</i>	Factor inercial inicial y final

Fuente: Autor

La estructura del algoritmo de Optimización por Enjambre de Partículas programado se puede ver en la siguiente figura.

Ilustración 2. Enjambre de Abejas



Fuente: autor

Tipo de representación para el problema JRSP: En el algoritmo PSO se utiliza un encoding real, donde cada partícula es un vector solución con valores comprendidos entre 0 y 1, su ordenamiento de forma ascendente representa el orden en que la rotación.

Tamaño de la nube de partículas: el tamaño de la nube *pob* representa el número de individuos o de partículas que se generan para buscar los vectores soluciones en el campo de búsqueda. Para definir el tamaño de la nube se debe tener en cuenta que no sea demasiado grande para no afectar tanto el costo computacional ni demasiado pequeño para que cubran más el campo de búsqueda.

Nube de partículas: los valores iniciales de las partículas se generaron al azar, mediante un Random Key.

Fitness: Para saber si un agente se está acercando o alejando de la solución hace falta una función de *fitness* que nos ofrezca una manera de cuantificar su adecuación al medio, su proximidad a la solución

Valores de actitud: Almacenan los valores de adaptación o adecuación de las partículas en su posición actual. El *pbest* almacena el mejor *fitness* para cada partícula, mientras que el *gbest* representa el mejor *fitness* para la nube.

Velocidad de la partícula: Cada agente se debe mover de manera individual en cada una de las dimensiones del espacio como si fuese una abeja en un enjambre.

El vector velocidad de cada partícula es modificado en cada iteración utilizando la velocidad anterior, un componente cognitivo *c1* y un componente social *c2*.

Factor inercial: Para conseguir un buen funcionamiento y eficiencia del algoritmo PSO, el valor de la velocidad no debe llegar a ser muy grande durante la ejecución. Limitando la velocidad máxima de cada vector velocidad (*vmáx*) y

reduciendo gradualmente su valor se consigue mejorar el rendimiento del algoritmo. El control del vector de la velocidad se puede realizar mediante el ajuste dinámico del factor de inercia. El factor inercia w se puede ir reduciendo progresivamente en cada iteración aplicando la siguiente ecuación:

Condiciones de fronteras: para limitar el campo de búsqueda y evitar que una partícula se salga de este, se puede utilizar tres tipos de fronteras [10]:

- Paredes absorbentes: Cuando un agente golpea, en alguna dimensión, una frontera del espacio de trabajo, la velocidad de la partícula en esa dimensión se hace cero simulando el efecto de una pared que absorbe la energía de los agentes que tratan de escapar del espacio en esa dimensión.
- Paredes reflectantes: Esta vez lo que se hace es cambiar el signo de la velocidad en la dimensión en la que se ha encontrado con la frontera, de manera que el agente queda siempre dentro del espacio de búsqueda de solución.
- Paredes invisibles: Los agentes son libres para volar sin restricciones. A cambio, para los agentes que se salgan del espacio de trabajo, no se evaluará su función de fitness, que suele ser lo más costoso en la mayoría de problemas de ingeniería.

Condición de parada: Para la condición de parada se realizarán un número determinado de iteraciones *iter*, y cuando estas se cumplan se detendrá el algoritmo.

2.6.2. Algoritmo Genético

Los algoritmos evolutivos son métodos robustos de búsqueda, que permite tratar problemas de optimización donde el objetivo es encontrar un conjunto de parámetros que maximizan o minimizan una función de adaptación. Estos algoritmos operan con una población de individuos $P(t) = \{x_1^t, \dots, x_n^t\}$, para la iteración t , donde cada individuo x_i representa un punto de búsqueda en el espacio de las soluciones potenciales a un problema dado. El desempeño de un individuo x_i se evalúa según la función de adaptación $f(x_i)$. Esta función permite ordenar del mejor al peor individuo de la población en un continuo de grados de adaptación.

La población inicial evoluciona sucesivamente hacia mejores regiones del espacio de búsqueda mediante procesos probabilísticos de selección de individuos más aptos en la población y la modificación por recombinación.

Para encontrar óptimos globales, los algoritmos de optimización hacen uso de dos técnicas: explorar áreas desconocidas en el espacio de búsqueda y explorar el conocimiento obtenido de puntos previamente evaluados. Los algoritmos evolutivos combinan ambas técnicas de un modo eficiente [40].

Los algoritmos genéticos presentan una propuesta eficaz motivada en la observación de que la evolución natural ha sido extraordinariamente exitosa en desarrollar especies complejas y bien adaptadas por medio de un mecanismo simple. La técnica emula la evolución natural para explorar con eficiencia el espacio de búsqueda con el supuesto de que unos individuos con ciertas características son aptos para sobrevivir y transmiten estas características a su descendencia.

Los algoritmos genéticos operan sobre una población o conjunto de soluciones representadas como cadenas binarias o cromosomas. Durante la ejecución, el algoritmo cruza los individuos de mayor aptitud para renovar la población y elimina

los de menor aptitud. Al final, el cromosoma de mayor aptitud es la solución al problema. Algunos conceptos básicos son:

- Cromosoma. Cadena binaria que representa un individuo o solución, donde cada elemento en la cadena se conoce como gen.
- Población. Conjunto finito de cromosomas.
- Aptitud. Criterio que evalúa la calidad de un cromosoma. A mayor aptitud, mejor la solución y mayor la probabilidad de que sobreviva y transmita sus características a su descendencia.

Las operaciones más usadas en este proceso de búsqueda son:

- Cruce. Operación por medio de la cual se producen nuevos descendientes a partir de dos cromosomas padre seleccionados al azar.
- Mutación. En esta operación se seleccionan al azar y se cambian uno o más genes en el cromosoma; ocurre con probabilidades muy bajas.

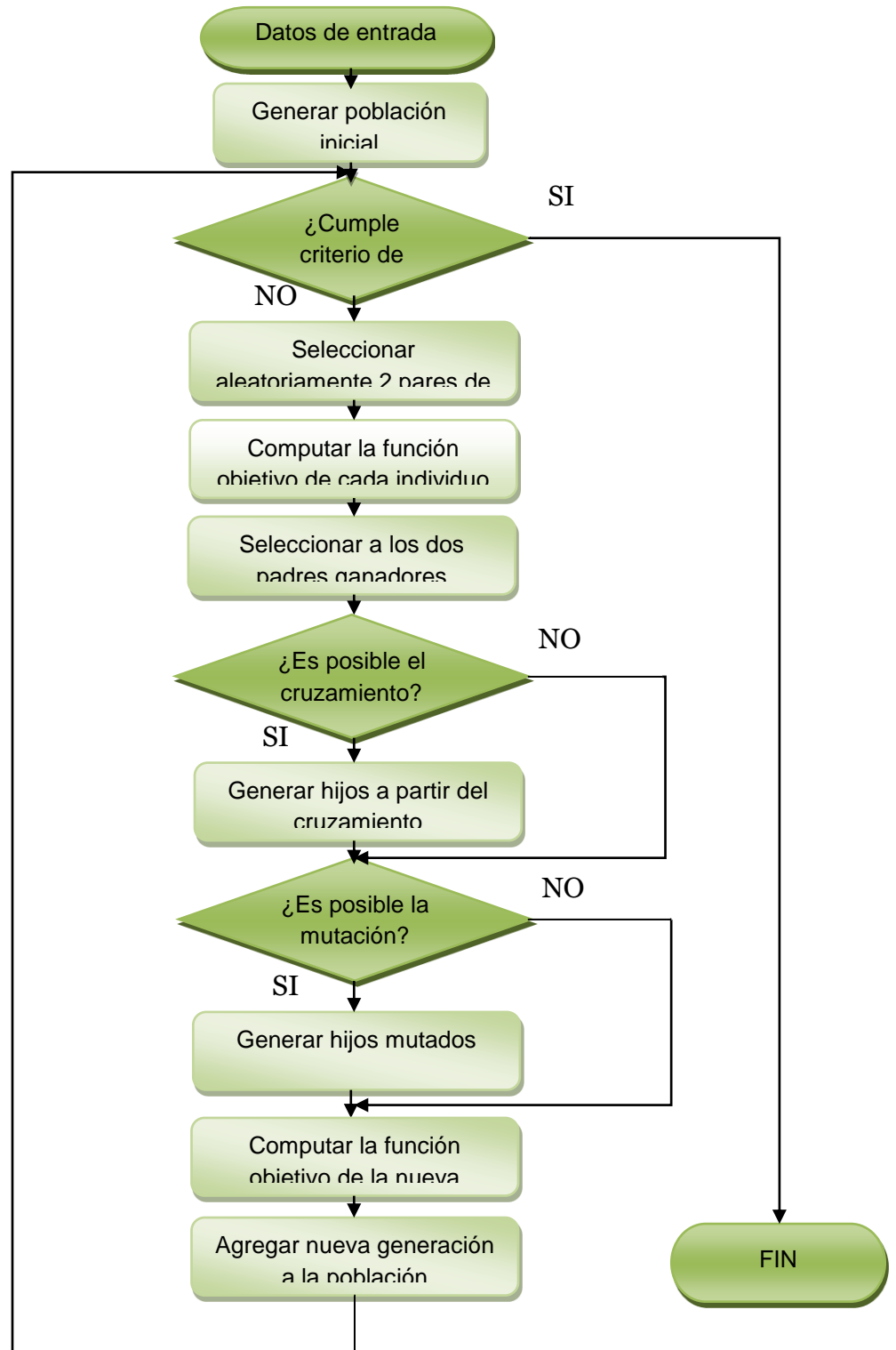
Luego de la aparición de los algoritmos genéticos han surgido iniciativas que continúan explorando la idea de imitar el proceso de evolución natural. Estas propuestas reciben el nombre de algoritmos evolutivos y constituyen un campo de investigación más amplio [41].

Los parámetros del algoritmo son los siguientes:

Tabla 6. **Parámetros Algoritmo Genético**

<i>Iter</i>	Numero de iteraciones
<i>pob</i>	Tamaño de la población inicial
<i>pc</i>	Probabilidad de cruzamiento
<i>pm</i>	Probabilidad de mutación

Ilustración 3. Diagrama de bloques del algoritmo genético



Fuente: El Autor

2.7. Optimización Multiobjetivo

Los problemas de optimización del mundo real frecuentemente incluyen objetivos múltiples en conflicto. Una solución a tal problema generalmente es un arreglo que comprende los diferentes objetivos, dado que no es posible encontrar una solución ideal para todos los objetivos en forma simultánea. Por ejemplo, una firma de diseño de productos puede desear maximizar el rendimiento de un dispositivo mientras que también intenta minimizar el costo de producción. Típicamente, estos dos objetivos no se pueden alcanzar con una sola solución, por lo que, ajustando diversos parámetros de diseño, la compañía puede buscar qué combinaciones de esos dos objetivos son posibles, dado un conjunto de restricciones (por ejemplo, requerimientos legales y tamaño límite del producto) [42].

Un problema de optimización multi-objetivo puede ser formulado mediante un vector objetivo f y un conjunto correspondiente de variables de decisión x . Sin pérdida de generalidad se puede considerar la minimización de todos los objetivos considerados:

$$\text{Min } f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)) \in F$$

$$\text{Donde } x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X$$

Además $X \in \mathbb{R}^n$ es el espacio de interés n -dimensional y $F \in \mathbb{R}^m$ es el espacio objetivo m dimensional. En el caso (que es el más común) que no exista un solo punto común x en el que $f(x)$ alcance su óptimo, se utiliza como concepto de optimalidad; **el Óptimo de Pareto** basado en la relación de dominancia, una solución x_1 domina a una solución x_2 en X ($x_1 > x_2$) si se satisfacen las dos condiciones siguientes:

$$x_1 > x_2 \text{ si } \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}: f_i(x_1) \leq f_i(x_2)$$

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, m\}: f_j(x_1) < f_j(x_2)$$

La solución x_1 se dice que es indiferente a una solución x_2 , si ninguna de ellas domina a la otra. Cuando no hay una preferencia definida a priori entre los objetivos, la dominancia es el único camino para determinar si una solución se desempeña mejor que otra. Las mejores soluciones en un problema multi-objetivo están dadas por el óptimo global de Pareto lo cual representa el subconjunto no dominado de todas las soluciones factibles. La imagen de este subconjunto se conoce como *Frente de Pareto*.

El Frente de Pareto para un problema de optimización Multiobjetivo $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ y un conjunto de Pareto \mathbf{P}^* , el frente de Pareto \mathbf{FP} se define como:

$$\mathbf{FP}^* = \{\mathbf{u} = \mathbf{F} = (f_1(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})) \mid \mathbf{x} \in \mathbf{P}^*\}.$$

Dadas las definiciones anteriores, en especial el concepto de dominancia de Pareto, podemos darnos cuenta que en sí, al final, con el Frente de Pareto estamos encontrando el conjunto de vectores que satisfacen las restricciones dadas (pertenecen al conjunto factible), pero que además son no dominados (en cuanto a la operación de minimizar), por lo que son los valores de mínimo valor en las funciones objetivo [43].

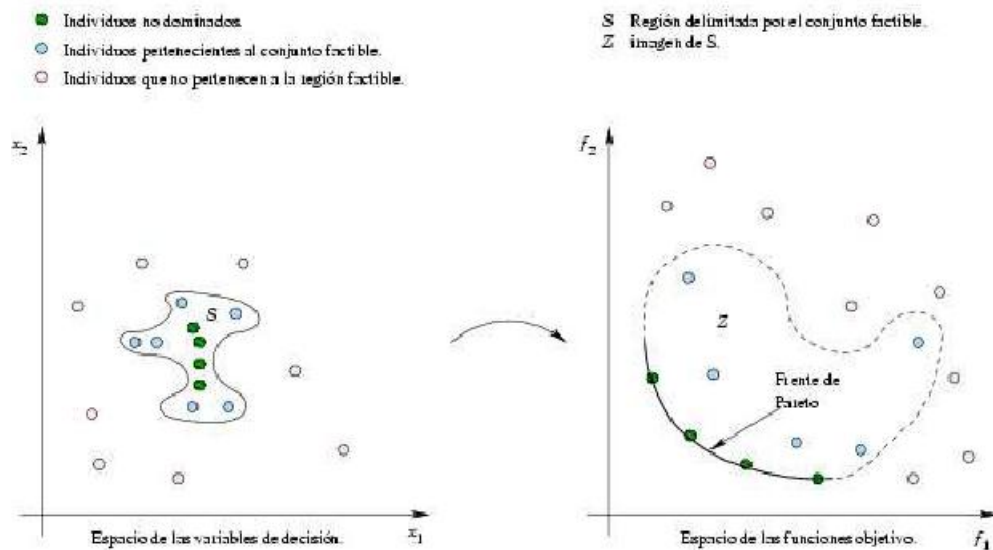
A continuación se presentan algunos conceptos, que facilitarán la comprensión del concepto de Optimalidad de Pareto:

Suponga un problema con m funciones objetivos $f_i(x), i = 1, 2, \dots, m$, las cuales deben ser minimizadas.

- Dominancia de Pareto: Se dice que una solución x domina a una solución y (denotado como $x \preceq y$) sí y sólo si $\forall_i \in \{1, 2, 3, \dots, m\}: f_i(x) \leq f_i(y) \wedge \exists_i \in \{1, 2, 3, \dots, m\}: f_i(x) < f_i(y)$. Es decir, se dice que la solución x domina a la solución y si x es menor o igual a y en todos los objetivos, y estrictamente menor en al menos uno de ellos.

- Óptimos de Pareto: Se dice que x es una solución óptima de Pareto sí y solo si $\nexists y: y \preceq x$. Es decir, la solución x es óptima de Pareto si no existe ninguna otra solución que la domine.
- Conjunto Óptimo de Pareto: Es el conjunto PS de todas las soluciones óptimas de Pareto. $PS = \{x | \nexists y: y \preceq x\}$. Éste conjunto abarca todas las soluciones que no son dominadas por ninguna otra. Cabe anotar, que las soluciones que pertenecen a este conjunto tampoco son dominadas entre sí, por lo cual se llaman soluciones no dominadas y conforman el conjunto de mejores soluciones al problema.
- Frontera de Pareto: Es el conjunto PF de los valores de las funciones objetivo de todas las soluciones óptimas de Pareto. $PF = \{F(x) = [f(x_1, x_2, \dots, x_m)] | x \in PS\}$. [44]

Figura 3. Frontera de Pareto



En la imagen de la izquierda se observan las soluciones óptimas de Pareto (verdes), y en la derecha se observa la Frontera de Pareto. La primera

corresponde al espacio de las variables de decisión, mientras que la segunda corresponde al espacio de las funciones objetivos.

2.7.1. Métrica de comparación para frentes de Pareto

La mayor parte de las métricas actuales presuponen que PF true (Pareto real) se conoce (o se puede determinar en un tiempo razonable). Si ese es el caso, podemos probar el desempeño de un algoritmo multiobjetivo comparando los frentes de Pareto producidos por nuestro algoritmo con respecto al frente verdadero y determinar a partir de eso ciertas medidas de error que indiquen la efectividad del algoritmo analizado. Esa es la premisa de la métricas tasas de error

2.7.2. Métrica Tasa de Error

Esta métrica fue propuesta por [45] para indicar el porcentaje de soluciones (de PFcurrent) que no son miembros de PFtrue:

$$ER = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n},$$

Donde n es el número de vectores en PFcurrent; $e_i = 0$ si el vector i es un miembro de PFtrue, y $e_i = 1$ de lo contrario.

2.8. ESTADO DEL ARTE

Actualmente el creciente interés de las organizaciones por el bienestar laboral [46] e integral de los trabajadores está obligando a los actuales gerentes a redefinir sus políticas laborales en pro de la construcción de entornos laborales más “humanos” que prioricen la satisfacción de las necesidades específicas demandadas en cada puesto de trabajo de forma conjunta con el logro de buenos estándares de producción, en este sentido, se deben orientar esfuerzos hacia el diseño de puestos de trabajo que se adapten a las necesidades específicas de los trabajadores debido a que muchas veces se encuentran expuestos a altos niveles de riesgos físicos, ergonómicos, químicos, psicosociales, biológicos, eléctricos y/o biomecánicas, entre otros, que en lo posible deben ser controlados o eliminados. Una forma práctica y eficiente de disminuir estos niveles de exposición sin reducir la jornada laboral, es la asignación de un operario determinado a la ejecución de una tarea específica en un periodo de tiempo establecido, el cual no necesariamente corresponde al tiempo de ciclo de la tarea asignada, es decir, que si el operario no logra culminar la tarea en el tiempo establecido otro operario será asignado (rotado) para tal fin, reduciendo con ello el tiempo de exposición del operario inicial al riesgo específico de ese puesto de trabajo, este método es conocido como “rotación de puestos de trabajo.”

El modelo cuantitativo más representativo para la rotación o asignación de trabajadores a los puestos de trabajo es el modelo de asignación tradicional propuesto por Pinedo [47], utilizado durante mucho tiempo en numerosas aplicaciones de programación. El problema de asignación de este modelo tiene por objeto asignar un número determinado de trabajadores a un conjunto determinado de tareas al mismo tiempo tratando de optimizar algunos criterios. Por tanto, la planificación de la mano de obra mediante la rotación de puestos de trabajo se debe desarrollar teniendo en cuenta los criterios de seguridad y productividad [36], así como de rentabilidad de las tareas [25], los puestos se

deben evaluar en base a las habilidades de los trabajadores y los tiempos de inactividad asociados a las actividades específicas que se desarrollan en estos, con el objetivo de crear calendarios seguros de rotación de puestos de trabajo [48]. En lo posible se deben diseñar programas de rotación orientados a reducir todo tipo de riesgos, como por ejemplo; los riesgos asociados a lesiones por tareas de levantamiento manual de cargas [49] y [50] altos niveles de exposición a factores físicos como el ruido [51], la tensión y la posibilidad de lesiones de espalda baja [52], a través del índice de severidad JSI [53], trastornos musculoesqueléticos [54], [55], [56], [57], [58], [59], la vibración o cambios extremos de temperatura, entre otros. En aras de mejorar estas condiciones laborales indeseables [60], proponen un modelo de rotación que además de reducir las lesiones de espalda baja disminuye los niveles de exposición de los trabajadores al ruido a través de la variación de la dosis diaria de ruido (DND).

Los programas de rotación de puestos de trabajo además de reducir y/o prevenir niveles de exposición a factores de riesgos físicos [61], también pueden ser aplicados para afrontar factores psicológicos y características humanas comunes como el estrés, el síndrome de burnout y el aburrimiento, entre otras. En este orden de ideas [62], proponen un modelo de rotación de puesto orientado a disminuir el nivel de aburrimiento asociado a la ejecución repetitiva de tareas durante largos periodos de tiempo y determinar un estado de equilibrio entre los costos de asignación y esta característica, apoyados en este trabajo [63] determinan el costo de aburrimiento mediante la introducción del aburrimiento funcional y disfuncional ocasionado por la similitud de los trabajos asignados, con el fin de reducir los costos de asignación de mano de obra y de aburrimiento. También surge una metodología para la rotación de puestos en los sistemas de fabricación con el objetivo de aliviar el aburrimiento de los empleados y aprovechar el efecto de los intervalos de rotación de los trabajadores en las habilidades de aprendizaje [64], posteriormente se desarrolló un programa para facilitar las labores de planificación de tareas, mediante la combinación de un

modelo de rotación de trabajo con un método de asignación de tareas enfocado en reducir el aburrimiento y la fatiga mental de los trabajadores [65], que además sugiere descansos cortos después de la realización de una tarea y el aprendizaje de nuevas habilidades.

Además de los grandes beneficios obtenidos con la rotación de puestos [66], la aplicación de los programas de rotación contribuyen a mejorar la asignación de trabajos al proporcionar al empleador información sobre las habilidades de los empleados y sobre los factores específicos no relacionados con el empleado en los puestos de trabajo [67].

Gracias a las continuas investigaciones desarrolladas y a novedosas herramientas informáticas se ha podido abordar el tema desde otras perspectivas mediante el diseño y la aplicación de algoritmos que contribuyen a la generación de soluciones eficientes. Unos de los pioneros en apoyar sus investigaciones en estas técnicas fueron [27], quienes utilizaron la programación entera y un algoritmo genético para desarrollar programas de rotación con el objetivo de encontrar métodos para incorporar criterios de seguridad que redujeran el nivel de riesgo de los trabajadores basados en el índice de severidad de empleo (JSI) para la prevención de lesiones de espalda.

[68], abordan el problema de la rotación de puestos empleando algoritmo genéticos para disminuir el riesgo de trastornos musculoesqueléticos en los trabajadores. Por su parte [69] y [28] propone equilibrar la carga física de los trabajadores a través del modelo propuesto por [58], aplicando el algoritmo de colonia de hormigas y recocido simulado con el fin de buscar una mejor calidad de repuesta, y para equilibrar la programación de la rotación en el trabajo y el nivel de riesgo ergonómico [70], emplean un método heurístico denominada "smoothing heuristic", el cual integra métodos de solución para el cálculo eficiente de resultados. [71] propone reducir el potencial de lesiones de los trabajadores y proporcionar una buena estimación de los índices de severidad del empleo (JSI), a

través de un método de programación entera teniendo en cuenta el tipo de tarea y la hora para la determinación de una rotación adecuada de trabajo.

Por su parte [72], utilizó un algoritmo de búsqueda inteligente basado en la web en la que implementó un método para que los ingenieros de producción puedan representar una línea de montaje, es necesario considerar las características que requieren los operarios para desarrollar las actividades y las tareas a realizar para cada producto, con el fin de generar programas de rotación [73] y [74] aplican una encuesta para determinar los beneficios y limitaciones que tiene la rotación de puestos en algunas empresas de los Estados Unidos.

La adopción de programas de rotación de puestos de trabajo encuentra su principal detractor en los arraigados y comunes sistemas de especialización laboral. Las organizaciones no sólo deben considerar los beneficios para la gestión de trabajos, sino también ajustarse de acuerdo a los cambios tecnológicos y ambientales que garanticen la satisfacción laboral de sus empleados [75], se deben contraponer estos sistemas para abordar las cuestiones relacionadas con factores como el agotamiento de los empleados [76], los efectos colaterales que genera la rotación de puestos de trabajo, las implicaciones más amplias y los posibles efectos indeseables que pueden producir en los trabajadores [77], muchas veces implícitos en las tareas de producción, como la fatiga de los empleados, la calidad del producto, los costos presentes en la ejecución de tareas monótonas y la influencia que tiene para la empresa [78], con el fin de definir el sistema que mejor se adapte al entorno específico de cada tipo de organización o sistema productivo, es aquí donde entra en consideración el análisis de diversos elementos como los indicadores ergonómicos y software para evaluar por ejemplo los trastornos musculo – esqueléticos [79], [80] la fatiga, [81] y [82], el aumento de la capacidad de trabajo [83], que genera a los empleados la variabilidad de tareas debido a la rotación de puestos [84] y [85], y los niveles de riesgos asociados a la adopción de posturas de las extremidades superiores [86], [87], [88], dado que no se trata simplemente de implementar un método determinado, si no de realizar un

análisis detallado de las condiciones reales de la organización, sus características, necesidades y cultura corporativa, así mismo se deberán evaluar las estrategias, herramientas y métodos alternantes que brinden solución a las necesidades detectadas, para en ese sentido determinar el sistema que resulte más eficaz para el logro de los objetivos trazados, al respecto [89], presenta un resumen de las prácticas de rotación de puestos de trabajo, los beneficios individuales y organizacionales, los posibles costos asociados con la rotación de puestos y las implicaciones para los profesionales.

La planificación de la rotación de puestos de trabajo genera muchas ventajas competitivas a las organizaciones, pero es muy complejo determinar el efecto generados a los trabajadores en los puestos de forma específica, debido a que muchas veces las tareas son desarrolladas por empleados con perfiles diferentes y en entornos cuyas tareas poseen exigencias no evaluadas, pero es posible disminuir el índice de severidad del empleo (JSI) de forma considerable mediante la generación de programas eficientes de rotación equilibrada de puestos de trabajo [72]. La rotación permite conocer las fortalezas y debilidades de los trabajadores, motivarlos de manera que disminuya nivel el aburrimiento y aumente el rendimiento en las tareas asignadas [90] y contribuye a mejorar la capacidad individual de resolver problemas, aprendiendo de forma rápida y olvidando lentamente la ejecución de otras tareas realizadas [91].

Aunque la programación de la rotación de puestos es una técnica que ofrece grandes beneficios a las organizaciones, son muy pocas las empresas que lo han implementado, tal vez por desconocimiento o por el grado de complejidad que demanda el modelo específico requerido. Uno de estos casos fue desarrollado por [92], quienes realizaron un estudio a trabajadores de una empresa prestadora del servicio de aseo mostrando que la rotación de puestos es una medida eficaz para disminuir los niveles de carga física y mental de los trabajadores. [26] Planteó que la práctica de la rotación en el trabajo afecta la actitud de los empleados hacia su trabajo, utilizando datos obtenidos a partir de algunas empresas de Taiwán, y

pone en relieve los importantes efectos de la rotación de puestos en la satisfacción laboral de los empleados y la evaluación de la capacitación. Por su parte Maija [93] propone programas de rotación en el campo medico como requisito esencial para los puestos de enfermería y estrategia de compromiso organizacional respectivamente.

Así después de esta revisión de la literatura, surge el siguiente interrogante: ¿Cuál será el modelo matemático que genera agendas de rotación de puestos de trabajo que al mismo tiempo disminuya la exposición a factores de riesgo en los trabajadores?

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de la investigación

Este estudio es descriptivo en la medida en que se desea estudiar el problema de rotación de puestos de trabajo a través del desarrollo de una modelación matemática utilizando como objetivos la optimización de varias funciones, es decir, se trabaja y modela el problema JRSP desde el punto de vista Multiobjetivo, teniendo en cuenta el riesgo musculoesqueléticos y los riesgos físicos. Asi mismo podemos decir que fue cuantitativo experimental porque relaciona la utilización de un modelo matemático y metaheurística en la solución del problema. Es decir, mide como influye la utilización de una metaheurística en la respuesta

La investigación consta de dos partes, en la primera se desarrolla el modelo matemático y se valida con parámetros de una empresa real, luego se soluciona con la utilización de modelo matemático y metaheurística, posteriormente se compara las respuestas a través del desarrollo de frente de Pareto real.

En la segunda parte se crean instancias más grandes a partir de los datos recogidos y se soluciona el modelo utilizando solo metaheurística para luego comparar las soluciones en el frente de Pareto real.

3.2. Formulación del modelo matemático

Luego de la revisión literaria realizada en torno al estado del arte y a los aspectos teóricos y conceptuales de la rotación, se desarrolló el siguiente modelo matemático para la rotación de puesto de trabajo.

El modelo que se presenta tiene 5 objetivos, lo que lo convierte en un modelo global y genérico para la rotación de puesto de trabajo y gestión de los riesgos industriales que giran en torno a los factores físicos y ergonómicos.

3.2.1. Función objetivo

El modelo es Multiobjetivo y cuenta con la unión de 5 funciones. Se quiere minimizar el índice que mide la carga postural (*Minimizar reba*), minimizar el índice que mide la carga por movimientos repetitivos (*Minimizar JSI*), minimizar la dosis máxima de ruido (*DmaxR*), minimizar la dosis máxima de temperatura (*DmaxT*) y a la vez maximizar los luxes en el puesto de trabajo (*Dminlx*).

Objetivos

Minimizar Reba

Minimizar JSI

Minimizar DmaxR

Minimizar DmaxT

Maximizar Dminlx

3.2.2. Variables

Las variables que vincula el modelo son:

$X_{i,j,k}$: 1 si el trabajador i realiza la tarea j en la rotación k en el día t

$reba$: : Máximo índice de carga postural

jsi : Máximo índice de movimientos repetitivos

$DmaxR$: Dosis máxima de ruido del trabajador i en el periodo t

$Dmax T$: Dosis máxima de Temperatura del trabajador i en el periodo t

$Dmin Lx$: Dosis mínima de luxes del trabajador i en el periodo t

3.2.3. Índices

Las diversas restricciones se mueven según los siguientes conjuntos:

i : Índice que muestra el tipo trabajador

j : Índice que muestra el tipo de trabajo

k : Índice que muestra la rotación o turno en la jornada

3.2.4. Parámetros

Los valores conocidos modelos que están presentes en las ecuaciones son:

$Cjsi_i$: Costo económico movimiento repetitivo

$Creba_i$: Costo económico carga postural

$Cjsi_i$: Costo económico

D_j : Dosis de ruido del puesto de trabajo

A : Números de turno en la rotación

T_j : Valor de la temperatura del trabajo

Lx_j : Valor de los luxes en el puesto de trabajo

3.2.5. Sistema de restricciones

El modelo matemático está sujeto a las siguientes ecuaciones

Restricción 1: Asegura que cada trabajador realice solo una tarea en cada rotación

$$\sum_j^J \sum_k^K X_{i,j,k} = 1 \quad \forall i \quad (1)$$

Restricción 2: Asegura que cada tarea sea realizada por un solo trabajador en el turno

$$\sum_i^I \sum_k^K X_{i,j,k} = 1 \quad \forall j \quad (1)$$

Restricción 3: Considera la carga de postural por el trabajo

$$\sum_j^J \sum_k^K X_{i,j,k} \cdot (Creba_j) \leq Reba \quad \forall i \quad (3)$$

Restricción 4: Considera la carga por movimiento repetitivo del trabajo

$$\sum_j^J \sum_k^K X_{i,j,k} \cdot (Cjsi_j) \leq JSI \quad \forall i \quad (4)$$

Restricción 5: Asegura que $DmaxR$ es la máxima dosis diaria de ruido en un trabajador el periodo de trabajo

$$DmaxR \geq \sum_j^J \sum_k^K \frac{x_{i,j,k} \cdot 8}{D_j \cdot A} \quad \forall i, \quad (5)$$

Restricción 6: Según la recomendación de NIOSH la dosis diaria total del ruido máximo a la cual un trabajador puede exponerse es igual a 1.

$$DmaxR \leq 1 \quad (6)$$

Restricción 7.: Asegura que $DmaxT$ es el máximo valor de la temperatura en un trabajador en el periodo de trabajo

$$\sum_j^J \sum_k^K X_{i,j,k} \cdot (T_j) \leq DmaxT \quad \forall i \quad (7)$$

Restricción 8: Asegura que $Dminlx$ es el mínimo valor de luxes en un trabajador en el periodo de trabajo

$$\sum_j^J \sum_k^K X_{i,j,k} \cdot (Lx_j) \geq Dminlx \quad \forall i \quad (8)$$

3.3. MODELO MATEMÁTICO JRSP MULTI OBJETIVO MIP

En resumen el modelo matemático MIP (Programación Entera Mixta) que se propone para representar el problema JRSP Multiobjetivo que reduce el riesgo musculoesquelético y la exposición a riesgos físicos, es el que se muestra a continuación:

Objetivos

Minimizar Reba

Minimizar JSI

Minimizar DmaxR

Minimizar DmaxT

Maximizar Dminlx

Sujeto a

$$\sum_j^J \sum_k^K X_{i,j,k} = 1 \quad \forall i, t, d \quad (1)$$

$$\sum_i^I \sum_k^K X_{i,j,k} = 1 \quad \forall j \quad (1)$$

$$\sum_j^J \sum_k^K X_{i,j,k} \cdot (Creba_j) \leq Reba \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_j^J \sum_k^K X_{i,j,k} \cdot (Cjsi_j) \leq JSI \quad \forall i \quad (4)$$

$$DmaxR \geq \sum_j^J \sum_k^K \frac{x_{i,j,k} \cdot 8}{D_j \cdot A} \quad \forall i, \quad (5)$$

$$DmaxR \leq 1 \quad (6)$$

$$\sum_j^J \sum_k^K X_{i,j,k} \cdot (T_j) \leq DmaxT \quad \forall i \quad (7)$$

$$\sum_j^J \sum_k^K X_{i,j,k} \cdot (Lx_j) \geq Dminlx \quad \forall i \quad (8)$$

Con $X_{i,j,k}$: 1 si el trabajador i realiza la tarea j en la rotación k ; 0 de lo contrario

$$JSI \geq 0$$

$$DmaxR \geq 0$$

$$DmaxT \geq 0$$

$$Dminlx \geq 0$$

3.3.1 Justificación de las variables del modelo

El modelo matemático como se ve cuenta con 5 objetivos, dos de ellos de índole ergonómica y 3 de ellos pertenecientes al riesgo físico. Es un modelo con espacio de solución combinatorio de $i \times j \times k$ variables.

La variable de índole ergonómico Reba, es ampliamente manejada en estudios ergonómicos, Es uno de los métodos más utilizados por los ergónomos para la evaluación de la carga postural [4] . En la tesis doctoral de Sabina Asensio-Cuesta [6] propone como trabajo futuro el incluir este indicador en la generación de rotaciones. Entre sus ventajas se tiene que amplía la evaluación a los miembros inferiores [31], a la vez permite el análisis conjunto de las posiciones adoptadas por los miembros superiores del cuerpo (brazo, antebrazo, muñeca), del tronco, del cuello y de las piernas.

Por otra parte el jsi (job Strain Index) es un método de evaluación de puestos de trabajo que permite valorar si los trabajadores que los ocupan están expuestos a desarrollar desórdenes traumáticos acumulativos en la parte distal de las extremidades superiores debido a movimientos repetitivos, en el recorrido teórico planteado en el estado del arte, se observa que son pocos los modelos de rotación que plantea evaluar los movimiento repetitivos, aun cuando en diferentes estudios se ha establecido que deben vincularse otros factores a la planeación de las rotaciones. Los movimientos repetitivos se convierten entonces en una gran oportunidad y aporte para los modelos de rotación, de tal forma que en [5] [7] se propone como métodos válidos para clasificar los puestos para su secuenciación en agendas de rotación, el método JSI.

De los riesgos físicos planteado, el ruido es el factor más utilizado, la mayoría de modelos multicriterio lo utilizan debido a que este factor se presenta con seguridad en la mayoría de configuraciones empresariales con riesgo a la salud. Por su parte la temperatura y los luxes son factores pocos estudiado que interviene de manera

significativas en los ambientes de trabajo, pero que han sido poco trabajados en la modelación de rotaciones lo que los expone como oportunidades investigativas que estudian la parte de la energía lumínica y térmica de los factores de riesgo.

3.4. Metodología para la solución del problema MULTIOBJETIVO

Dado que el modelo presenta cinco funciones (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5) objetivo se linealiza utilizando alfas para crear una sola función objetivo que tenga en cuenta todo el sistema de restricción del problema. De la siguiente manera:

$$\text{Función objetivo} = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3 + \alpha_4 f_4 + \alpha_5 f_5$$

Donde

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 = 1$$

Se desarrollaron 1001 alfas como se muestra en el anexo 2. Lo que significa que para el frente de Pareto se deben estudiar las 1001 soluciones de los modelos.

La suma de las variables estando en medidas diferentes podemos denominarla como índice o nivel de riesgo

El modelo de rotación fue desarrollado, utilizando la herramienta CPLEX integrada a GAMS (General Algebraic Modeling System), utilizando un equipo con procesador Intel(R) Core (TM)2 Duo CPU E4400 2.00 GHz, 1.00 GB de RAM, Sistema Operativo Windows 7 Ultimate de 32 bits y disco duro de 70 GB.

3.5. Obtención de parámetros de validación para el modelo matemático

Para realizar la validación del modelo matemático se toman instancias del problema en una empresa real, los datos se obtiene de informes técnicos realizados por su ARL y los restantes por datos recogidos observación directa y

medios audiovisuales con la metodología REBA y JSI ; para los riesgos ergonómicos.

La variable ruido, temperatura y luxes se obtienen a partir de los siguientes estudios:

Variable	Estudio	Año
Ruido	ARP – SURA	2012
Temperatura	ARP – SURA	2012
Luxes	QUALITY (O.H.S S.A.S)	2012

Estos informes técnicos fueron aportados por la empresa a el grupo investigador, dado que la empresa solicito no hacerlos públicos, no se encuentran contenidos en los anexos.

Por otra parte los índices REBA y JSI fueron tomados de acuerdo a la siguiente metodología:

1. Se sistematizo la metodología de cálculo de los índices Reba y Jsi
2. Se seleccionaron los puesto objetos de rotación
3. Se realizó una lista de las hora de la jornadas de trabajo (por periodos de observación de 10 minutos)
4. Se realizó una lista de los trabajadores y puestos de trabajo
5. De forma aleatoria se asignó el orden de revisión para cada puesto de trabajo de acuerdo a la hora programada y el puesto a observar
6. En cada visita a cada puesto de trabajo se realizaba registro fotográfico, registro fílmico y utilización de la plantilla sistematizada de cada método
7. Se tabularon los datos y se encontraron los valores para cada índice

Al final se obtuvieron los siguientes parámetros:

Tabla 7. Parámetros de validación del modelo

Puesto de trabajo		Valores para los riesgos físicos y ergonómicos				
Nº	Nombre	Reba	jsi	ruido	Temp	Luxes
1	CNC 001-MC	12	1	88,1	30	347
2	TORNO CW o 280c	11	3	85,8	30	347
3	FRENTE AL COMPRESOR ENTRADA	4	1	81,1	30	2500
4	PULIDO DISCO DE 5"	6	1	90	30	327
5	PULIDO DISCO DE 7"	7	1	91,5	30	327
6	MH 601 -M-C	11	3	80,6	30	347
7	CENTRO DE MECANIZADO CNC-	10	3	81,7	30	347
8	TORNO CDS6250C	12	3	86,4	30	327
9	TORNO CNC HM 104 MC	13	1	81,1	30	327
10	FRESADORA MH 104 MC	10	3	86,4	31,17	280
11	PATIO CEPILLO	6	1	81,1	30	2500
12	SOLDADURA	7	1	81,1	31,99	467
13	ALMACEN PRENSA HIDRAULICA	8	0,25	81,1	30	214

Fuente: valores dados por la empresa, la tabla es elaboración propia

El parámetro ruido es la medición db(a) ambiental, se le debe realizar la respectiva reducción de acuerdo al EPP utilizado por los trabajadores, en dado caso en la empresa el tapón de inserción presenta 33 db de reducción, por lo que la tabla de parámetros queda de la siguiente manera:

El cálculo de la protección auditiva, se realiza siguiendo el criterio NIOSH según la Guía de Atención Integral Basada en la Evidencia para Hipoacusia Neurosensorial Inducida por Ruido en el Lugar de Trabajo (GATI-HNIR) [34] de la siguiente manera:

1. Identificar el nivel de presión acústica del puesto de trabajo.
2. Identificar el NRR (tasa de reducción de ruido) de los protectores auditivos
3. Identificar el tipo de protector auditivo, clasificando estos en protectores tipo copa, de inserción y cualquier otro tipo, así como su porcentaje de reducción del 25%, 50% y 70% respectivamente.

4. Restar a el NRR siete decibeles para obtener el NRR corregido
5. Restar al NRR corregido el NRR corregido multiplicado por el porcentaje de reducción según el tipo de protector auditivo.
6. Restar al nivel de presión acústica el valor del ítem 5 para calcular el nivel percibido por el trabajador.
7. En caso de que el trabajador tenga doble protección auditiva se debe seleccionar el que tenga menor valor de presión acústica.

Tabla 8. Parámetros de validación del modelo con reducción en el parámetro ruido.

Puesto de trabajo		Valores para los riesgo físicos y ergonómicos				
N°	Nombre	REBA	JSI	ruido	Temp	Luxes
1	CNC 001-MC	12	1	78,6	30	347
2	TORNO CW o 280c	11	3	76,3	30	347
3	COMPRESOR ENTRADA	4	1	71,6	30	2500
4	PULIDO DISCO DE 5"	6	1	80,5	30	327
5	PULIDO DISCO DE 7"	7	1	82	30	327
6	MH 601 -M-C	11	3	71,1	30	347
7	CENTRO DE MECANIZADO	10	3	72,2	30	347
8	TORNO CDS6250C	12	3	76,9	30	327
9	TORNO CNC HM 104 MC	13	1	71,6	30	327
10	FRESADORA MH 104 MC	10	3	76,9	31,17	280
11	PATIO CEPILLO	6	1	71,6	30	2500
12	SOLDADURA	7	1	71,6	31,99	467
13	ALMACEN PRENSA HIDRAULICA	8	0,25	71,6	30	214

Fuente: autor

3.6. Instancias de validación del modelo

Para validar el modelo y estudiar el comportamiento de las variables del problema, este se solucionara utilizando la tabla de datos anterior, pero además se resolvió con las siguientes combinaciones:

Tabla 9. Instancias de validación del problema

	Turnos	N° trabajadores
Instancia de validación 1	2	13
Instancia de validación 2	3	13
Instancia de validación 3	4	13

Fuente: el autor

Estas combinaciones se propone en la presente investigación con el fin de comparar el comportamiento de los factores de riesgo a medida que se aumenta el número de turno, se llegan a 4 turnos, dado que en la realidad es complejo planificar agendas de más de 4 rotaciones como la advierte Tharmmaphornphilas [51],

3.7. Instancias y obtención de datos para las corridas experimentales

Para estudiar el comportamiento del modelo y comparar las respuestas de las metaheurísticas programadas se desarrollaron instancias experimentales, con el fin de estudiar la actuación del modelo para instancias grandes y evaluar de igual forma el funcionamiento de la metaheurística PSO.

Se utilizó la distribución uniforme para generar grupos de datos a partir de los valores ya indicados, dado que como se mencionó anteriormente, estos fueron entregados por la empresa, y no hay suficientes datos para estudiar a qué tipo de distribución de probabilidad pertenecen. Es por ello que se elige para desarrollar las instancias experimentales, la distribución uniforme. Esta distribución presenta dos parámetros (a y b) que son el máximo y el mínimo de los rangos donde se distribuirá aleatoriamente las variables, de modo que los parámetros a y b para cada variable del modelo fueron tomados de la tabla:

Máximos y mínimos de los parámetros de validación

VARIABLE	PARÁMETRO (A) MÁXIMO	PARÁMETRO (B) MÍNIMO
Ruido	82 db(a)	71.1 db(a)
Reba	12	4
Jsi	0.25	3
Temperatura	30	32
Luxes	2500	214

Fuente: el autor.

Las tablas de parámetros para las corridas experimentales, se obtuvieron mediante la generación aleatoria según una distribución de probabilidad uniforme, tomando con insumos la tabla de valores originales obtenidos en la empresa. Ver anexo 3. Teniéndolos valores que se muestran en los anexo 4, 5, 6,7, se procedió a desarrollar las instancias experimentales para el modelo, las cuales incluyen una combinación de números de trabajadores y cantidad de turnos, como se muestra en la tabla:

Tabla 10. Instancias de experimentación del problema

	Turnos	Número de trabajadores
Instancia experimental 1	15	2
Instancia experimental 2	15	3
Instancia experimental 3	15	4
Instancia experimental 4	20	2
Instancia experimental 5	20	3
Instancia experimental 6	20	4
Instancia experimental 7	25	2
Instancia experimental 8	25	3
Instancia experimental 9	25	4
Instancia experimental 10	30	2
Instancia experimental 11	30	3
Instancia experimental 12	30	4

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Para realizar la validación del modelo matemático se toman instancias del problema estipuladas en el **anexo 3**. El modelo de rotación fue desarrollado, utilizando la herramienta CPLEX integrada a GAMS (General Algebraic Modeling System), la programación se puede ver en el **anexo 11**.

Dado que en la literatura no se encuentran problemas que aborden la optimización del mismo problema, se resolvieron los 1001 modelos según los alfas descritos y se encontró el frente de Pareto para cada instancia. Cada modelo se ejecutó en un tiempo de 30 minutos, dando como resultado un tiempo máximo posible de 20,834 días. (Debido a la duración máxima esperada era muy larga, se dividió el problema en 5 computadores reduciendo a 1/5 el tiempo total de computo). Los resultados obtenidos con la implementación del modelo se muestran a continuación

Frente Pareto instancia de validación 1.

Luego de resolver el problema con la tabla de parámetros dada y para dos rotaciones, se encontró el siguiente frente de Pareto, el cual muestra los valores de las funciones objetivos para cada solución no dominada:

Tabla 11. Frente Pareto instancia validación 1

DOSIS RUIDO	JSI	REBA	LUXES (lx)	TEMPERATURA (c°)
0,275976184	6	25	674	61,99
0,316985841	6	22	674	61,99
0,363965311	6	23	674	61,99
0,363965311	6	22	674	61,99
0,363965311	6	22	674	61,99
0,363965311	6	22	674	61,99
0,363965311	6	22	674	61,99
0,363965311	6	22	674	61,99

DOSIS RUIDO	JSI	REBA	LUXES (lx)	TEMPERATURA (c°)
0,270146411	4	24	674	61,99
0,270146411	4	24	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,270146411	6	20	494	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	63,16
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,270146411	6	20	494	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	63,16
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,270146411	6	20	494	61,99
0,270146411	6	20	494	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,270146411	4	25	674	61,99
0,270146411	4	24	674	61,99
0,270146401	4	24	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,270146411	6	20	494	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,270146411	6	20	494	61,99
0,270146411	6	20	494	61,99
0,275976184	4	24	674	61,99

DOSIS RUIDO	JSI	REBA	LUXES (lx)	TEMPERATURA (c°)
0,275976184	4	24	674	61,99
0,275976184	4	25	674	61,99
0,363965311	4	22	494	61,99
0,363965311	6	22	674	61,99
0,270146411	4	24	674	61,99
0,270146411	4	24	674	61,99
0,290742006	4	23	674	61,99
0,290742006	4	23	674	61,99
0,270146411	4	22	494	61,99
0,270146411	4	24	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,270146411	6	20	494	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,290742006	6	22	674	61,99
0,270146411	4	24	674	61,99
0,270146411	4	24	674	61,99
0,270146411	4	24	674	61,99
0,290742006	4	23	674	61,99
0,270146411	4	25	674	61,99
0,270146411	4	24	674	63,16

Al solucionar los 1001 modelos en Gams, se estudiaron las repuestas utilizando un algoritmo de dominancia y no dominancia en Matlab, con él se encontraron 68 soluciones no dominadas óptimas. Las soluciones dadas por el modelo Matemático, fueron probadas, encontrándose que el modelo realmente ofrecía esquema de rotaciones validos con los datos ingresados.

Frente Pareto instancia de validación 2

Al de resolver el problema con la tabla de parámetros dada y para tres rotaciones, se encontró el siguiente frente de Pareto, el cual muestra los valores de las funciones objetivos para cada solución no dominada:

Tabla 12. Frente Pareto instancia validación 2

DOSIS RUIDO	JSI	REBA	LUXES (lx)	TEMPERATURA (c°)
0,348409	9	33	1041	91,99
0,23304	7	28	1021	91,99
0,228641	7	28	1021	91,99
0,196818	9	33	1041	91,99
0,196818	9	33	1041	93,16
0,196818	9	33	1041	91,99
0,197415	7	28	1041	91,99
0,213806	7	30	841	91,99
0,196818	9	33	1041	91,99
0,197415	7	28	1041	91,99
0,197415	7	28	1021	91,99
0,196818	9	34	1041	91,99
0,197415	7	28	1021	91,99
0,195173	7	28	841	91,99
0,195173	7	28	841	91,99
0,196818	9	33	1041	91,99
0,196818	9	33	1041	91,99
0,262622	7	30	841	91,99
0,299594	9	33	1041	91,99
0,269262	7	29	841	91,99
0,346764	7	28	841	91,99
0,348409	9	33	1041	91,99
0,257719	7	28	1021	91,99
0,257719	7	28	1021	91,99
0,196818	9	33	1041	91,99
0,196818	9	33	1041	91,99
0,197415	7	28	1021	91,99
0,195173	7	28	1021	91,99
0,196818	9	33	1041	91,99
0,196818	6,25	37	841	91,99
0,195173	7	28	841	91,99
0,195173	6,25	29	841	91,99
0,195173	7	28	841	93,16
0,348409	6,25	29	841	91,99
0,335815	6,25	29	841	91,99
0,195173	6,25	35	841	93,16

Luego de solucionar los 1001 modelos en Gams, se estudiaron las repuestas utilizando un algoritmo de dominancia y no dominancia en Matlab, con él se encontraron 36 soluciones no dominadas óptimas. Las soluciones dadas por el modelo Matemático, fueron probadas, encontrándose que el modelo realmente ofrecía esquema de rotaciones validos con los datos ingresados.

Frente Pareto instancia de validación 3

Después de resolver el problema con la tabla de parámetros dada y para cuatro rotaciones, se encontró el siguiente frente de Pareto, el cual muestra los valores de las funciones objetivos para cada solución no dominada

Tabla 13. Frente Pareto instancia validación 3

DOSIS RUIDO	JSI	REBA	LUXES (lx)	TEMPERATURA (c°)
0,203293	10	45	1388	121,99
0,29978	10	44	1388	121,99
0,27138	12	40	1388	121,99
0,276472	12	40	1388	121,99
0,263168	12	40	1388	121,99
0,318289	12	40	1388	122,34
0,203293	10	36	1368	121,99
0,263168	12	40	1388	123,16
0,263168	10	36	821	122,34
0,157687	10	44	1388	121,99
0,157687	12	40	1388	121,99
0,157687	10	43	1388	121,99
0,179873	12	40	1388	121,99
0,186087	10	36	1368	121,99
0,208273	8	36	821	123,98
0,157687	10	44	1388	121,99
0,157687	10	44	1388	121,99
0,157687	12	40	1388	123,16
0,157687	12	40	1388	121,99
0,157687	12	40	1388	121,99
0,184853	10	36	1368	123,51

0,157687	10	44	1388	121,99
0,15892	12	40	1388	121,99
0,157687	10	44	1388	121,99
0,157687	12	44	1388	121,99
0,157687	12	40	1388	123,16
0,157687	10	45	1388	121,99
0,157687	12	40	1388	123,16
0,182788	10	36	821	122,34
0,272614	8	46	1388	122,34
0,234768	8	46	1388	121,99
0,27138	8	44	1388	123,98

DOSIS RUIDO	JSI	REBA	LUXES (lx)	TEMPERATURA (c°)
0,206278	10	36	1368	121,99
0,204596	10	36	1368	123,16
0,159368	8	46	1388	121,99
0,226557	8	43	821	121,99
0,186087	10	36	1368	121,99
0,263168	10	36	821	121,99
0,186087	10	36	1368	123,16
0,157687	10	42	1388	121,99
0,186087	8	41	821	121,99
0,190171	8	38	821	121,99
0,15892	10	37	1368	123,98
0,204596	8	36	821	123,16
0,157687	12	40	1388	123,16
0,326947	8	36	821	121,99
0,15892	8	44	1388	121,99
0,261935	8	36	821	122,34
0,159368	8	46	1388	121,99
0,157687	10	42	1388	123,16
0,157687	10	42	1388	121,99
0,157687	12	40	1388	123,16
0,186087	8	42	821	121,99
0,15892	8	37	821	123,16
0,160602	8	36	821	123,98
0,203363	8	46	1388	121,99
0,203293	8	46	1388	121,99
0,27138	8	45	1388	121,99

0,29978	8	46	1388	121,99
0,272458	8	43	821	121,99
0,186087	10	42	1388	121,99
0,263168	10	42	1388	121,99
0,208273	12	40	1388	121,99
0,195151	10	36	1368	121,99
0,285355	8	36	821	123,16
0,159368	8	46	1388	121,99
0,157687	8	44	1388	121,99
0,157687	8	44	1388	122,34
0,157687	8	44	1388	122,34
0,157687	8	44	1388	123,16

DOSIS RUIDO	JSI	REBA	LUXES (lx)	TEMPERATURA (c°)
0,157687	8	37	821	121,99
0,263168	8	44	1388	121,99
0,190171	10	36	1368	121,99
0,176642	8	36	821	121,99
0,226557	8	44	1388	121,99
0,231763	10	36	1388	123,16
0,171347	8	38	1388	122,34
0,166681	8	36	821	122,34
0,166681	8	36	821	122,34
0,166681	8	36	821	122,34
0,345456	8	36	821	121,99
0,190171	8	38	1388	121,99
0,15892	8	37	821	121,99
0,157687	8	49	821	123,16
0,226782	8	36	821	123,98

Luego de solucionar los 1001 modelos en Gams, se estudiaron las repuestas utilizando un algoritmo de dominancia y no dominancia en Matlab, con él se encontraron 85 soluciones no dominadas óptimas. Las soluciones dadas por el modelo Matemático, fueron probadas, encontrándose que el modelo realmente ofrecía esquema de rotaciones validos con los datos ingresados.

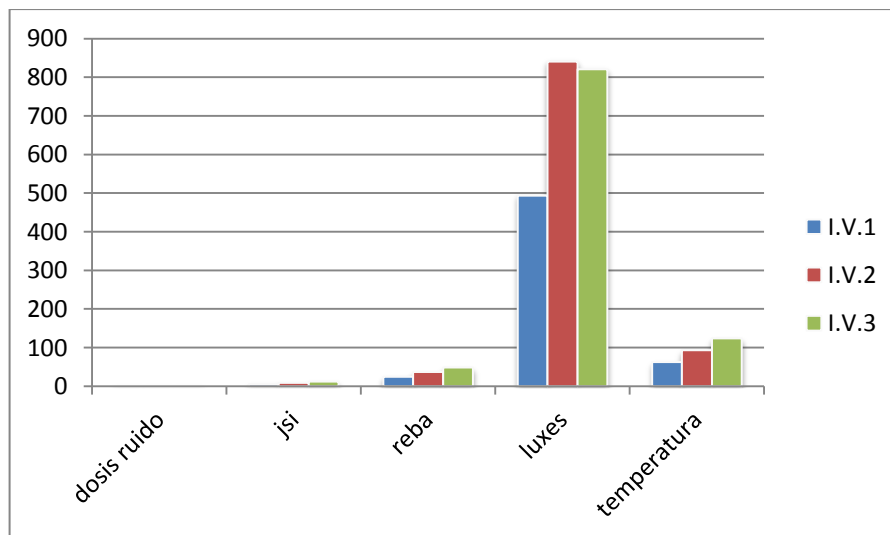
4.2. Comportamiento de las variables del problema con respecto a las instancias de validación

Es de interés describir el comportamiento de las variables de los problemas en término de su aumento o decremento según las instancias del modelo, para tal efecto de los frentes de Pareto se obtuvieron los máximos o mínimos de las variables según sea el caso y se verifico su tendencia como se muestra:

Tabla 14. Comportamientos de las variables del modelo a validar

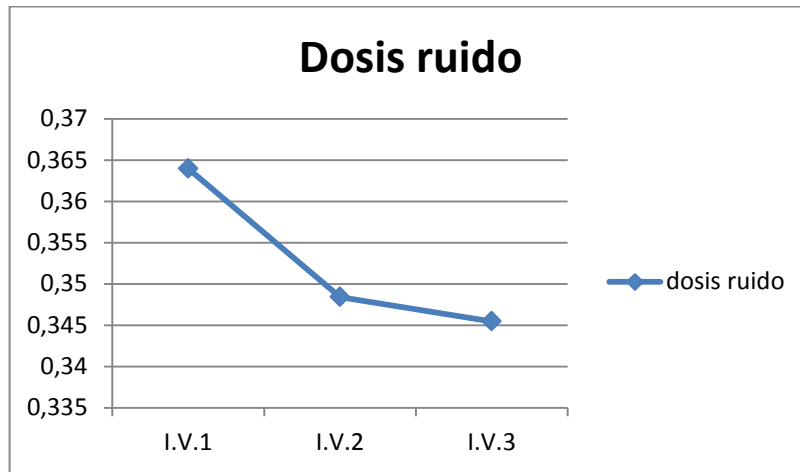
	I.V.1	I.V.2	I.V.3
Dosis ruido	0,36396531	0,34840905	0,34545592
JSI	6	9	12
REBA	25	37	49
Luxes	494	841	821
Temperatura	63,16	93,16	123,98

Figura 4. Comportamiento de las variables



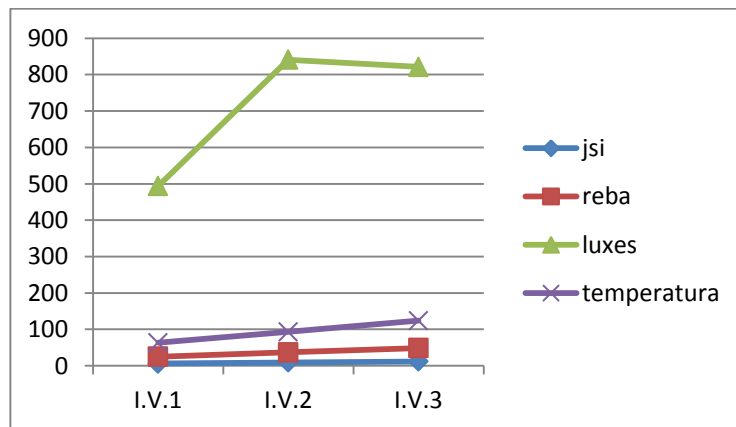
En el grafico no se observa la dosis de ruido debido a la escala, pero de la tabla de valores se puede observar como la dosis disminuye a medida que se aumenta el número de rotaciones como se muestra en la siguiente ilustración

Figura 5. Comportamiento de dosis ruido



Las demás variables muestran un aumento en su valor, hecho que se deba a que los trabajos son acumulativos, lo que quiere decir que el valor de cada índice es la suma de las exposiciones en cada rotación, importando entonces que el valor promedio de cada uno, el cual fue favorable. El comportamiento de las variable, JSI, REBA; LUXES; TEMPERATURA, se muestra en la siguiente ilustración

Figura 6. Comportamiento de JSI, REBA; luxes; temperatura



4.3. Obtención de la agenda por medio de la metaheurística PSO

La meta heurística PSO para el problema en cuestión se programa bajo un encode real ver anexo 11, donde el decimal representa el orden de la tarea, expresado de la siguiente manera.

Ejemplo Encode PSO

0,13	0,53	0,52	0,45	0,21	0,72	0,38	0,14	0,49	0,63	0,72	0,31	0,33	0,74	0,12	0,11
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Rotaciones

Turno 1				Turno 2				Turno 3				Turno 4			
Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 2	Tarea 1	Tarea 3	Tarea 4	Tarea 3	Tarea 2	Tarea 1	Tarea 4	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 4	Tarea 3

Transforma el encode real a puestos de trabajo

1	4	3	2	2	4	3	1	2	3	4	1	3	4	2	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Agenda de rotación

Trabajador	Turno 1	Turno 2	Turno 3	Turno 4
1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 1
2	Tarea 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 2
3	Tarea 3	Tarea 3	Tarea 1	Tarea 4
4	Tarea 4	Tarea 4	Tarea 4	Tarea 3

Trabajador	Turno 1	Turno 2	Turno 3	Turno 4
1	1	2	2	3
2	4	4	3	4
3	3	3	4	2
4	2	1	1	1

Factor velocidad

$$v_i^t = w_i^t \times v_i^{t-1} + c1 \times rand \times (pospbest_i - x_i^{t-1}) + c2 \times rand \times (posgbest_i - x_i^{t-1})$$

0,071	0,052	0,499	0,073	0,092	0,738	0,036	0,116	0,207	0,037	0,240	0,004	0,352	0,026	0,091	0,030
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Nueva posición

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \forall i = 1, 2, \dots, pob$$

0,13	0,53	0,52	0,45	0,21	0,72	0,38	0,14	0,49	0,63	0,72	0,31	0,12	0,74	0,33	0,11
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------



0,071	0,052	0,499	0,073	0,092	0,738	0,036	0,116	0,207	0,037	0,240	0,004	0,352	0,026	0,091	0,030
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------



0,201	0,582	1,019	0,523	0,302	1,458	0,416	0,256	0,697	0,667	0,960	0,314	0,472	0,766	0,421	0,140
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

4.3.1 Pruebas experimentales para toma de los parámetros de la metaheurística PSO

Para tomar el parámetro se la metaheurística PSO se realizaron las siguientes pruebas experimentales:

- Se realizaron las posibles combinaciones de los parámetros de acuerdo a los rango de valores para cada uno de ellos propuesto por el autor de la metaheurística [9]
- Se incluyeron parámetros afinados de otros problemas de scheduling y ruteo
- Se probaron cada uno en el algoritmo
- Se escogió el grupo de parámetros que representaron la mejor respuesta en la mayor parte de las pruebas experimentales (Ver resumen del proceso anexo 4).

Luego del anterior procedimiento, la programación de la metaheurística obedeció a los siguientes parámetros

Tabla 15. Parámetro del algoritmo PSO

PARAMETROS ENJAMBRE	
COMPONENTE COGNITIVO (C1)	0.3
COMPONENTE SOCIAL (C2)	0.2
VELOCIDAD MAXIMA (Vmax)	1
FACTOR DE INERCIA MAXIMO (Wmax)	0.5
FACTOR DE INERCIA MINIMO (Wmin)	0.1

Fuente: El autor, selección de parámetros de las pruebas experimentales.

4.3.1 Corridas de la metaheurística PSO

Se programaron 10 corridas para los parámetros dados anteriormente. De cada corrida se obtuvieron el conjunto de soluciones óptimas con sus respectivas

soluciones no dominadas. Posteriormente se hizo una superpoblación de soluciones no dominadas y se crea el frente de Pareto final de la metaheurística.

4.3.2. Frente de Pareto para cada instancia de validación del problema de la metaheurística PSO

El resumen de los resultados de las corridas computacionales es:

Tabla 16. Numero de soluciones en el frente de Pareto de la metahurística PSO

Instancias	Numero de soluciones no dominadas en el frente de pareto
Instancia de validación 1	122
Instancia de validación 2	328
Instancia de validación 3	701

Las soluciones se muestran en el anexo 9.

4.4. Obtención de la agenda por medio de la metaheurística algoritmo genético

La metaheurística algoritmo genético para el problema en cuestión se programa bajo un permutado ver anexo 12, representado de la siguiente forma:

Rotaciones se organizan así:

Turno 1				Turno 2				Turno 3				Turno 4			
Tare a 1	Tare a 2	Tere a 3	Tare a 4	Tare a 2	Tare a 1	Tere a 3	Tare a 4	Tare a 3	Tare a 2	Tere a 1	Tare a 4	Tare a 1	Tare a 2	Tere a 4	Tare a 3

Ejemplo Encode permutado:

1	3	2	4	1	2	3	4	4	3	2	1	2	4	3	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Se transforma el encode en una Agenda de rotación de la siguiente manera:

Trabajador	Turno 1	Turno 2	Turno 3	Turno 4
1	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 3	Tarea 1
2	Tarea 2	Tarea 1	Tarea 2	Tarea 2
3	Tarea 3	Tarea 3	Tarea 1	Tarea 4
4	Tarea 4	Tarea 4	Tarea 4	Tarea 3

Trabajador	Turno 1	Turno 2	Turno 3	Turno 4
1	1	1	4	2
2	3	2	3	4
3	2	3	2	3
4	4	4	1	1

Luego el operador de Cruce es:

Vector 1

1	3	2	4	1	2	3	4	4	3	2	1	2	4	3	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Vector 2

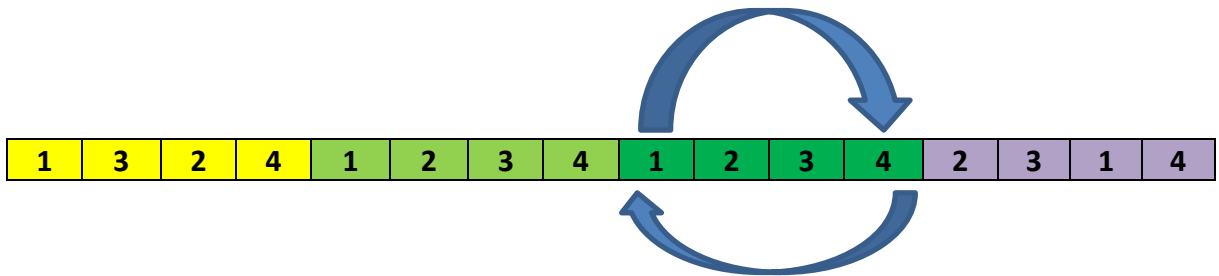
4	3	2	1	3	2	4	1	1	2	3	4	2	3	1	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

De tal forma que el Nuevo Individuo sería:

4	3	2	1	3	2	4	1	4	3	2	1	2	4	3	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

1	3	2	4	1	2	3	4	1	2	3	4	2	3	1	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Final mente bajo una probabilidad se realiza Mutación:



La programación de la metaheurística obedeció a los siguientes parámetros

Tabla 17. Parámetro del algoritmo Genético

PARAMETROS genetico	
TAMAÑO DE LA POBLACIÓN (Tp)	100
Nº ITERACIONES (Niter)	20
Probabilidad de cruzamiento (Pcruz)	0.8
Probabilidad de mutación (Pmut)	0.2

Fuente: valores tomados de [94]

4.4.1 Corridas de la metaheurística algoritmo genético

Se programaron 10 corridas para los parámetros dados anteriormente. De cada corrida se obtuvieron el conjunto de soluciones óptimas con sus respectivas soluciones no dominadas. Posteriormente se hizo una superpoblación de soluciones no dominadas y se crea el frente de Pareto final de la metaheurística.

Instancia	Numero de soluciones no dominadas en el frente de Pareto
Instancia de validación 1	37
Instancia de validación 2	87
Instancia de validación 3	213

Fuente: Autor

Las soluciones se muestran en el anexo 9.

4.5. Comparación de frentes de Pareto del modelo exacto, la metaheurística PSO y el algoritmo genético

El procedimiento de comparación utilizado fue:

1. Cada uno de los 3 algoritmos (ver anexo 10, 11 y 12) se corrieron con sus respectivos programas según los parámetros
2. la metaheurística PSO se corrió según los parámetros dados
3. la metaheurística algoritmo genético se corrió según los parámetros dados
4. Se obtuvo para cada algoritmo el conjunto de soluciones no dominadas (p1, p2...pn)
5. Se creó para cada algoritmo una superpoblación,
6. De cada Superpoblación se extrajeron las soluciones no-dominadas, formando así el frente pareto de cada algoritmo,

◆FP_{modelo}(frente Pareto del modelo matemático resuelto en GAMS)

◆FP_{ps0}(frente Pareto del algoritmo genético)

♦FP_{genetico}(frente Pareto del PSO)

7. se obtuvo el conjunto de soluciones encontradas como sigue

$$FP = FP_{\text{modelo}} \cup FP_{\text{ps0}} \cup FP_{\text{genetico}}$$

8. Del conjunto FP, se obtienen las soluciones No Dominadas, y así se forma una aproximación del Frente Pareto Optimo (FP true)

9. Se aplica tasa de error para saber la participación de cada método en el FP true

El número de soluciones encontradas por el modelo matemático y el tamaño de las superpoblaciones halladas por las metaheurística se muestran a continuación.

Instancias	Numero de soluciones no dominadas en el frente de Pareto		
	Modelo exacto	PSO	Genético
Instancia de validación 1	68	122	37
Instancia de validación 2	36	328	87
Instancia de validación 3	85	701	213

Fuente: Autor

4.6 Comparación de las soluciones de los algoritmos con PF true y tasa de error.

Para cada instancia se expone la cantidad de soluciones de cada algoritmo, que se encuentran en FPtrue ($\epsilon FP_{\text{true}}$), Las que son dominadas por FPtrue (FP dominadas), el número de soluciones encontradas por cada método (FP algoritmo) y el porcentaje de soluciones en FPtrue ($\% \epsilon FP_{\text{true}}$). los valores de las soluciones para cada instancia de validación se muestran en el anexo 9.

Tabla 18. Comparación de la instancia de validación 1

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (€ PF true)	%(€ PF true)
Modelo exacto	68	2	66	86,8%
PSO	122	116	6	7,9%
Genético	37	33	4	5,3%

Fuente: Autor

Se puede observar que los algoritmos PSO y Genético, no llegan a todas las soluciones de FPtrue, mientras que el Modelo exacto alcanza la mayoría (86.6 %) de las soluciones de FP true.

El análisis de valores máximos y mínimos de las variables por algoritmo (dentro del Pfalse) muestra que la diferencia entre los valores de la metaheurística es pequeña y que en algunas variables superan al modelo matemático, ver tabla comparativa

	DOSIS	JSI	REBA	LUXE	T	ALGORITMO
Mejores Valores Para Las Variables	0,16347326	6	25	654	63,16	PSO
	0,13630679	6	23	627	61,99	GENÉTICO
	0,36396531	6	25	674	63,16	M. EXACTO

Esto nos indica que los valores de las metaheurísticas se pueden tomar para realizar agendas de rotación, sin afectar en gran medida la exposición a los factores de riesgo

Tabla 19. Comparación de la instancia de validación 2

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (€ PF true)	%(€ PF true)
Modelo exacto	36	0	36	50,0%
PSO	328	316	12	16,7%
Genético	87	63	24	33,3%

Fuente: Autor

Se aprecia que el algoritmo modelo exacto obtiene el 50% de las soluciones del FPtrue, mientras que el algoritmo PSO alcanza la menor cantidad de soluciones en el FPtrue.

Para esta instancia el análisis de valores máximos y mínimos de las variables por algoritmo (dentro del Pfalse) también muestra que la diferencia entre los valores de la metaheurística es pequeña y que en algunas variables superan al modelo matemático, ver tabla comparativa

	DOSIS	JSI	REBA	LUXE	T	ALGORITMO
Mejores Valores Para Las Variables	0,19497075	9	36	1001	93,16	PSO
	0,24688127	9	36	974	93,98	GENÉTICO
	0,34840905	9	37	1041	93,16	M. EXACTO

Esto de nuevo indica que los valores de las metaheurísticas se pueden tomar para realizar agendas de rotación, sin afectar la exposición a los factores de riesgo.

Tabla 20. Comparación de la instancia de validación 3

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (€ PF true)	%(€ PF true)
Modelo exacto	85	0	85	93,4%
PSO	701	700	1	1,1%
Genético	213	208	5	5,5%

Fuente: Autor

Se observa que el algoritmo modelo exacto contribuye en su totalidad con las soluciones en el FPtrue, mientras que el PSO aporta el 1,1% y el algoritmo genético aporta el 5.5% como se aprecian en la tabla anterior.

Para esta instancia el análisis de valores máximos y mínimos de las variables por algoritmo (dentro del Pfalse) también muestra que la diferencia entre los valores de

la metaheurística es pequeña y que en algunas variables superan al modelo matemático, como lo muestra el siguiente resumen:

	DOSIS	JSI	REBA	LUXE	T	ALGORITMO
Mejores Valores Para Las Variables	0,1811065	8	42	1168	121,99	PSO
	0,18608684	10	42	1235	121,99	GENÉTICO
	0,34545592	12	49	1388	123,98	M. EXACTO

4.7 Comparación de las soluciones de los algoritmos con los valores de exposición en la empresa

Es importante además, verificar que los algoritmos propuestos mejoran realmente los valores de exposición de la empresa, por tal razón, se compara cada uno de ellos; evidenciando que cualquiera de las tres formas de generar agendas de rotación programadas, mejoran las condiciones de exposición de los operarios en la empresa, como se muestra a continuación

Tabla 21. Análisis datos de validación empresa vs algoritmos

	ALGORITMOS			
	PSO	GENETICO	M. EXACTO	EMPRESA
DOSIS	0,18111	0,18608684	0,34545592	0,5
JSI	8	10	12	12
REBA	42	42	49	52
LUXE	1168	1235	1388	856
T	121,99	121,99	123,98	128

Fuente: autor

4.8 Comparación de las soluciones de los algoritmos con PF true y tasa de error de las Instancia de experimentación

De acuerdo a cada instancia experimental se realizó la comparación de frente de Pareto con respecto al FPtrue, dada la dificultad para encontrar el frente de Pareto para estas instancias con el modelo matemático, se realiza la comparación entre las metaheurística, como sigue:

4.8.1 Comparación Para La Instancia De Experimentación 1, 2 Y 3

De acuerdo a los resultados obtenidos en las metaheurísticas se muestra la tasa de error para cada instancia:

Tabla 22. Instancia experimental 1. (15 trabajadores - 15 trabajos – 2 turnos)

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (€ PF true)	%(€ PF true)
Pso	188	164	24	72,7%
Genético	92	83	9	27,3%

Fuente: Autor

Tabla 23. Instancia experimental 2.(15 trabajadores - 15 trabajos – 3 turnos)

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (€PF true)	%(€PF true)
Pso	218	179	39	60,9%
Genético	106	81	25	39,1%

Fuente: Autor

Tabla 24. Instancia experimental 2.(15 trabajadores - 15 trabajos – 4 turnos)

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (€PF true)	%(€PF true)
Pso	271	234	37	34,3%
Genético	192	121	71	65,7%

Fuente: Autor

4.8.2 Comportamiento de las variables del problema en las instancias de experimentación 1, 2 y 3

Dado que estas instancia se trabajan bajo el mismo número de trabadores y trabajos(15) se pudo verificar el comportamiento de las variables (valores mínimos y máximos del pfalse) , como se ve a continuación:

Tabla 25. Comportamientos de las variables de la instancia de experimentación (I.E.1 , I.E.2 y I.E.3)

	I.E.1	I.E.2	I.E.3
Dosis ruido	0,8968	0,8766	0,8559
JSI	20	26	40
REBA	26	39	49
Luxes	1328	1420	2035
Temperatura	64	96	128

Fuente: Autor

Para analizar correctamente la tendencia de las variables se encontró el promedio para aquellas que son acumuladas (jsi, reba, temp, luxes) para cada número de turnos, quedando el comportamiento de la siguiente forma:

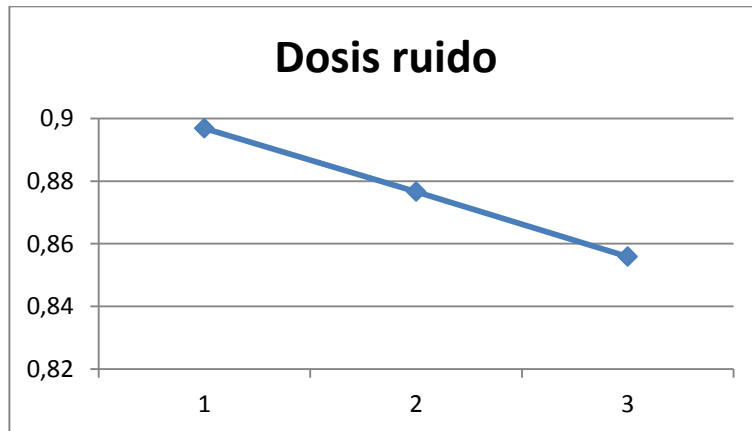
Tabla 26. Comportamientos promedios de las variables de la instancia de experimentación 1, 2 y 3

	I.E.1	I.E.2	I.E.3
Dosis ruido	0,8968	0,8766	0,8559
Jsi	10	8,6667	10
Reba	13	13	12,25
Luxes	664	473,333	508,75
Temperatura	32	32	32

Fuente: Autor

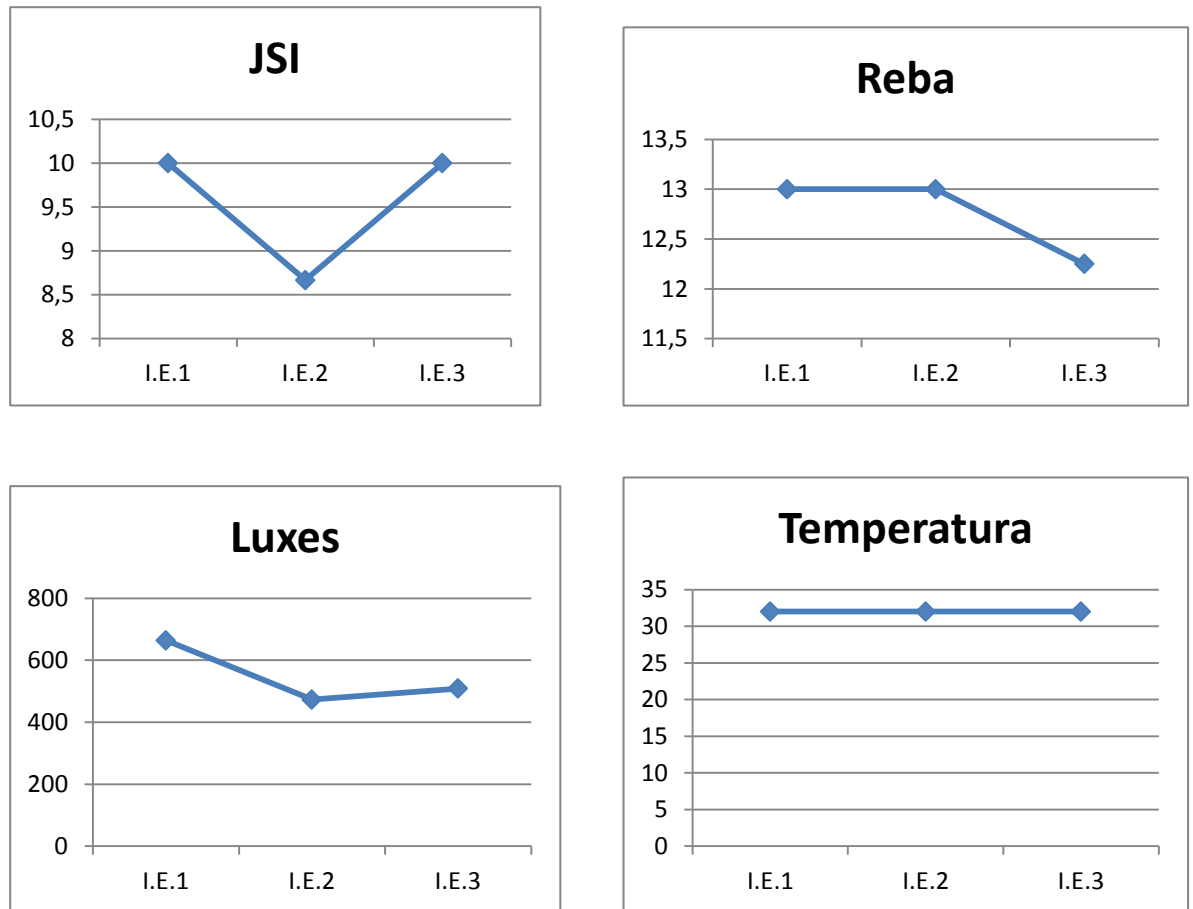
Se puede ver como la dosis disminuye a medida que se aumenta el número de rotaciones como se muestra en la siguiente ilustración

Figura 7. Comportamiento dosis ruido IE1, IE2 y IE3



Se observó una disminución en la dosis en cada número de turnos (2, 3 y 4).

Figura 8. Comportamiento de JSI, REBA; luxes; temperatura en IE1, IE2 , IE3.



Las demás variables muestran un comportamiento favorables en su valor no alejándose mucho entre ellas, la conductas de las variables JSI, REBA; LUXES; TEMPERATURA, se muestra en la siguiente ilustración

4.8.3 Comparación Para La Instancia De Experimentación 4, 5 Y 6

De acuerdo a los resultados obtenidos en las metaheurísticas se muestra la tasa de error para cada instancia

Tabla 27. Instancia experimental 4. (20 trabajadores - 20 trabajos – 2 turnos)

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (€PF true)	%(€PF true)
Pso	251	222	29	56,9%
Genético	118	96	22	43.1%

Fuente: Autor

Tabla 28. Instancia experimental 5.(20 trabajadores - 20 trabajos – 3 turnos)

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (€PF true)	%(€PF true)
Pso	157	118	39	70.9%
Genético	48	32	16	29,1%

Fuente: Autor

Tabla 29. Instancia experimental 6.(20 trabajadores - 20 trabajos – 4 turnos)

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (€PF true)	%(€PF true)
Pso	336	286	50	51,5%
Genético	123	76	47	48,5%

Fuente: Autor

4.8.4 Comportamiento de las variables del problema en las instancias de experimentación 4, 5 y 6

En este grupo de instancias se trabajan bajo el mismo número de trabajadores y trabajos(20) se pudo verificar el comportamiento de las variables (valores mínimos y máximos del ptrue) , como se ve a continuación:

Tabla 30. Comportamientos de las variables de la instancia de experimentación 4, 5 y 6

	I.E.4	I.E.5	I.E.6
Dosis ruido	1	1	0,8968
JSI	20	29	34
REBA	26	39	47
Luxes	796	1381	2028
Temperatura	64	96	128

Fuente: Autor

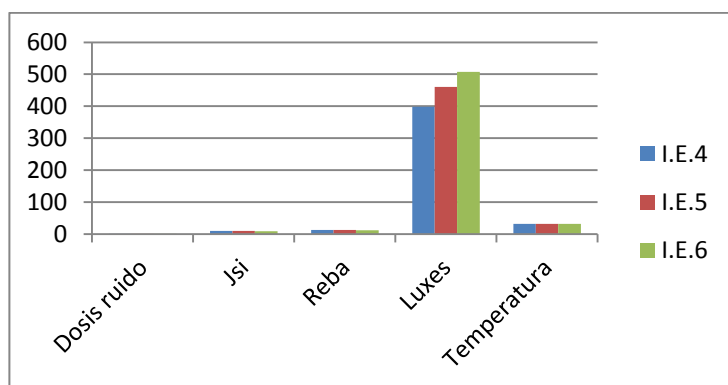
Para analizar correctamente la tendencia de las variables se encontró el promedio para aquellas que son acumuladas (JSI, REBA, TEMP, luxes) para cada número de turnos, quedando el comportamiento de la siguiente forma:

Tabla 31. Comportamientos promedios de las variables de la instancia de experimentación 4, 5 y 6.

	I.E.4	I.E.5	I.E.6
Dosis ruido	1	1	0,8968
JSI	10	9,6666667	8,5
REBA	13	13	11,75
Luxes	398	460,33333	507
Temperatura	32	32	32

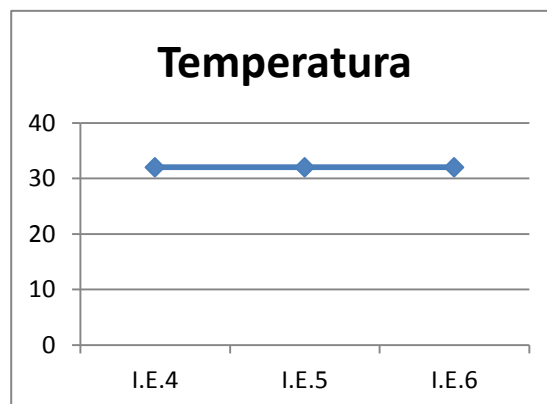
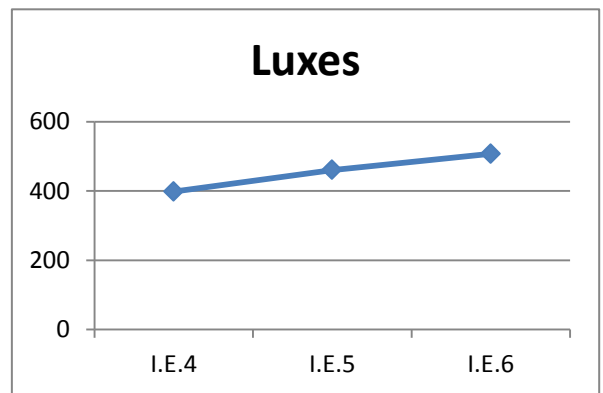
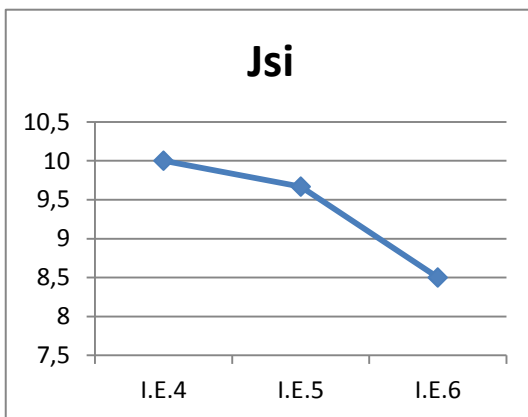
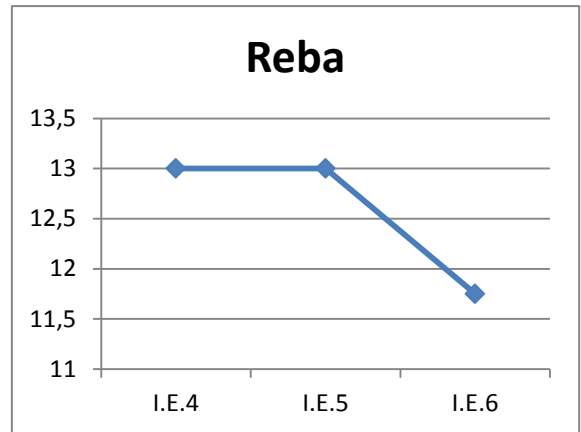
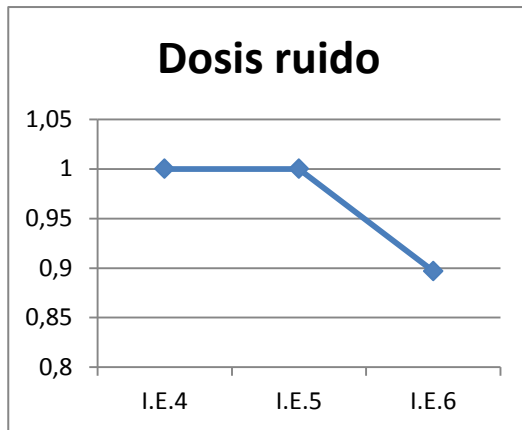
Fuente: Autor

Figura 9. Comportamiento de las variables IE4, IE5 y IE6



El grafico mostro la paridad del comportamiento de las variables, para observarlo de forma detallada se puede ver las siguientes graficas:

Figura 10. Comportamientos del ruido, JSI, REBA; luxes; temperatura en IE4, IE5 , IE6.



Para estas instancia de experimentación 4, 5, 6; que corresponden a 20 trabajadores, 20 trabajos y dos, tres y cuatro turnos respectivamente; se mostró una disminución en cada turno de las variables en cuestión, el ruido, js, rebase reducen favorablemente; mientras que los luxes muestra una conducta al aumento, adecuada a su naturaleza puesto que en cada turno incrementa su valor, que es lo que se quiere para un indicador que mide la cantidad de luz en un puesto de trabajo.

4.8.5 Comparación Para La Instancia De Experimentación 7, 8 Y 9

De acuerdo a los resultados obtenidos en las metaheurísticas se muestra la tasa de error para cada instancia

Tabla 32. Instancia experimental 7. (25 trabajadores - 25 trabajos – 2 turnos)

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (εPF true)	%(εPF true)
Pso	77	66	11	84,6%
Genético	27	25	2	15,4%

Fuente: Autor

Tabla 33. Instancia experimental 8.(25 trabajadores - 25 trabajos – 3 turnos)

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (εPF true)	%(εPF true)
Pso	135	103	32	65,3%
Genético	51	34	17	34,7%

Fuente: Autor

Tabla 34. Instancia experimental 9.(25 trabajadores - 25 trabajos – 4 turnos)

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (€PF true)	%(€PF true)
Pso	205	171	34	49,3%
Genético	157	122	35	50,7%

Fuente: Autor

4.8.6 Comportamiento de las variables del problema en las instancias de experimentación 7, 8 y 9

Para este grupo de instancias se trabajan bajo el mismo número de trabajadores y trabajos(25) se pudo contrastar el comportamiento de las variables (valores mínimos y máximos del pfalse), como se ve a continuación:

Tabla 35. Comportamientos de las variables de la instancia de experimentación 7, 8 y 9

	I.E.7	I.E.8	I.E.9
Dosis ruido	0,9921	0,9821	0,9960
JSI	20	30	39
REBA	25	37	48
Luxes	1130	1523	2088
Temperatura	64	96	128

Fuente: Autor

De igual forma para analizar correctamente la tendencia de las variables se encontró el promedio para aquellas que son acumuladas (JSI, REBA, TEMP, luxes) para cada número de turnos, quedando el comportamiento de la siguiente forma:

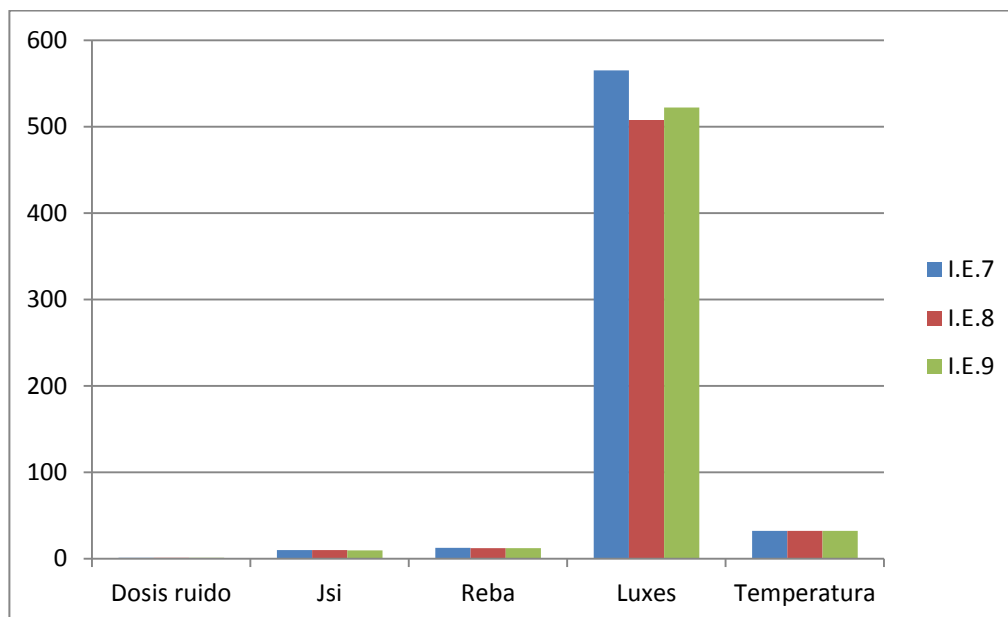
Tabla 36. Comportamientos promedios de las variables de la instancia de experimentación 7, 8 y 9

	I.E.7	I.E.8	I.E.9
Dosis ruido	0,9921	0,9821	0,996
Jsi	10	10	9,75
Reba	12,5	12,33333333	12
Luxes	565	507,6666667	522
Temperatura	32	32	32

Fuente: Autor

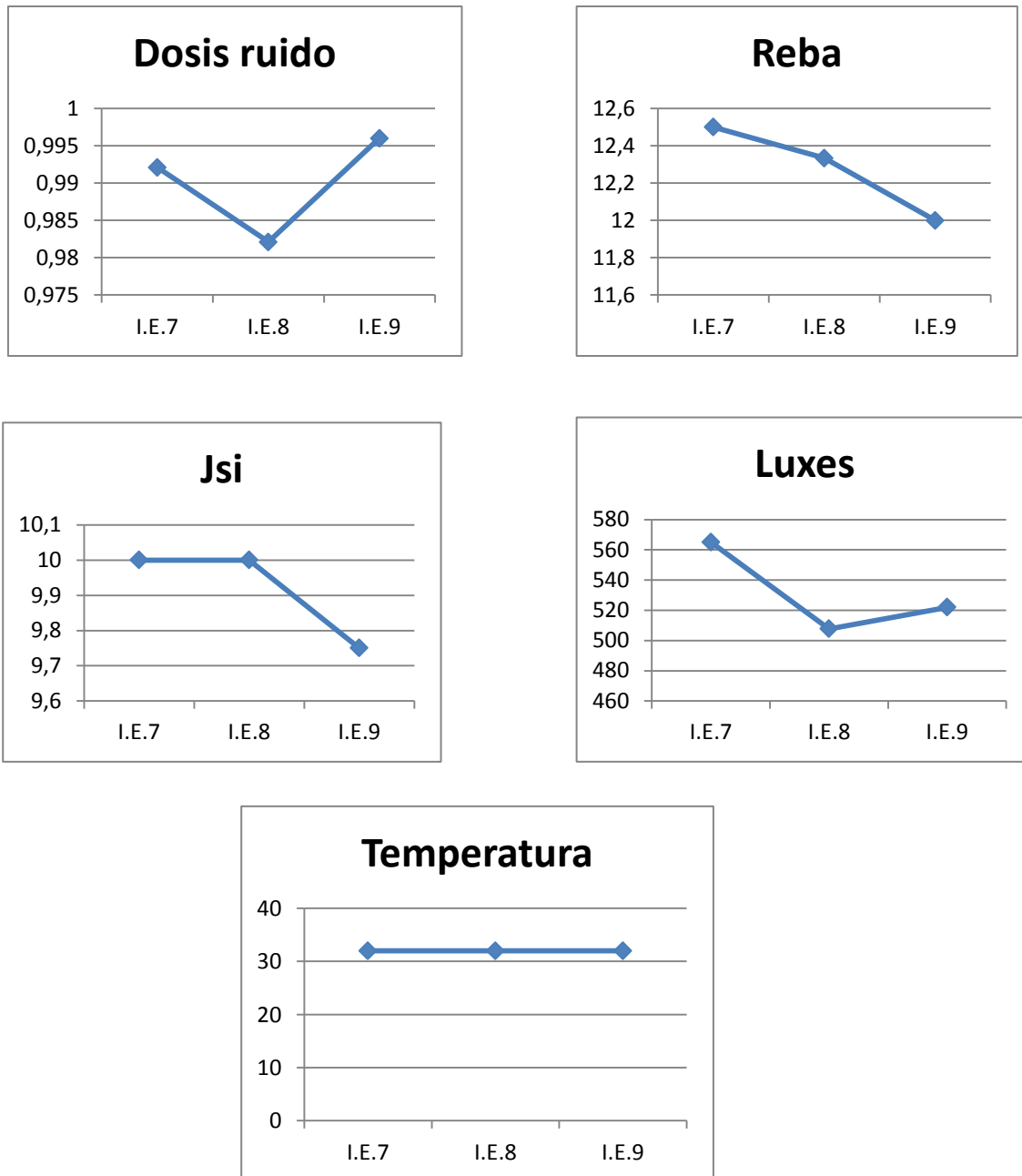
La tabla muestra la poca diferencia de los valores de las variables en cada turno, se puede apreciar de mejor forma en la siguiente figura:

Figura 11. Comportamiento de las variables IE7, IE8 y IE9.



Se observa un comportamiento normal en el valor de las variables de acuerdo a su naturaleza, se puede mirar con más detalle cada variable en la siguiente figura:

Figura 12. Comportamientos del ruido, JSI, REBA; luxes; temperatura en IE7, IE8 , IE9



Para este grupo de instancia se puede notar que las variables REBA y JSI, muestran una tendencia a disminuir por turnos, mientras que la temperatura se comporta de manera constante; por otra parte la dosis de ruido no muestra una

tendencia clara a la disminución, pero no varía ampliamente, se mantiene entre 0,98 y 0,99.

4.8.7 Comparación Para La Instancia De Experimentación 10, 11 Y 12

De acuerdo a los resultados obtenidos en las metaheurísticas se muestra la tasa de error para cada instancia

Tabla 37. Instancia experimental 10. (30 trabajadores - 30 trabajos – 2 turnos)

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (εPF true)	%(εPF true)
Pso	172	154	18	64,35%
Genético	47	37	10	35,7%

Tabla 38. Instancia experimental 11.(30 trabajadores - 30 trabajos – 3 turnos)

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (εPF true)	%(εPF true)
Pso	231	207	24	51,06%
Genético	80	57	23	48,94%

Tabla 39. Instancia experimental 12.(30 trabajadores - 30 trabajos – 4 turnos)

	FP algoritmo	FP dominadas	FP (εPF true)	%(εPF true)
Pso	370	327	43	41,7%
Genético	183	123	60	58,3%

Fuente: Autor

4.8.8 Comportamiento de las variables del problema en las instancias de experimentación 10, 11 y 12

Para este grupo de instancias se trabajan bajo el mismo número de trabajadores y trabajos (30) se pudo comprobar el comportamiento de las variables (valores mínimos y máximos del pfalse), como se ve a continuación:

Tabla 40. Comportamientos de las variables de la instancia de experimentación 10, 11 y 12

	I.E.10	I.E.11	I.E.12
Dosis ruido	0,994	0,972	0,99
Jsi	20	28	35
Reba	26	37	48
Luxes	832	1394	2138
Temperatura	64	96	128

Fuente: Autor

De igual forma para analizar correctamente la tendencia de las variables se encontró el promedio para aquellas que son acumuladas (jsi, reba, temp, luxes) para cada número de turnos, quedando el comportamiento de la siguiente forma:

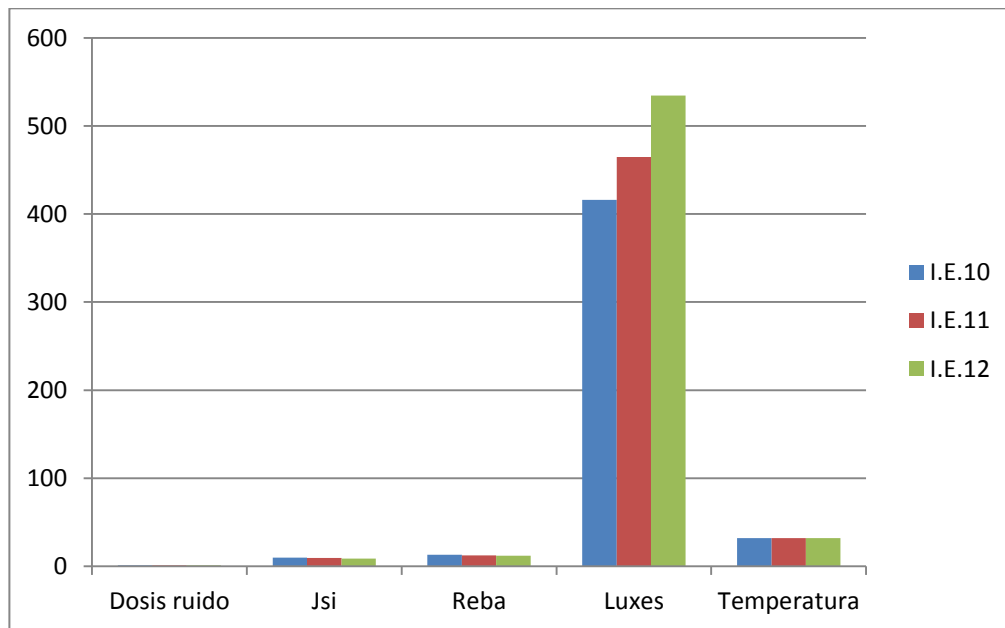
Tabla 41. Comportamientos promedios de las variables de la instancia de experimentación 10, 11 y 12

	I.E.10	I.E.11	I.E.12
Dosis ruido	0,994	0,972	0,99
Jsi	10	9,33	8,75
Reba	13	12,33	12
Luxes	416	464,67	534,5
Temperatura	32	32	32

Fuente: Autor

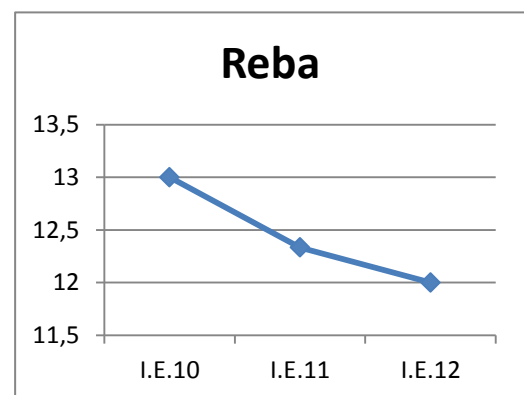
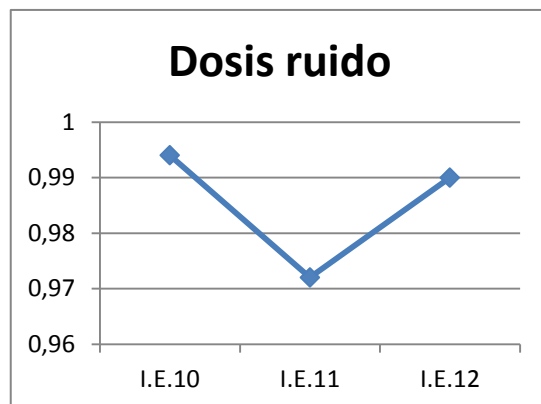
La tabla muestra la poca diferencia de los valores de las variables en cada turno, se puede apreciar de mejor forma en la siguiente figura:

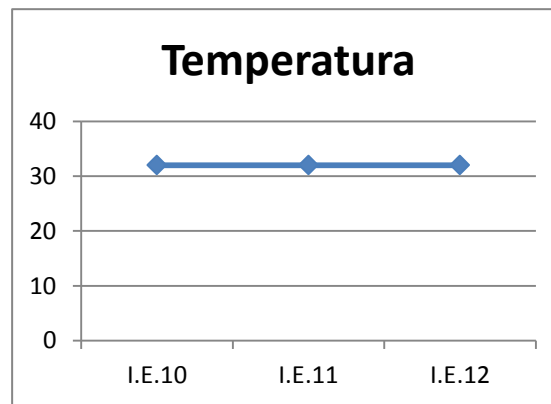
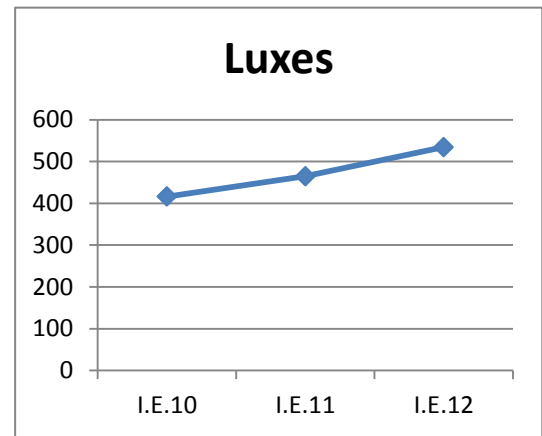
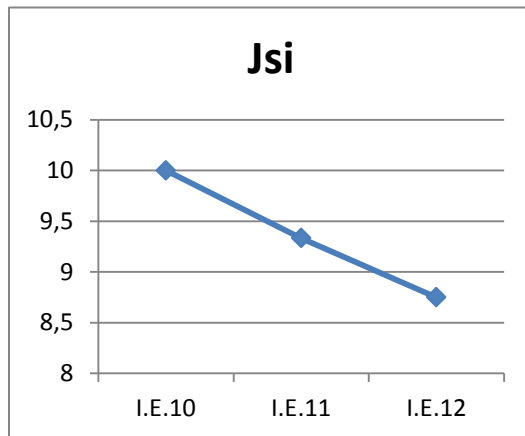
Figura 13. Comportamiento de las variables IE7, IE8 y IE9



Se observa una conducta adecuada de cada variable, de modo que se puede verificar de nuevo por medio de un gráfico de dispersión, ver figura:

Figura 14. Comportamientos del ruido, JSI, REBA; luxes; temperatura en IE10, IE11 , IE12





CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El trabajo se dividió en dos grandes partes, la primera la validación del modelo, que demuestra que el modelo propuesto presenta resultados factibles y óptimos; y que se puede a partir de él, generar agendas de rotación de puestos de trabajo.

Se mostró que la variables del modelo (ruido, JSI, etc) muestran comportamientos favorables en los resultados, en los cuales se espera que la dosis de ruido no

supere el máximo que por norma que es de 1 (uno) y así mismo disminuir los valores de los otros factores.

El modelo matemático solucionado de forma exacta proporciona la mayor parte de los puntos en el frente de Pareto real, en la validación el algoritmo PSO presenta poca representación, pero supera al algoritmo genético en la mayoría de los turnos excepto en el cuarto. Ver tabla:

Tabla 42. Resumen de resultados de la validación

DESCRIPCIÓN INSTANCIAS VALIDACIÓN			%(ϵ PF TRUE)		
N° Trabajos	N° Turnos	Instancias	Modelo Exacto	PSO	GENÉTICO
13 trabajos	2 turnos	Instancia 1	86,8%	7,9%	5,3%
	3 turnos	Instancia 2	50,0%	16,7%	33,3%
	4 turnos	Instancia 3	93,4%	1,1%	5,5%

En los resultados de observación también, que las medidas de las exposiciones para el caso de la empresa donde se tomaron los datos, pueden ser mejoradas utilizando la técnica de rotación de trabajo; cualquiera de los tres algoritmos propuestos ofrece agendas de rotación que superan en buenos términos las exposiciones que actualmente presentan los operarios con el esquema de ubicación que presenta.

Dada la dificultad de solucionar instancias mayores por medio de modelo exacto se procedió a programar dos metaheurísticas y comparar por su contribución en el frente de Pareto (fp-true). Se observó que solucionar el modelo matemático exacto puede tomar muchas horas de cómputo, la metaheurística proporciona valores cercanos a los óptimos y en menor tiempo, como se observó en los resultados.

Los resultados de la segunda gran parte del trabajo se pueden ver en la tabla resumen que se muestra a continuación:

Tabla 43. Resumen de resultados de la experimentación

DESCRIPCIÓN INSTANCIAS EXPERIMENTACIÓN			%(εPF TRUE)	
N° Trabajos	N° Turnos	Instancias	PSO	GENÉTICO
15 trabajos	2 turno	Instancia 1	72,7%	27.3%
	3 turnos	Instancia 2	60.9%	39.1%
	4 turnos	Instancia 3	34.3 %	65.7%
20 trabajos	2 turno	Instancia 4	56,9%	43.1%
	3 turnos	Instancia 5	70.9%	29,1%
	4 turnos	Instancia 6	51,5%	48,5%
25 trabajos	2 turno	Instancia 7	84,6%	15,4%
	3 turnos	Instancia 8	65,3%	34,7%
	4 turnos	Instancia 9	49,3%	50,7%
30 trabajos	2 turno	Instancia 10	64,35%	35,7%
	3 turnos	Instancia 11	51,06%	48,94%
	4 turnos	Instancia 12	41,7%	58,3%

Se observa que la mayor parte de las veces el algoritmo PSO en estas instancias denominadas mayores, cuenta con mayor representación en el FP- true. De la misma forma se puede ver que el algoritmo genético supera al PSO en los casos señalado en la tabla N° 49.

De las 12 instancias de validación el PSO supera al genético en 9 ellas, representando un 75% de las veces. En los caso en que el PSO se ve superado la diferencia promedio en la tasa es de 16.5%, muestra que la tasa promedio en la que el PSO le gana al genético es de 28,5%.

Dada las soluciones del modelo por medio de las metaheurísticas, se puede resumir el comportamiento de las variables en la siguiente tabla:

Tabla 44. Resumen de resultados de la variable

DESCRIPCIÓN INSTANCIAS EXPERIMENTACIÓN			VALORES PROMEDIO POR TRABAJADOR				
N° Trabajos	N° Turnos	Instancias	ruido	jsi	reba	lux	Temp
15 trabajos	2 turno	Instancia 1	0,8968	10	13	664	32
	3 turnos	Instancia 2	0,8766	8,6667	13	473,333	32
	4 turnos	Instancia 3	0,8559	10	12,25	508,75	32
20 trabajos	2 turno	Instancia 4	1	10	13	398	32
	3 turnos	Instancia 5	1	9,667	13	460,333	32
	4 turnos	Instancia 6	0,8968	8,5	11,75	507	32
25 trabajos	2 turno	Instancia 7	0,9921	10	12,5	565	32
	3 turnos	Instancia 8	0,9821	10	12,333	507,667	32
	4 turnos	Instancia 9	0,996	9,75	12	522	32
30 trabajos	2 turno	Instancia 10	0,994	10	13	416	32
	3 turnos	Instancia 11	0,972	9,33	12,33	464,67	32
	4 turnos	Instancia 12	0,99	8,75	12	534,5	32

Para cada grupo de instancia se muestra un comportamiento favorable para las diferentes variables, en general se observa que los valores de la Variables, en este caso, los factores de riesgos, presentan disminución a medida que se aumenta el número de turno, lo que indica que en promedio cada trabajador presenta menos exposición al factor.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

El modelo propuesto logra rotaciones de trabajos acorde a la necesidad detectada, se busca que los trabajadores moderen o promedien su exposición a factores de riesgo (sin que uno esté más o menos afectados que otros), Asimismo da una mirada general a los puestos de trabajo incluyendo 5 distintos indicadores para evaluar riesgos ocupacionales (reba, jsi, luxes, temperatura, ruido). Además, La modelación matemática desarrollada proporciona una valiosa herramienta para el manejo de los riesgos en las empresas.

Por otra parte es adecuado tener en cuenta que las rotaciones de puestos deben realizarse con sumo cuidado de modo que se contemple no afectar la competencia y productividad de los trabajadores, de tal manera que para cumplir con los supuestos, se debe brindar o nivelar los conocimiento de todos los operarios en todos los lugares.

En el desarrollo del trabajo se encontró además que la modelación matemática desarrollada proporciona una valiosa herramienta para el manejo de los riesgos en las empresas. El modelo propuesto puede aplicarse en otros ambientes pues la modelación básica contempla los elementos fundamentales del entorno empresarial

De La aplicación de metaheurística se puede decir que economiza el tiempo de cálculos para la definición de agendas de trabajo y de igual manera diversifica las agendas ofreciendo valores adecuados para las variables de los puestos de trabajo. Los resultados obtenidos por medio de la utilización de metaheurísticas pueden ser utilizadas sin problemas, puesto que, como se evidencio ofrecen buenas soluciones al problema. Mientras que la solución de modelo multiobjetivo,

siendo muy buena, necesita más tiempo, tiempo el cual nos ahorramos con las metaheurísticas, siendo los resultados comparables y válidos.

Al comparar los resultados los algoritmos con los de la empresa se encontró que todas las formas de solucionar el problema propuesto superan los valores obtenidos en la empresa, la cual tienen a los trabajadores expuesto a los mismos riesgos sin rotarlos o disminuirlos.

Ahora desde un enfoque Computacional, se mostró la habilidad que tiene el algoritmo PSO en la creación de agendas de rotación de puestos de trabajo.

Por último, se puede expresar con toda confianza que el problema de programación de puesto de trabajo, es un elemento esencial en la gestión de los riesgos industriales y además se puede decir que es válido incluir variados factores de riesgo a los modelos de rotación, debido a que estos representan la realidad y complejidad de los puestos de trabajo, la simplificación de estos tendría como resultados agendas de rotaciones parcializadas e incompletas.

6.2 Trabajos futuros

La presente investigación puede generar las siguientes opciones de trabajo:

- A la modelación propuesta se le pueden vincular otros factores de riesgo, como pueden ser los Sico laborales, de seguridad u otros.
- Por otra parte, se puede programar diferentes metaheurísticas al problema para ver si generan mejores resultados en el frente de Pareto.
- Otro trabajo sería resolver de forma exacta todas Las instancias grandes propuestas para verificar el óptimo global en cada una de ellas.
- También se puede trabajar en desarrollo de simulaciones que contemple como base la formulación propuesta y muestre de forma dinámica y en tiempo real los resultados futuros de las planificaciones de las rotaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Eurofound, "Fourth European Working Conditions Survey. Impact of work on health," *Eurofound, "Fourth European Working Conditions Survey European Foundation for the Improvement of Living and Working Condition*, no. 53, 2005.
- [2] J. Herrmann, "Handbook of production scheduling," *Springer. ISBN-10: 0-387-33117-4*, no. 54, 2006.
- [3] J Kennedy and R Eberhart, "Particle swarm optimization, IEEE International Conference on Neural Networks ," *Conference Proceedings*, pp. Vol. 4, pp. 1942–1948., 1995.
- [4] R. W. McGorry y W. S. Maynard G. Dempsey, "A survey of tools and methods used by certified professional ergonomists," *Applied Ergonomics*, pp. 489-503, 2005.
- [5] D. D. Triggs y P. M. King, "Job rotation: an administrative strategy for hazard control," *Professional Safety*, pp. 32-34, 2000.
- [6] S. Asensio-Cuesta J. A. Diego-Mas, "Metodología para la generación de agendas de rotación de Puestos de trabajo desde un enfoque ergonómico mediante algoritmos evolutivos," 2009.
- [7] J. S Rucker N. y Moore, "Predictive validity of the strain index in manufacturing facilities," *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, pp. 63-73, 2002.
- [8] Bloswick, D., Sesek, R., Mann, C., y Bernard, T. Drinkaus P., "The Strain Index:Using Task Level Outputs to Evaluate Job Risk," *1st Annual Regional*.
- [9] R. Eberhart J. Kennedy, "Particle swarm optimization," *En Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, pp. 1942-1948, 1995.
- [10] W. Ling, J. Yi-Hui B. Liu, "B. Liu, W. Ling, J. Yi-Hui. "An Effective PSO-Based Memetic Algorithm for Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics," *B. Liu, W. Ling, J. Yi-Hui. "An Effective PSO-Based Memetic Algorithm for Flow Shop Scheduling" IEEE Transactions on*, vol. 37, pp. 18-27, 2007.

- [11] N. Jawahar B. S. Girish, "A particle swarm optimization algorithm for flexible job shop scheduling problem," *Automation Science and Engineering IEEE International Conference on*, pp. 22-25, 2009.
- [12] C. Lu Z. Zhang, "Application of the improved particle swarm optimizer to vehicle routing and scheduling problems," *Grey Systems and Intelligent Services, 2007. GSIS 2007. IEEE International Conference on*, pp. 1150-1152, 2007.
- [13] W. Fan and Y. Li T. Zhang, "The Comparative Research of Solving Multi-task Scheduling Problems with GA and PSO," *Natural Computation, 2009.ICNC '09. Fifth International Conference on*, vol. 4, pp. 459-463, 2009.
- [14] R. Wells, ""Job Rotation. Is it a Solution? ", " *WorkShop Principles and Practices of Job Rotation (CRE-MSD)*, 2004.
- [15] R. Arndt, "Working Posture and Musculoskeletal Problems of Video Display Terminal Operators - Review and Reappraisal," *American Industrial Hygiene Association Journal*, pp. 437-446, 1983.
- [16] J. Winkel y R. H. Westgaard, "Editorial: A model for solving work related musculoskeletal problems in a profitable way," *Applied Ergonomics*, pp. 71-77, 1996.
- [17] P. Mondelo, "Ergonomía 1 fundamentos," *ISBN: 84-8301-315-0*, p. 106, 1999.
- [18] B. Jonsson, "Electromyographic studies of job rotation," *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, pp. 108-109, 1988.
- [19] M. Kuijer, bartvisser and C. G. han Kemper P. Paul, "Job rotation as a factor in reducing physical workload at a refuse collecting department, *Ergonomics*," pp. 1167-1178, 1999.
- [20] J. Mautz y D. Wrightsman L. Hazzard, "Job rotation cuts cumulative trauma cases," *Personnel Journal*, pp. 29-32, 1992.
- [21] B. Melin, L. Sandsjö, I. Dohnsy U. Lundberg D. Rissen, "Psychophysiological stress reactions, trapezius muscle activity, and neck and shoulder pain among female cashiers before and after introduction of job rotation," *Work & Stress*, pp. 127-137, 2002.

- [22] K. Davis y M. Jorgensen, "Ergonomics. Pros and cons of job rotation as a means of reducing injury costs," *Journal of occupational and environmental hygiene*, pp. D1-D3, 2005.
- [23] y W. Karwowski D. Rodrick, "Job Rotation," *Interventions, controls, and applications in occupational ergonomics*, Edit: Marras, W.S. y Karwowski, W, pp. 1-12, 2006.
- [24] M. C. Haims y P. Carayon, "Work Organization Interventions," *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*, pp. 1441-1445, 2002.
- [25] L. Cheraskin y M. J. Stevens M. A. Campion, "Career-related antecedents and outcomes of job rotation," 1994.
- [26] H. J. Huang, "Job rotation from the employees' point of view," *Curtin University of Technology*, 1999.
- [27] M. S. Redfern y B. A. Norman B. J. Carnahan, "A Genetic Algorithm for Designing Job Rotation Schedules Considering Ergonomic Constraints," *Department of Industrial Engineering, University of Pittsburgh*, 1999.
- [28] S. U. Seckiner y M. Kurt, "A simulated annealing approach to the solution of job rotation scheduling problems," *Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering, Gaziantep University*, 2008.
- [29] W. Tharmmaphornphilas y B. A. Norman, "A Quantitative Method for Determining Proper Job Rotation Intervals," *Department of Industrial Engineering, University of Pittsburgh USA*, 2004.
- [30] J.S. MOORE and A., GARG, "The Strain Index: A proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders," *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 56, pp. 443-458, 1995.
- [31] Hignett S. and L., McAtamney, ""Rapid Entire Body Assessment (REBA)", "*Applied Ergonomics*, vol. 31, pp. pp: 201-205, 2000.
- [32] Fundación Mapfre, Ed., *Manual de higiene Industrial*. Madrid: Editorial MapFre, 1991.
- [33] Manuel Falagán Rojo and Arturo Canga Alonso, *MANUAL BÁSICO DE*

PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES. Mexico: Sociedad Asturiana de Medicina y Seguridad en el Trabajo, 2000.

- [34] Ministerio de la Protección Social, *Guía de Atención Integral Basada en la Evidencia para Hipoacusia Neurosensorial Inducida por Ruido en el Lugar de Trabajo*. Bogota: Ministerio de la Protección Social, 2006.
- [35] Ministerio de trabajo y seguridad, *Reglamento Técnico Para Ruido En Ambientes De Trabajo*. Bogotá.
- [36] Instituto Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo (INHST), *NTP 322: Valoración del riesgo de estrés térmico: índice WBGT*. España.
- [37] D. Escot Bocanegra and D. Poyatos Martínez, "Aplicación del algoritmo del enjambre (PSO) a la estimación del ángulo de llegada (DOA)," Universidad de Alcalá (UAH), Madrid, 2006.
- [38] R.C. Eberth and Y Shi, "Particle swarm optimization: developments, applications and resources," in *Evolutionary Computation*, Seoul, 2001, pp. 81-86.
- [39] M. Gómez González, "Sistema De Generación Eléctrica Con Pila De Combustible De Óxido Sólido Alimentado Con Residuos Forestales Y Su Optimización Mediante Algoritmos Basados En Nubes De Partículas," *Universidad Nacional de Educación a Distancia, UNED, Tesis Doctoral*, 2008.
- [40] M. Michell, "An Introduction to Genetic Algorithms," *MIT Press*, 1996.
- [41] M. C. Vélez y J. A. Montoya, "Metaheurísticos: una alternativa para la Solución de problemas combinatorios En administración de operaciones," *Revista EIA, ISSN 1794-1237*, vol. 8, pp. 99-115, Diciembre 2007.
- [42] J.V. Córdova García, E. Rodríguez Contreras S. M. Ramírez Campos, "Estimación del Frente de Pareto en un Caso Real de Planeación de Producción Discreta: Fase II," *Revista de la Ingeniería Industrial. ISSN 1940-2163*, 2009.
- [43] D. N.Vila Rosado. (2013, septiembre) "Frente de Pareto". Centro de Investigación en Matemáticas A.C. [Online].
<http://www.cimat.mx/~dnvr30/CursoMATLAB/Pareto/Pareto.doc>

- [44] D. Van Veldhuizen, "Multiobjective Evolutionary Algorithms: Classifications, Analysis, and New Innovations," *Ph.D. dissertation, School of Engineering, Air Force Institute of Technology*.
- [45] K. McFall y C. R. Dickerson R. Wells, "Task selection for increased mechanical exposure variation: relevance to job rotation," *Department of Kinesiology, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2010*.
- [46] F. Daniellou, "De la rotation sur les postes a la santeautravailssynthese du colloque « la rotation, est-ceune solution?," *LESC, ISPED, Université Bordeaux 2, 146 rueLéoSaignat, 2003*.
- [47] Michael L Pinedo, *Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems*. NewYork: 3, 2008.
- [48] S. J. Mirzapour Al-e-hashem, H. Malekly, A. Bozorgi-Amiri y M.B. Aryanejad V. Deljoo, "Applying multi objective modeling to create safe job rotation schedules based upon workers' skills and idleness," 2009.
- [49] S. Deivanayagam, M. M.Ayoub, y P. Mahajan, "A Job Severity Index for the Evaluation and Control of Lifting Injury", D. H. Liles, "Human Factors (Human Factors)," vol. 26, 1984.
- [50] M. S. Redfern y B. Norman. B. J. Carnahan, "Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search," *Auburn University, University of Pittsburgh, 2010*.
- [51] B. Green, B.J. Carnahan, yB. A. Norman W. Tharmmaphornphilas, "Applying mathematical modeling to create job rotation schedules for minimizing occupational noise exposure," 2010.
- [52] R. Norman, R. Wellsy P. Neumann M. Frazer, "Assessment of Physical Demands of Job Rotation: Is Injury Risk Really Reduced?," 1999.
- [53] W. Tharmmaphornphilas y B. A. Norman, "A methodology to create robust job rotation schedules," *Thailand and Usa, 2007*.
- [54] T. Laubli, U. Guggenbuhl y H. Krueger U. Hinnen, "Design of check-out systems including laser scanners for sitting work posture," *Scandinavian journal of work environment and health, 1992*.

- [55] A. Falardeau et N. Vézina, "Rotation des postes, assignation temporaire et impact des absences dans une usine d'abattage et de transformation du porc," *Centre de réadaptation La Maison Rouyn-Noranda, Chaire GM en ergonomie de l'Université du Québec à Montréal*, 2003.
- [56] N. Vézina, J. Chartrand, P. Perrier, et J. Malo S. Ouellet, "L'implantation de la rotation de postes: un exemple de démarche préalable," 2003.
- [57] A. Aublet-Cuvelier, et M. Aptel A. Gerling, "Comparaison De Deux Systèmes De Rotation De Postes Dans Le Cadre De La Prévention Des Troubles Musculosquelettiques," *Institut National de Recherche et de Sécurité Avenue de Bourgogne*, 2003.
- [58] N. Vézina, "Implantation de la rotation: quels sont les enjeux? Quelles sont les balises?," *Chaire GM en ergonomie de l'UQAM et CINBIOSE, Université du Québec à Montréal*, 2003.
- [59] M. A. Nussbaum et M. J. Agnew L. M. Horton, "Effects of rotation frequency and task order on localised muscle fatigue and performance during repetitive static shoulder exertions," 2012.
- [60] A. S. Khoirkhah, V. Deljoo et S. M. J. Mirzapour Al-e-hashem M. B. Aryanezhad, "Designing safe job rotation schedules based upon workers 'skills," 2008.
- [61] F. Daniellou et B. Dugué F. Coutarel, "Interroger l'organisation du travail au regard des marges de manoeuvre en conception et en fonctionnement: la rotation est-elle une solution aux TMS?," *Perspectives Inter disciplinaires sur le Travail et la Santé*, 2005.
- [62] J. Bhadury et Z. Radovitsky, "Job rotation using the multi-period assignment model," 2004.
- [63] M. Zandieh et H. Farsijani A. Ayough, "Two approaches to job rotation scheduling problem: considering employee's boredom," 2011.
- [64] B. Saeed-Zolfaghari et A. Ming-Liang A. Azizi, "Modeling job rotation in manufacturing systems: the study of employee's boredom and skill variations," 2009.

- [65] S. Jahandideh, "Job scheduling considering both mental fatigue and boredom," 2012.
- [66] N. Vézina, B. Dufour, Y. St-Jacques y E. Cloutier M. St-Vincent, "La rotation des postes: ce qu'en pensent des travailleurs d'une usine d'assemblage automobile," *Montréal, Québec*, 2003.
- [67] D. Müller, "On horns and halos: confirmatory bias and job rotation," *University of Bonn, Adenauerallee 24, Bonn, Germany*, 2011.
- [68] S. Asensio-Cuesta, M. A. Sánchez-Romero y M. A. Artacho-Ramirez J. A. Diego-Mas, "A multi-criteria genetic algorithm for the generation of job rotation schedules," *Departamento de Proyectos de Ingeniería, Universidad Politécnica de Valencia*, 2008.
- [69] S. U. Seckiner y M. Kurt, "Ant colony optimization for the job rotation scheduling problem," *Turkey*, 2008.
- [70] A. Otto y A. Scholl, "Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling," *Chair of Management Science, Friedrich-Schiller-University of Jena, Germany*, 2012.
- [71] W. Tharmmaphornphilas y B. A. Norman, "A Quantitative Method for Determining Proper Job Rotation Intervals," *Department of Industrial Engineering, University of Pittsburgh USA*, 2004.
- [72] Makris, y G. Mourtzis G. Michalos, "A web based tool for dynamic job rotation scheduling using multiple criteria," *Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, University of Patras, Patras, Greece*, 2011.
- [73] K. Davis, S. Kotowski, P. Aedla y K. Dunning M. Jorgensen, "Characteristics of job rotation in the Midwest US manufacturing sector," *Industrial and Manufacturing Engineering Department, Wichita State University, Wichita, KS, USA*, 2007.
- [74] A. Falardeau y N. Vézina, "Apport de différentes sources de données à la description comparée des contraintes et à l'amélioration d'un groupe de postes occupés en rotation," *Centre de réadaptation La Maison, Rouyn-Noranda, Chaire GM en ergonomie de l'Université*, 2004.

- [75] y Z. Taha S. Z. Dawal, "The effect of job organizational factors on job satisfaction in two automotive industries in Malaysia," *Department of Engineering Design and Manufacture, Faculty of Engineering University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaysia, 2007.*
- [76] H. An-tien y C. Hui-Yu, "A reassessment of the relationship between job specialization, job rotation and job burnout: example of Taiwan's high-technology industry," 2007.
- [77] y J. Moore L. Burke, "The reverberating effects of job rotation: a theoretical exploration of nonrotaters' fairness perceptions," 2000.
- [78] S. Makris, L. Rentzos y G. Chryssolouris G. Michalos, "'Dynamic job rotation for workload balancing in human based assembly systems," *Laboratory for Manufacturing Systems and Automation, Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, University, 2010.*
- [79] R. Norman, R. Wells y P. Neumann M. Frazer, "The effects of job rotation on the risk of reporting low back pain," 2003.
- [80] F. Daniellouy A. Nascimento R. Rocha, "La rotation et les stratégies collectives de préservation de la santé développées par des opérateurs d'une usine de boissons," *Université de Bordeaux, Conservatoire National des Arts et Métiers, 2003.*
- [81] L. M. L. M. Horton, "The Effects of Job Rotation Parameters on Localized Muscle Fatigue and Performance: An Investigation of Rotation Frequency and Task Order," 2012.
- [82] R. Filus y M. L. Okimorto, "The effect of job rotation intervals on muscle fatigue – lactic acid," 2012.
- [83] D. Brandt, "Reflections on Human-Centred Systems and Leadership," *Summer Academy SAC, Eger, Hungary, 2003.*
- [84] T. De Oliveira-Sato y H. J. C. Gil-Coury, "Evaluation of musculoskeletal health outcomes in the context of job rotation and multifunctional jobs," 2008.
- [85] K. McFall y C. R. Dickerson R. Wells, "Task selection for increased mechanical exposure variation: relevance to job rotation," *Department of*

Kinesiology, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2010.

- [86] J. Davis y D. Deepesh S. Walker, "Postural Assessments & Job Rotation," *Auburn University*, 2008.
- [87] B. Jonsson, "Electromyographic studies of job rotation. Scand J Work Environ Health," *Scandinavian Journal of Ambiente de Trabajo y Salud*, 1988.
- [88] S. M. Rainay C. R. Dickerson, "The influence of job rotation and task order on muscle fatigue: A deltoid example," *Faculty of Applied Health Sciences, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada*, 2008.
- [89] S. Casad, "Implications of job rotation literature for performance improvement practitioners," 2012.
- [90] T. Eriksson y J. Ortega, "The adoption of job rotation: testing the theories," 2001.
- [91] J. M. Allwood y W. L. Lee, "The impact of job rotation on problem solving skills: Institute for Manufacturing," *Department of Engineering, University of Cambridge, Mill Lane, Cambridge y Singapore Institute of Manufacturing Technology*, 2004.
- [92] W. H. K. De Vries, A. J. Van der Beek, J. H. Van Dieen, B. Vissery M. H. W. Frings-Dresen R. P. F. M. Kuijer, "Effect of Job Rotation on Work Demands, Workload, and Recovery of Refuse Truck Drivers and Collectors," *Netherlands*, 2004.
- [93] J. Maija y U. Tarja, "Job rotation in nursing: a study of job rotation among nursing personnel from the literature and via a questionnaire," *DOI: 10.1111/j.1365-2834.2004.00445.x.*, 2004.
- [94] Asensio Cuesta S, Diego-Mas J. A., and Canós-Darós L, "A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria," *Springer-Verlag London Limited*, 2011.

ANEXOS

Anexo 1. Metodología JSI

Primera variable: Intensidad del esfuerzo

Estimación cualitativa del esfuerzo necesario para realizar la tarea una vez. En función del esfuerzo percibido por el evaluador se asignará la valoración según la tabla.

Tabla 45. Intensidad del esfuerzo

Intensidad del esfuerzo	Esfuerzo percibido	Valoración
Ligero	Escasamente perceptible, esfuerzo relajado	1
Un poco duro	Esfuerzo perceptible	2
Duro	Esfuerzo obvio; sin cambio en la expresión facial	3
Muy duro	Esfuerzo importante; cambios en la expresión facial	4
Cercano al máximo	Uso de los hombros o tronco para generar fuerzas	5

Fuente: [30]

Segunda variable: Medición de la duración de los esfuerzos

La duración del esfuerzo se calcula midiendo la duración de todos los esfuerzos realizados por el trabajador durante el periodo de observación (generalmente un ciclo de trabajo). Se debe calcular el porcentaje de duración del esfuerzo respecto al tiempo total de observación. Para ello se suma la duración de todos los esfuerzos y el valor obtenido se divide entre el tiempo total de observación. Finalmente se multiplica el resultado por 100. Es necesario mantener la coherencia de las unidades de medida de tiempos.

% duración del esfuerzo = 100* duración de todos los esfuerzos/ tiempo de observación

Una vez calculado el porcentaje de duración se obtendrá la valoración correspondiente mediante la tabla 4.

Tabla 46. % de duración del esfuerzo

% Duración del esfuerzo	Valoración
<10%	1
10%-29%	2
30%-49	3
50%-79%	4
80%-100%	5

Fuente: MOORE, J.S. Y GARG, A., 1995, The Strain Index: A proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders. American Industrial Hygiene Association Journal, 56, pp 443-458

Tercera variable: Esfuerzos por minuto

Los esfuerzos por minuto se calculan contando el número de esfuerzos que realiza el trabajador durante el tiempo de observación y dividiendo este valor por la duración del periodo de observación medido en minutos. Es frecuente que el tiempo de observación coincida con el tiempo de ciclo.

Esfuerzos por minuto = número de esfuerzos / tiempo de observación (minutos). Una vez calculados los esfuerzos por minuto se obtendrá la valoración correspondiente mediante la tabla 5.

Tabla 47. Esfuerzos por minuto Postura mano-muñeca

Esfuerzos por minuto	Valoración
<4	1
4-8	2
9-14	3
15-19	4
>=20	5

Fuente: MOORE, J.S. Y GARG, A., 1995, The Strain Index: A proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders. American Industrial Hygiene Association Journal, 56, pp 443-458

Cuarta variable: Estimación de la posición anatómica de la mano.

Se evalúa la desviación de la muñeca respecto de la posición neutra, tanto en flexión-extensión como en desviación lateral. En función de la posición de la muñeca percibida por el evaluador se asignará la valoración según la tabla 6.

Tabla 48. Postura mano-muñeca Velocidad de trabajo

Postura muñeca	Extensión	Flexión	Desviación	Postura percibida	Valoración
Muy buena	0°-10°	0°-5°	0°-10°	Perfectamente neutral	1
Buena	11°-25°	6°-15°	11°-15°	Cercana a la neutral	2
Regular	26°-40°	16°-30°	16°-20°	No neutral	3
Mala	41°-55°	31°-50°	21°-25°	Desviación importante	4
Muy mala	>55°	>50°	>25°	Desviación extrema	5

Fuente: MOORE, J.S. Y GARG, A., 1995, The Strain Index: A proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders. American Industrial Hygiene Association Journal, 56, pp 443-458

Quinta variable: Estimación cualitativa de la velocidad con la que el trabajador realiza la tarea

En función del ritmo de trabajo percibido por el evaluador se asignará la valoración según la tabla 7.

Tabla 49. Velocidad de trabajo

Ritmo de trabajo	Velocidad percibida	Valoración
Muy lento	Ritmo extremadamente relajado	1
Lento	Ritmo lento	2
Regular	Velocidad de movimientos normal	3
Rápido	Ritmo impetuoso pero sostenible	4
Muy rápido	Ritmo impetuoso y prácticamente insostenible	5

Fuente: MOORE, J.S. Y GARG, A., 1995, The Strain Index: A proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders. American Industrial Hygiene Association Journal, 56, pp 443-458

Sexta variable: Duración de la tarea por día

Es el tiempo diario en horas que el trabajador dedica a la tarea específica analizada. La duración de la tarea por día puede ser medida directamente u obtener la información del personal implicado. Conocida la duración se obtendrá la valoración correspondiente mediante la tabla 8.

Tabla 50. Duración de la tarea por día

Duración de la tarea por	Valoración
<1	1
1-2	2
2-4	3
4-8	4
>=8	5

Calculo de los factores multiplicadores

Una vez establecida la valoración de las 6 variables puede determinarse el valor de los factores multiplicadores mediante la tabla 9.

Tabla 51. Cálculo de los factores multiplicadores

Intensidad del esfuerzo	
Valoración	IE
1	1
2	3
3	6
4	9
5	13

% de duración del esfuerzo	
Valoración	IE
1	0,5
2	1
3	1,5
4	2
5	3

Esfuerzos por minuto	
Valoración	EM
1	0,5
2	1
3	1,5
4	2
5	3

% postura mano-muñeca	
Valoración	HWP
1	1
2	1
3	1,5
4	2
5	3

Velocidad de trabajo	
Valoración	SW
1	1
2	1
3	1
4	1,5
5	2

Velocidad de trabajo	
Valoración	DD
1	0,25
2	0,5
3	0,75
4	1
5	1,5

Fuente: MOORE, J.S. Y GARG, A., 1995, The Strain Index: A proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders. American Industrial Hygiene Association Journal, 56, pp 443-458.

Anexo 2. Alfas MULTIOBJETIVO

Para la solución de los modelos se utilizaron pesos para cada función objetivo de modo de linializarla, los alfa son números entre 0 y 1, con un solo dígito después de la coma; cuya característica principal es que la suma de ellos debe ser igual a 1, las posibles combinaciones fueron encontradas utilizando el programa Statgraphics y una plantilla en Excel, estas son:

Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m1	0	0	0	0	1
m2	0	0	0	0,1	0,9
m3	0	0	0	0,2	0,8
m4	0	0	0	0,3	0,7
m5	0	0	0	0,4	0,6
m6	0	0	0	0,5	0,5
m7	0	0	0	0,6	0,4
m8	0	0	0	0,7	0,3
m9	0	0	0	0,8	0,2
m10	0	0	0	0,9	0,1
m11	0	0	0	1	0
m12	0	0	0,1	0	0,9
m13	0	0	0,1	0,1	0,8
m14	0	0	0,1	0,2	0,7
m15	0	0	0,1	0,3	0,6
m16	0	0	0,1	0,4	0,5
m17	0	0	0,1	0,5	0,4
m18	0	0	0,1	0,6	0,3
m19	0	0	0,1	0,7	0,2
m20	0	0	0,1	0,8	0,1
m21	0	0	0,1	0,9	0
m22	0	0	0,2	0	0,8
m23	0	0	0,2	0,1	0,7
m24	0	0	0,2	0,2	0,6
m25	0	0	0,2	0,3	0,5
m26	0	0	0,2	0,4	0,4
m27	0	0	0,2	0,5	0,3
m28	0	0	0,2	0,6	0,2
m29	0	0	0,2	0,7	0,1
m30	0	0	0,2	0,8	0
m31	0	0	0,3	0	0,7

m32	0	0	0,3	0,1	0,6
m33	0	0	0,3	0,2	0,5
m34	0	0	0,3	0,3	0,4
m35	0	0	0,3	0,4	0,3
m36	0	0	0,3	0,5	0,2
m37	0	0	0,3	0,6	0,1
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m38	0	0	0,3	0,7	0
m39	0	0	0,4	0	0,6
m40	0	0	0,4	0,1	0,5
m41	0	0	0,4	0,2	0,4
m42	0	0	0,4	0,3	0,3
m43	0	0	0,4	0,4	0,2
m44	0	0	0,4	0,5	0,1
m45	0	0	0,4	0,6	0
m46	0	0	0,5	0	0,5
m47	0	0	0,5	0,1	0,4
m48	0	0	0,5	0,2	0,3
m49	0	0	0,5	0,3	0,2
m50	0	0	0,5	0,4	0,1
m51	0	0	0,5	0,5	0
m52	0	0	0,6	0	0,4
m53	0	0	0,6	0,1	0,3
m54	0	0	0,6	0,2	0,2
m55	0	0	0,6	0,3	0,1
m56	0	0	0,6	0,4	0
m57	0	0	0,7	0	0,3
m58	0	0	0,7	0,1	0,2
m59	0	0	0,7	0,2	0,1
m60	0	0	0,7	0,3	0
m61	0	0	0,8	0	0,2
m62	0	0	0,8	0,1	0,1
m63	0	0	0,8	0,2	0
m64	0	0	0,9	0	0,1
m65	0	0	0,9	0,1	0
m66	0	0	1	0	0
m67	0	0,1	0	0	0,9
m68	0	0,1	0	0,1	0,8
m69	0	0,1	0	0,2	0,7
m70	0	0,1	0	0,3	0,6

m71	0	0,1	0	0,4	0,5
m72	0	0,1	0	0,5	0,4
m73	0	0,1	0	0,6	0,3
m74	0	0,1	0	0,7	0,2
m75	0	0,1	0	0,8	0,1
m76	0	0,1	0	0,9	0
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m77	0	0,1	0,1	0	0,8
m78	0	0,1	0,1	0,1	0,7
m79	0	0,1	0,1	0,2	0,6
m80	0	0,1	0,1	0,3	0,5
m81	0	0,1	0,1	0,4	0,4
m82	0	0,1	0,1	0,5	0,3
m83	0	0,1	0,1	0,6	0,2
m84	0	0,1	0,1	0,7	0,1
m85	0	0,1	0,1	0,8	0
m86	0	0,1	0,2	0	0,7
m87	0	0,1	0,2	0,1	0,6
m88	0	0,1	0,2	0,2	0,5
m89	0	0,1	0,2	0,3	0,4
m90	0	0,1	0,2	0,4	0,3
m91	0	0,1	0,2	0,5	0,2
m92	0	0,1	0,2	0,6	0,1
m93	0	0,1	0,2	0,7	0
m94	0	0,1	0,3	0	0,6
m95	0	0,1	0,3	0,1	0,5
m96	0	0,1	0,3	0,2	0,4
m97	0	0,1	0,3	0,3	0,3
m98	0	0,1	0,3	0,4	0,2
m99	0	0,1	0,3	0,5	0,1
m100	0	0,1	0,3	0,6	0
m101	0	0,1	0,4	0	0,5
m102	0	0,1	0,4	0,1	0,4
m103	0	0,1	0,4	0,2	0,3
m104	0	0,1	0,4	0,3	0,2
m105	0	0,1	0,4	0,4	0,1
m106	0	0,1	0,4	0,5	0
m107	0	0,1	0,5	0	0,4
m108	0	0,1	0,5	0,1	0,3
m109	0	0,1	0,5	0,2	0,2

m110	0	0,1	0,5	0,3	0,1
m111	0	0,1	0,5	0,4	0
m112	0	0,1	0,6	0	0,3
m113	0	0,1	0,6	0,1	0,2
m114	0	0,1	0,6	0,2	0,1
m115	0	0,1	0,6	0,3	0
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m116	0	0,1	0,7	0	0,2
m117	0	0,1	0,7	0,1	0,1
m118	0	0,1	0,7	0,2	0
m119	0	0,1	0,8	0	0,1
m120	0	0,1	0,8	0,1	0
m121	0	0,1	0,9	0	0
m122	0	0,2	0	0	0,8
m123	0	0,2	0	0,1	0,7
m124	0	0,2	0	0,2	0,6
m125	0	0,2	0	0,3	0,5
m126	0	0,2	0	0,4	0,4
m127	0	0,2	0	0,5	0,3
m128	0	0,2	0	0,6	0,2
m129	0	0,2	0	0,7	0,1
m130	0	0,2	0	0,8	0
m131	0	0,2	0,1	0	0,7
m132	0	0,2	0,1	0,1	0,6
m133	0	0,2	0,1	0,2	0,5
m134	0	0,2	0,1	0,3	0,4
m135	0	0,2	0,1	0,4	0,3
m136	0	0,2	0,1	0,5	0,2
m137	0	0,2	0,1	0,6	0,1
m138	0	0,2	0,1	0,7	0
m139	0	0,2	0,2	0	0,6
m140	0	0,2	0,2	0,1	0,5
m141	0	0,2	0,2	0,2	0,4
m142	0	0,2	0,2	0,3	0,3
m143	0	0,2	0,2	0,4	0,2
m144	0	0,2	0,2	0,5	0,1
m145	0	0,2	0,2	0,6	0
m146	0	0,2	0,3	0	0,5
m147	0	0,2	0,3	0,1	0,4
m148	0	0,2	0,3	0,2	0,3

m149	0	0,2	0,3	0,3	0,2
m150	0	0,2	0,3	0,4	0,1
m151	0	0,2	0,3	0,5	0
m152	0	0,2	0,4	0	0,4
m153	0	0,2	0,4	0,1	0,3
m154	0	0,2	0,4	0,2	0,2
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m155	0	0,2	0,4	0,3	0,1
m156	0	0,2	0,4	0,4	0
m157	0	0,2	0,5	0	0,3
m158	0	0,2	0,5	0,1	0,2
m159	0	0,2	0,5	0,2	0,1
m160	0	0,2	0,5	0,3	0
m161	0	0,2	0,6	0	0,2
m162	0	0,2	0,6	0,1	0,1
m163	0	0,2	0,6	0,2	0
m164	0	0,2	0,7	0	0,1
m165	0	0,2	0,7	0,1	0
m166	0	0,2	0,8	0	0
m167	0	0,3	0	0	0,7
m168	0	0,3	0	0,1	0,6
m169	0	0,3	0	0,2	0,5
m170	0	0,3	0	0,3	0,4
m171	0	0,3	0	0,4	0,3
m172	0	0,3	0	0,5	0,2
m173	0	0,3	0	0,6	0,1
m174	0	0,3	0	0,7	0
m175	0	0,3	0,1	0	0,6
m176	0	0,3	0,1	0,1	0,5
m177	0	0,3	0,1	0,2	0,4
m178	0	0,3	0,1	0,3	0,3
m179	0	0,3	0,1	0,4	0,2
m180	0	0,3	0,1	0,5	0,1
m181	0	0,3	0,1	0,6	0
m182	0	0,3	0,2	0	0,5
m183	0	0,3	0,2	0,1	0,4
m184	0	0,3	0,2	0,2	0,3
m185	0	0,3	0,2	0,3	0,2
m186	0	0,3	0,2	0,4	0,1
m187	0	0,3	0,2	0,5	0

m188	0	0,3	0,3	0	0,4
m189	0	0,3	0,3	0,1	0,3
m190	0	0,3	0,3	0,2	0,2
m191	0	0,3	0,3	0,3	0,1
m192	0	0,3	0,3	0,4	0
m193	0	0,3	0,4	0	0,3
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m194	0	0,3	0,4	0,1	0,2
m195	0	0,3	0,4	0,2	0,1
m196	0	0,3	0,4	0,3	0
m197	0	0,3	0,5	0	0,2
m198	0	0,3	0,5	0,1	0,1
m199	0	0,3	0,5	0,2	0
m200	0	0,3	0,6	0	0,1
m201	0	0,3	0,6	0,1	0
m202	0	0,3	0,7	0	0
m203	0	0,4	0	0	0,6
m204	0	0,4	0	0,1	0,5
m205	0	0,4	0	0,2	0,4
m206	0	0,4	0	0,3	0,3
m207	0	0,4	0	0,4	0,2
m208	0	0,4	0	0,5	0,1
m209	0	0,4	0	0,6	0
m210	0	0,4	0,1	0	0,5
m211	0	0,4	0,1	0,1	0,4
m212	0	0,4	0,1	0,2	0,3
m213	0	0,4	0,1	0,3	0,2
m214	0	0,4	0,1	0,4	0,1
m215	0	0,4	0,1	0,5	0
m216	0	0,4	0,2	0	0,4
m217	0	0,4	0,2	0,1	0,3
m218	0	0,4	0,2	0,2	0,2
m219	0	0,4	0,2	0,3	0,1
m220	0	0,4	0,2	0,4	0
m221	0	0,4	0,3	0	0,3
m222	0	0,4	0,3	0,1	0,2
m223	0	0,4	0,3	0,2	0,1
m224	0	0,4	0,3	0,3	0
m225	0	0,4	0,4	0	0,2
m226	0	0,4	0,4	0,1	0,1

m227	0	0,4	0,4	0,2	0
m228	0	0,4	0,5	0	0,1
m229	0	0,4	0,5	0,1	0
m230	0	0,4	0,6	0	0
m231	0	0,5	0	0	0,5
m232	0	0,5	0	0,1	0,4
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m233	0	0,5	0	0,2	0,3
m234	0	0,5	0	0,3	0,2
m235	0	0,5	0	0,4	0,1
m236	0	0,5	0	0,5	0
m237	0	0,5	0,1	0	0,4
m238	0	0,5	0,1	0,1	0,3
m239	0	0,5	0,1	0,2	0,2
m240	0	0,5	0,1	0,3	0,1
m241	0	0,5	0,1	0,4	0
m242	0	0,5	0,2	0	0,3
m243	0	0,5	0,2	0,1	0,2
m244	0	0,5	0,2	0,2	0,1
m245	0	0,5	0,2	0,3	0
m246	0	0,5	0,3	0	0,2
m247	0	0,5	0,3	0,1	0,1
m248	0	0,5	0,3	0,2	0
m249	0	0,5	0,4	0	0,1
m250	0	0,5	0,4	0,1	0
m251	0	0,5	0,5	0	0
m252	0	0,6	0	0	0,4
m253	0	0,6	0	0,1	0,3
m254	0	0,6	0	0,2	0,2
m255	0	0,6	0	0,3	0,1
m256	0	0,6	0	0,4	0
m257	0	0,6	0,1	0	0,3
m258	0	0,6	0,1	0,1	0,2
m259	0	0,6	0,1	0,2	0,1
m260	0	0,6	0,1	0,3	0
m261	0	0,6	0,2	0	0,2
m262	0	0,6	0,2	0,1	0,1
m263	0	0,6	0,2	0,2	0
m264	0	0,6	0,3	0	0,1
m265	0	0,6	0,3	0,1	0

m266	0	0,6	0,4	0	0
m267	0	0,7	0	0	0,3
m268	0	0,7	0	0,1	0,2
m269	0	0,7	0	0,2	0,1
m270	0	0,7	0	0,3	0
m271	0	0,7	0,1	0	0,2
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m272	0	0,7	0,1	0,1	0,1
m273	0	0,7	0,1	0,2	0
m274	0	0,7	0,2	0	0,1
m275	0	0,7	0,2	0,1	0
m276	0	0,7	0,3	0	0
m277	0	0,8	0	0	0,2
m278	0	0,8	0	0,1	0,1
m279	0	0,8	0	0,2	0
m280	0	0,8	0,1	0	0,1
m281	0	0,8	0,1	0,1	0
m282	0	0,8	0,2	0	0
m283	0	0,9	0	0	0,1
m284	0	0,9	0	0,1	0
m285	0	0,9	0,1	0	0
m286	0	1	0	0	0
m287	0,1	0	0	0	0,9
m288	0,1	0	0	0,1	0,8
m289	0,1	0	0	0,2	0,7
m290	0,1	0	0	0,3	0,6
m291	0,1	0	0	0,4	0,5
m292	0,1	0	0	0,5	0,4
m293	0,1	0	0	0,6	0,3
m294	0,1	0	0	0,7	0,2
m295	0,1	0	0	0,8	0,1
m296	0,1	0	0	0,9	0
m297	0,1	0	0,1	0	0,8
m298	0,1	0	0,1	0,1	0,7
m299	0,1	0	0,1	0,2	0,6
m300	0,1	0	0,1	0,3	0,5
m301	0,1	0	0,1	0,4	0,4
m302	0,1	0	0,1	0,5	0,3
m303	0,1	0	0,1	0,6	0,2
m304	0,1	0	0,1	0,7	0,1

m305	0,1	0	0,1	0,8	0
m306	0,1	0	0,2	0	0,7
m307	0,1	0	0,2	0,1	0,6
m308	0,1	0	0,2	0,2	0,5
m309	0,1	0	0,2	0,3	0,4
m310	0,1	0	0,2	0,4	0,3
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m311	0,1	0	0,2	0,5	0,2
m312	0,1	0	0,2	0,6	0,1
m313	0,1	0	0,2	0,7	0
m314	0,1	0	0,3	0	0,6
m315	0,1	0	0,3	0,1	0,5
m316	0,1	0	0,3	0,2	0,4
m317	0,1	0	0,3	0,3	0,3
m318	0,1	0	0,3	0,4	0,2
m319	0,1	0	0,3	0,5	0,1
m320	0,1	0	0,3	0,6	0
m321	0,1	0	0,4	0	0,5
m322	0,1	0	0,4	0,1	0,4
m323	0,1	0	0,4	0,2	0,3
m324	0,1	0	0,4	0,3	0,2
m325	0,1	0	0,4	0,4	0,1
m326	0,1	0	0,4	0,5	0
m327	0,1	0	0,5	0	0,4
m328	0,1	0	0,5	0,1	0,3
m329	0,1	0	0,5	0,2	0,2
m330	0,1	0	0,5	0,3	0,1
m331	0,1	0	0,5	0,4	0
m332	0,1	0	0,6	0	0,3
m333	0,1	0	0,6	0,1	0,2
m334	0,1	0	0,6	0,2	0,1
m335	0,1	0	0,6	0,3	0
m336	0,1	0	0,7	0	0,2
m337	0,1	0	0,7	0,1	0,1
m338	0,1	0	0,7	0,2	0
m339	0,1	0	0,8	0	0,1
m340	0,1	0	0,8	0,1	0
m341	0,1	0	0,9	0	0
m342	0,1	0,1	0	0	0,8
m343	0,1	0,1	0	0,1	0,7

m344	0,1	0,1	0	0,2	0,6
m345	0,1	0,1	0	0,3	0,5
m346	0,1	0,1	0	0,4	0,4
m347	0,1	0,1	0	0,5	0,3
m348	0,1	0,1	0	0,6	0,2
m349	0,1	0,1	0	0,7	0,1
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m350	0,1	0,1	0	0,8	0
m351	0,1	0,1	0,1	0	0,7
m352	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6
m353	0,1	0,1	0,1	0,2	0,5
m354	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4
m355	0,1	0,1	0,1	0,4	0,3
m356	0,1	0,1	0,1	0,5	0,2
m357	0,1	0,1	0,1	0,6	0,1
m358	0,1	0,1	0,1	0,7	0
m359	0,1	0,1	0,2	0	0,6
m360	0,1	0,1	0,2	0,1	0,5
m361	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4
m362	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3
m363	0,1	0,1	0,2	0,4	0,2
m364	0,1	0,1	0,2	0,5	0,1
m365	0,1	0,1	0,2	0,6	0
m366	0,1	0,1	0,3	0	0,5
m367	0,1	0,1	0,3	0,1	0,4
m368	0,1	0,1	0,3	0,2	0,3
m369	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2
m370	0,1	0,1	0,3	0,4	0,1
m371	0,1	0,1	0,3	0,5	0
m372	0,1	0,1	0,4	0	0,4
m373	0,1	0,1	0,4	0,1	0,3
m374	0,1	0,1	0,4	0,2	0,2
m375	0,1	0,1	0,4	0,3	0,1
m376	0,1	0,1	0,4	0,4	0
m377	0,1	0,1	0,5	0	0,3
m378	0,1	0,1	0,5	0,1	0,2
m379	0,1	0,1	0,5	0,2	0,1
m380	0,1	0,1	0,5	0,3	0
m381	0,1	0,1	0,6	0	0,2
m382	0,1	0,1	0,6	0,1	0,1

m383	0,1	0,1	0,6	0,2	0
m384	0,1	0,1	0,7	0	0,1
m385	0,1	0,1	0,7	0,1	0
m386	0,1	0,1	0,8	0	0
m387	0,1	0,2	0	0	0,7
m388	0,1	0,2	0	0,1	0,6
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m389	0,1	0,2	0	0,2	0,5
m390	0,1	0,2	0	0,3	0,4
m391	0,1	0,2	0	0,4	0,3
m392	0,1	0,2	0	0,5	0,2
m393	0,1	0,2	0	0,6	0,1
m394	0,1	0,2	0	0,7	0
m395	0,1	0,2	0,1	0	0,6
m396	0,1	0,2	0,1	0,1	0,5
m397	0,1	0,2	0,1	0,2	0,4
m398	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3
m399	0,1	0,2	0,1	0,4	0,2
m400	0,1	0,2	0,1	0,5	0,1
m401	0,1	0,2	0,1	0,6	0
m402	0,1	0,2	0,2	0	0,5
m403	0,1	0,2	0,2	0,1	0,4
m404	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
m405	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2
m406	0,1	0,2	0,2	0,4	0,1
m407	0,1	0,2	0,2	0,5	0
m408	0,1	0,2	0,3	0	0,4
m409	0,1	0,2	0,3	0,1	0,3
m410	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
m411	0,1	0,2	0,3	0,3	0,1
m412	0,1	0,2	0,3	0,4	0
m413	0,1	0,2	0,4	0	0,3
m414	0,1	0,2	0,4	0,1	0,2
m415	0,1	0,2	0,4	0,2	0,1
m416	0,1	0,2	0,4	0,3	0
m417	0,1	0,2	0,5	0	0,2
m418	0,1	0,2	0,5	0,1	0,1
m419	0,1	0,2	0,5	0,2	0
m420	0,1	0,2	0,6	0	0,1
m421	0,1	0,2	0,6	0,1	0

m422	0,1	0,2	0,7	0	0
m423	0,1	0,3	0	0	0,6
m424	0,1	0,3	0	0,1	0,5
m425	0,1	0,3	0	0,2	0,4
m426	0,1	0,3	0	0,3	0,3
m427	0,1	0,3	0	0,4	0,2
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m428	0,1	0,3	0	0,5	0,1
m429	0,1	0,3	0	0,6	0
m430	0,1	0,3	0,1	0	0,5
m431	0,1	0,3	0,1	0,1	0,4
m432	0,1	0,3	0,1	0,2	0,3
m433	0,1	0,3	0,1	0,3	0,2
m434	0,1	0,3	0,1	0,4	0,1
m435	0,1	0,3	0,1	0,5	0
m436	0,1	0,3	0,2	0	0,4
m437	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3
m438	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2
m439	0,1	0,3	0,2	0,3	0,1
m440	0,1	0,3	0,2	0,4	0
m441	0,1	0,3	0,3	0	0,3
m442	0,1	0,3	0,3	0,1	0,2
m443	0,1	0,3	0,3	0,2	0,1
m444	0,1	0,3	0,3	0,3	0
m445	0,1	0,3	0,4	0	0,2
m446	0,1	0,3	0,4	0,1	0,1
m447	0,1	0,3	0,4	0,2	0
m448	0,1	0,3	0,5	0	0,1
m449	0,1	0,3	0,5	0,1	0
m450	0,1	0,3	0,6	0	0
m451	0,1	0,4	0	0	0,5
m452	0,1	0,4	0	0,1	0,4
m453	0,1	0,4	0	0,2	0,3
m454	0,1	0,4	0	0,3	0,2
m455	0,1	0,4	0	0,4	0,1
m456	0,1	0,4	0	0,5	0
m457	0,1	0,4	0,1	0	0,4
m458	0,1	0,4	0,1	0,1	0,3
m459	0,1	0,4	0,1	0,2	0,2
m460	0,1	0,4	0,1	0,3	0,1

m461	0,1	0,4	0,1	0,4	0
m462	0,1	0,4	0,2	0	0,3
m463	0,1	0,4	0,2	0,1	0,2
m464	0,1	0,4	0,2	0,2	0,1
m465	0,1	0,4	0,2	0,3	0
m466	0,1	0,4	0,3	0	0,2
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m467	0,1	0,4	0,3	0,1	0,1
m468	0,1	0,4	0,3	0,2	0
m469	0,1	0,4	0,4	0	0,1
m470	0,1	0,4	0,4	0,1	0
m471	0,1	0,4	0,5	0	0
m472	0,1	0,5	0	0	0,4
m473	0,1	0,5	0	0,1	0,3
m474	0,1	0,5	0	0,2	0,2
m475	0,1	0,5	0	0,3	0,1
m476	0,1	0,5	0	0,4	0
m477	0,1	0,5	0,1	0	0,3
m478	0,1	0,5	0,1	0,1	0,2
m479	0,1	0,5	0,1	0,2	0,1
m480	0,1	0,5	0,1	0,3	0
m481	0,1	0,5	0,2	0	0,2
m482	0,1	0,5	0,2	0,1	0,1
m483	0,1	0,5	0,2	0,2	0
m484	0,1	0,5	0,3	0	0,1
m485	0,1	0,5	0,3	0,1	0
m486	0,1	0,5	0,4	0	0
m487	0,1	0,6	0	0	0,3
m488	0,1	0,6	0	0,1	0,2
m489	0,1	0,6	0	0,2	0,1
m490	0,1	0,6	0	0,3	0
m491	0,1	0,6	0,1	0	0,2
m492	0,1	0,6	0,1	0,1	0,1
m493	0,1	0,6	0,1	0,2	0
m494	0,1	0,6	0,2	0	0,1
m495	0,1	0,6	0,2	0,1	0
m496	0,1	0,6	0,3	0	0
m497	0,1	0,7	0	0	0,2
m498	0,1	0,7	0	0,1	0,1
m499	0,1	0,7	0	0,2	0

m500	0,1	0,7	0,1	0	0,1
m501	0,1	0,7	0,1	0,1	0
m502	0,1	0,7	0,2	0	0
m503	0,1	0,8	0	0	0,1
m504	0,1	0,8	0	0,1	0
m505	0,1	0,8	0,1	0	0
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m506	0,1	0,9	0	0	0
m507	0,2	0	0	0	0,8
m508	0,2	0	0	0,1	0,7
m509	0,2	0	0	0,2	0,6
m510	0,2	0	0	0,3	0,5
m511	0,2	0	0	0,4	0,4
m512	0,2	0	0	0,5	0,3
m513	0,2	0	0	0,6	0,2
m514	0,2	0	0	0,7	0,1
m515	0,2	0	0	0,8	0
m516	0,2	0	0,1	0	0,7
m517	0,2	0	0,1	0,1	0,6
m518	0,2	0	0,1	0,2	0,5
m519	0,2	0	0,1	0,3	0,4
m520	0,2	0	0,1	0,4	0,3
m521	0,2	0	0,1	0,5	0,2
m522	0,2	0	0,1	0,6	0,1
m523	0,2	0	0,1	0,7	0
m524	0,2	0	0,2	0	0,6
m525	0,2	0	0,2	0,1	0,5
m526	0,2	0	0,2	0,2	0,4
m527	0,2	0	0,2	0,3	0,3
m528	0,2	0	0,2	0,4	0,2
m529	0,2	0	0,2	0,5	0,1
m530	0,2	0	0,2	0,6	0
m531	0,2	0	0,3	0	0,5
m532	0,2	0	0,3	0,1	0,4
m533	0,2	0	0,3	0,2	0,3
m534	0,2	0	0,3	0,3	0,2
m535	0,2	0	0,3	0,4	0,1
m536	0,2	0	0,3	0,5	0
m537	0,2	0	0,4	0	0,4
m538	0,2	0	0,4	0,1	0,3

m539	0,2	0	0,4	0,2	0,2
m540	0,2	0	0,4	0,3	0,1
m541	0,2	0	0,4	0,4	0
m542	0,2	0	0,5	0	0,3
m543	0,2	0	0,5	0,1	0,2
m544	0,2	0	0,5	0,2	0,1
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m545	0,2	0	0,5	0,3	0
m546	0,2	0	0,6	0	0,2
m547	0,2	0	0,6	0,1	0,1
m548	0,2	0	0,6	0,2	0
m549	0,2	0	0,7	0	0,1
m550	0,2	0	0,7	0,1	0
m551	0,2	0	0,8	0	0
m552	0,2	0,1	0	0	0,7
m553	0,2	0,1	0	0,1	0,6
m554	0,2	0,1	0	0,2	0,5
m555	0,2	0,1	0	0,3	0,4
m556	0,2	0,1	0	0,4	0,3
m557	0,2	0,1	0	0,5	0,2
m558	0,2	0,1	0	0,6	0,1
m559	0,2	0,1	0	0,7	0
m560	0,2	0,1	0,1	0	0,6
m561	0,2	0,1	0,1	0,1	0,5
m562	0,2	0,1	0,1	0,2	0,4
m563	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3
m564	0,2	0,1	0,1	0,4	0,2
m565	0,2	0,1	0,1	0,5	0,1
m566	0,2	0,1	0,1	0,6	0
m567	0,2	0,1	0,2	0	0,5
m568	0,2	0,1	0,2	0,1	0,4
m569	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3
m570	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2
m571	0,2	0,1	0,2	0,4	0,1
m572	0,2	0,1	0,2	0,5	0
m573	0,2	0,1	0,3	0	0,4
m574	0,2	0,1	0,3	0,1	0,3
m575	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2
m576	0,2	0,1	0,3	0,3	0,1
m577	0,2	0,1	0,3	0,4	0

m578	0,2	0,1	0,4	0	0,3
m579	0,2	0,1	0,4	0,1	0,2
m580	0,2	0,1	0,4	0,2	0,1
m581	0,2	0,1	0,4	0,3	0
m582	0,2	0,1	0,5	0	0,2
m583	0,2	0,1	0,5	0,1	0,1
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m584	0,2	0,1	0,5	0,2	0
m585	0,2	0,1	0,6	0	0,1
m586	0,2	0,1	0,6	0,1	0
m587	0,2	0,1	0,7	0	0
m588	0,2	0,2	0	0	0,6
m589	0,2	0,2	0	0,1	0,5
m590	0,2	0,2	0	0,2	0,4
m591	0,2	0,2	0	0,3	0,3
m592	0,2	0,2	0	0,4	0,2
m593	0,2	0,2	0	0,5	0,1
m594	0,2	0,2	0	0,6	0
m595	0,2	0,2	0,1	0	0,5
m596	0,2	0,2	0,1	0,1	0,4
m597	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3
m598	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2
m599	0,2	0,2	0,1	0,4	0,1
m600	0,2	0,2	0,1	0,5	0
m601	0,2	0,2	0,2	0	0,4
m602	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3
m603	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
m604	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1
m605	0,2	0,2	0,2	0,4	0
m606	0,2	0,2	0,3	0	0,3
m607	0,2	0,2	0,3	0,1	0,2
m608	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1
m609	0,2	0,2	0,3	0,3	0
m610	0,2	0,2	0,4	0	0,2
m611	0,2	0,2	0,4	0,1	0,1
m612	0,2	0,2	0,4	0,2	0
m613	0,2	0,2	0,5	0	0,1
m614	0,2	0,2	0,5	0,1	0
m615	0,2	0,2	0,6	0	0
m616	0,2	0,3	0	0	0,5

m617	0,2	0,3	0	0,1	0,4
m618	0,2	0,3	0	0,2	0,3
m619	0,2	0,3	0	0,3	0,2
m620	0,2	0,3	0	0,4	0,1
m621	0,2	0,3	0	0,5	0
m622	0,2	0,3	0,1	0	0,4
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m623	0,2	0,3	0,1	0,1	0,3
m624	0,2	0,3	0,1	0,2	0,2
m625	0,2	0,3	0,1	0,3	0,1
m626	0,2	0,3	0,1	0,4	0
m627	0,2	0,3	0,2	0	0,3
m628	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2
m629	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1
m630	0,2	0,3	0,2	0,3	0
m631	0,2	0,3	0,3	0	0,2
m632	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1
m633	0,2	0,3	0,3	0,2	0
m634	0,2	0,3	0,4	0	0,1
m635	0,2	0,3	0,4	0,1	0
m636	0,2	0,3	0,5	0	0
m637	0,2	0,4	0	0	0,4
m638	0,2	0,4	0	0,1	0,3
m639	0,2	0,4	0	0,2	0,2
m640	0,2	0,4	0	0,3	0,1
m641	0,2	0,4	0	0,4	0
m642	0,2	0,4	0,1	0	0,3
m643	0,2	0,4	0,1	0,1	0,2
m644	0,2	0,4	0,1	0,2	0,1
m645	0,2	0,4	0,1	0,3	0
m646	0,2	0,4	0,2	0	0,2
m647	0,2	0,4	0,2	0,1	0,1
m648	0,2	0,4	0,2	0,2	0
m649	0,2	0,4	0,3	0	0,1
m650	0,2	0,4	0,3	0,1	0
m651	0,2	0,4	0,4	0	0
m652	0,2	0,5	0	0	0,3
m653	0,2	0,5	0	0,1	0,2
m654	0,2	0,5	0	0,2	0,1
m655	0,2	0,5	0	0,3	0

m656	0,2	0,5	0,1	0	0,2
m657	0,2	0,5	0,1	0,1	0,1
m658	0,2	0,5	0,1	0,2	0
m659	0,2	0,5	0,2	0	0,1
m660	0,2	0,5	0,2	0,1	0
m661	0,2	0,5	0,3	0	0
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m662	0,2	0,6	0	0	0,2
m663	0,2	0,6	0	0,1	0,1
m664	0,2	0,6	0	0,2	0
m665	0,2	0,6	0,1	0	0,1
m666	0,2	0,6	0,1	0,1	0
m667	0,2	0,6	0,2	0	0
m668	0,2	0,7	0	0	0,1
m669	0,2	0,7	0	0,1	0
m670	0,2	0,7	0,1	0	0
m671	0,2	0,8	0	0	0
m672	0,3	0	0	0	0,7
m673	0,3	0	0	0,1	0,6
m674	0,3	0	0	0,2	0,5
m675	0,3	0	0	0,3	0,4
m676	0,3	0	0	0,4	0,3
m677	0,3	0	0	0,5	0,2
m678	0,3	0	0	0,6	0,1
m679	0,3	0	0	0,7	0
m680	0,3	0	0,1	0	0,6
m681	0,3	0	0,1	0,1	0,5
m682	0,3	0	0,1	0,2	0,4
m683	0,3	0	0,1	0,3	0,3
m684	0,3	0	0,1	0,4	0,2
m685	0,3	0	0,1	0,5	0,1
m686	0,3	0	0,1	0,6	0
m687	0,3	0	0,2	0	0,5
m688	0,3	0	0,2	0,1	0,4
m689	0,3	0	0,2	0,2	0,3
m690	0,3	0	0,2	0,3	0,2
m691	0,3	0	0,2	0,4	0,1
m692	0,3	0	0,2	0,5	0
m693	0,3	0	0,3	0	0,4
m694	0,3	0	0,3	0,1	0,3

m695	0,3	0	0,3	0,2	0,2
m696	0,3	0	0,3	0,3	0,1
m697	0,3	0	0,3	0,4	0
m698	0,3	0	0,4	0	0,3
m699	0,3	0	0,4	0,1	0,2
m700	0,3	0	0,4	0,2	0,1
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m701	0,3	0	0,4	0,3	0
m702	0,3	0	0,5	0	0,2
m703	0,3	0	0,5	0,1	0,1
m704	0,3	0	0,5	0,2	0
m705	0,3	0	0,6	0	0,1
m706	0,3	0	0,6	0,1	0
m707	0,3	0	0,7	0	0
m708	0,3	0,1	0	0	0,6
m709	0,3	0,1	0	0,1	0,5
m710	0,3	0,1	0	0,2	0,4
m711	0,3	0,1	0	0,3	0,3
m712	0,3	0,1	0	0,4	0,2
m713	0,3	0,1	0	0,5	0,1
m714	0,3	0,1	0	0,6	0
m715	0,3	0,1	0,1	0	0,5
m716	0,3	0,1	0,1	0,1	0,4
m717	0,3	0,1	0,1	0,2	0,3
m718	0,3	0,1	0,1	0,3	0,2
m719	0,3	0,1	0,1	0,4	0,1
m720	0,3	0,1	0,1	0,5	0
m721	0,3	0,1	0,2	0	0,4
m722	0,3	0,1	0,2	0,1	0,3
m723	0,3	0,1	0,2	0,2	0,2
m724	0,3	0,1	0,2	0,3	0,1
m725	0,3	0,1	0,2	0,4	0
m726	0,3	0,1	0,3	0	0,3
m727	0,3	0,1	0,3	0,1	0,2
m728	0,3	0,1	0,3	0,2	0,1
m729	0,3	0,1	0,3	0,3	0
m730	0,3	0,1	0,4	0	0,2
m731	0,3	0,1	0,4	0,1	0,1
m732	0,3	0,1	0,4	0,2	0
m733	0,3	0,1	0,5	0	0,1

m734	0,3	0,1	0,5	0,1	0
m735	0,3	0,1	0,6	0	0
m736	0,3	0,2	0	0	0,5
m737	0,3	0,2	0	0,1	0,4
m738	0,3	0,2	0	0,2	0,3
m739	0,3	0,2	0	0,3	0,2
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m740	0,3	0,2	0	0,4	0,1
m741	0,3	0,2	0	0,5	0
m742	0,3	0,2	0,1	0	0,4
m743	0,3	0,2	0,1	0,1	0,3
m744	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2
m745	0,3	0,2	0,1	0,3	0,1
m746	0,3	0,2	0,1	0,4	0
m747	0,3	0,2	0,2	0	0,3
m748	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2
m749	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1
m750	0,3	0,2	0,2	0,3	0
m751	0,3	0,2	0,3	0	0,2
m752	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1
m753	0,3	0,2	0,3	0,2	0
m754	0,3	0,2	0,4	0	0,1
m755	0,3	0,2	0,4	0,1	0
m756	0,3	0,2	0,5	0	0
m757	0,3	0,3	0	0	0,4
m758	0,3	0,3	0	0,1	0,3
m759	0,3	0,3	0	0,2	0,2
m760	0,3	0,3	0	0,3	0,1
m761	0,3	0,3	0	0,4	0
m762	0,3	0,3	0,1	0	0,3
m763	0,3	0,3	0,1	0,1	0,2
m764	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1
m765	0,3	0,3	0,1	0,3	0
m766	0,3	0,3	0,2	0	0,2
m767	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1
m768	0,3	0,3	0,2	0,2	0
m769	0,3	0,3	0,3	0	0,1
m770	0,3	0,3	0,3	0,1	0
m771	0,3	0,3	0,4	0	0
m772	0,3	0,4	0	0	0,3

m773	0,3	0,4	0	0,1	0,2
m774	0,3	0,4	0	0,2	0,1
m775	0,3	0,4	0	0,3	0
m776	0,3	0,4	0,1	0	0,2
m777	0,3	0,4	0,1	0,1	0,1
m778	0,3	0,4	0,1	0,2	0
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m779	0,3	0,4	0,2	0	0,1
m780	0,3	0,4	0,2	0,1	0
m781	0,3	0,4	0,3	0	0
m782	0,3	0,5	0	0	0,2
m783	0,3	0,5	0	0,1	0,1
m784	0,3	0,5	0	0,2	0
m785	0,3	0,5	0,1	0	0,1
m786	0,3	0,5	0,1	0,1	0
m787	0,3	0,5	0,2	0	0
m788	0,3	0,6	0	0	0,1
m789	0,3	0,6	0	0,1	0
m790	0,3	0,6	0,1	0	0
m791	0,3	0,7	0	0	0
m792	0,4	0	0	0	0,6
m793	0,4	0	0	0,1	0,5
m794	0,4	0	0	0,2	0,4
m795	0,4	0	0	0,3	0,3
m796	0,4	0	0	0,4	0,2
m797	0,4	0	0	0,5	0,1
m798	0,4	0	0	0,6	0
m799	0,4	0	0,1	0	0,5
m800	0,4	0	0,1	0,1	0,4
m801	0,4	0	0,1	0,2	0,3
m802	0,4	0	0,1	0,3	0,2
m803	0,4	0	0,1	0,4	0,1
m804	0,4	0	0,1	0,5	0
m805	0,4	0	0,2	0	0,4
m806	0,4	0	0,2	0,1	0,3
m807	0,4	0	0,2	0,2	0,2
m808	0,4	0	0,2	0,3	0,1
m809	0,4	0	0,2	0,4	0
m810	0,4	0	0,3	0	0,3
m811	0,4	0	0,3	0,1	0,2

m812	0,4	0	0,3	0,2	0,1
m813	0,4	0	0,3	0,3	0
m814	0,4	0	0,4	0	0,2
m815	0,4	0	0,4	0,1	0,1
m816	0,4	0	0,4	0,2	0
m817	0,4	0	0,5	0	0,1
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m818	0,4	0	0,5	0,1	0
m819	0,4	0	0,6	0	0
m820	0,4	0,1	0	0	0,5
m821	0,4	0,1	0	0,1	0,4
m822	0,4	0,1	0	0,2	0,3
m823	0,4	0,1	0	0,3	0,2
m824	0,4	0,1	0	0,4	0,1
m825	0,4	0,1	0	0,5	0
m826	0,4	0,1	0,1	0	0,4
m827	0,4	0,1	0,1	0,1	0,3
m828	0,4	0,1	0,1	0,2	0,2
m829	0,4	0,1	0,1	0,3	0,1
m830	0,4	0,1	0,1	0,4	0
m831	0,4	0,1	0,2	0	0,3
m832	0,4	0,1	0,2	0,1	0,2
m833	0,4	0,1	0,2	0,2	0,1
m834	0,4	0,1	0,2	0,3	0
m835	0,4	0,1	0,3	0	0,2
m836	0,4	0,1	0,3	0,1	0,1
m837	0,4	0,1	0,3	0,2	0
m838	0,4	0,1	0,4	0	0,1
m839	0,4	0,1	0,4	0,1	0
m840	0,4	0,1	0,5	0	0
m841	0,4	0,2	0	0	0,4
m842	0,4	0,2	0	0,1	0,3
m843	0,4	0,2	0	0,2	0,2
m844	0,4	0,2	0	0,3	0,1
m845	0,4	0,2	0	0,4	0
m846	0,4	0,2	0,1	0	0,3
m847	0,4	0,2	0,1	0,1	0,2
m848	0,4	0,2	0,1	0,2	0,1
m849	0,4	0,2	0,1	0,3	0
m850	0,4	0,2	0,2	0	0,2

m851	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1
m852	0,4	0,2	0,2	0,2	0
m853	0,4	0,2	0,3	0	0,1
m854	0,4	0,2	0,3	0,1	0
m855	0,4	0,2	0,4	0	0
m856	0,4	0,3	0	0	0,3
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m857	0,4	0,3	0	0,1	0,2
m858	0,4	0,3	0	0,2	0,1
m859	0,4	0,3	0	0,3	0
m860	0,4	0,3	0,1	0	0,2
m861	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1
m862	0,4	0,3	0,1	0,2	0
m863	0,4	0,3	0,2	0	0,1
m864	0,4	0,3	0,2	0,1	0
m865	0,4	0,3	0,3	0	0
m866	0,4	0,4	0	0	0,2
m867	0,4	0,4	0	0,1	0,1
m868	0,4	0,4	0	0,2	0
m869	0,4	0,4	0,1	0	0,1
m870	0,4	0,4	0,1	0,1	0
m871	0,4	0,4	0,2	0	0
m872	0,4	0,5	0	0	0,1
m873	0,4	0,5	0	0,1	0
m874	0,4	0,5	0,1	0	0
m875	0,4	0,6	0	0	0
m876	0,5	0	0	0	0,5
m877	0,5	0	0	0,1	0,4
m878	0,5	0	0	0,2	0,3
m879	0,5	0	0	0,3	0,2
m880	0,5	0	0	0,4	0,1
m881	0,5	0	0	0,5	0
m882	0,5	0	0,1	0	0,4
m883	0,5	0	0,1	0,1	0,3
m884	0,5	0	0,1	0,2	0,2
m885	0,5	0	0,1	0,3	0,1
m886	0,5	0	0,1	0,4	0
m887	0,5	0	0,2	0	0,3
m888	0,5	0	0,2	0,1	0,2
m889	0,5	0	0,2	0,2	0,1

m890	0,5	0	0,2	0,3	0
m891	0,5	0	0,3	0	0,2
m892	0,5	0	0,3	0,1	0,1
m893	0,5	0	0,3	0,2	0
m894	0,5	0	0,4	0	0,1
m895	0,5	0	0,4	0,1	0
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m896	0,5	0	0,5	0	0
m897	0,5	0,1	0	0	0,4
m898	0,5	0,1	0	0,1	0,3
m899	0,5	0,1	0	0,2	0,2
m900	0,5	0,1	0	0,3	0,1
m901	0,5	0,1	0	0,4	0
m902	0,5	0,1	0,1	0	0,3
m903	0,5	0,1	0,1	0,1	0,2
m904	0,5	0,1	0,1	0,2	0,1
m905	0,5	0,1	0,1	0,3	0
m906	0,5	0,1	0,2	0	0,2
m907	0,5	0,1	0,2	0,1	0,1
m908	0,5	0,1	0,2	0,2	0
m909	0,5	0,1	0,3	0	0,1
m910	0,5	0,1	0,3	0,1	0
m911	0,5	0,1	0,4	0	0
m912	0,5	0,2	0	0	0,3
m913	0,5	0,2	0	0,1	0,2
m914	0,5	0,2	0	0,2	0,1
m915	0,5	0,2	0	0,3	0
m916	0,5	0,2	0,1	0	0,2
m917	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1
m918	0,5	0,2	0,1	0,2	0
m919	0,5	0,2	0,2	0	0,1
m920	0,5	0,2	0,2	0,1	0
m921	0,5	0,2	0,3	0	0
m922	0,5	0,3	0	0	0,2
m923	0,5	0,3	0	0,1	0,1
m924	0,5	0,3	0	0,2	0
m925	0,5	0,3	0,1	0	0,1
m926	0,5	0,3	0,1	0,1	0
m927	0,5	0,3	0,2	0	0
m928	0,5	0,4	0	0	0,1

m929	0,5	0,4	0	0,1	0
m930	0,5	0,4	0,1	0	0
m931	0,5	0,5	0	0	0
m932	0,6	0	0	0	0,4
m933	0,6	0	0	0,1	0,3
m934	0,6	0	0	0,2	0,2
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m935	0,6	0	0	0,3	0,1
m936	0,6	0	0	0,4	0
m937	0,6	0	0,1	0	0,3
m938	0,6	0	0,1	0,1	0,2
m939	0,6	0	0,1	0,2	0,1
m940	0,6	0	0,1	0,3	0
m941	0,6	0	0,2	0	0,2
m942	0,6	0	0,2	0,1	0,1
m943	0,6	0	0,2	0,2	0
m944	0,6	0	0,3	0	0,1
m945	0,6	0	0,3	0,1	0
m946	0,6	0	0,4	0	0
m947	0,6	0,1	0	0	0,3
m948	0,6	0,1	0	0,1	0,2
m949	0,6	0,1	0	0,2	0,1
m950	0,6	0,1	0	0,3	0
m951	0,6	0,1	0,1	0	0,2
m952	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1
m953	0,6	0,1	0,1	0,2	0
m954	0,6	0,1	0,2	0	0,1
m955	0,6	0,1	0,2	0,1	0
m956	0,6	0,1	0,3	0	0
m957	0,6	0,2	0	0	0,2
m958	0,6	0,2	0	0,1	0,1
m959	0,6	0,2	0	0,2	0
m960	0,6	0,2	0,1	0	0,1
m961	0,6	0,2	0,1	0,1	0
m962	0,6	0,2	0,2	0	0
m963	0,6	0,3	0	0	0,1
m964	0,6	0,3	0	0,1	0
m965	0,6	0,3	0,1	0	0
m966	0,6	0,4	0	0	0
m967	0,7	0	0	0	0,3

m968	0,7	0	0	0,1	0,2
m969	0,7	0	0	0,2	0,1
m970	0,7	0	0	0,3	0
m971	0,7	0	0,1	0	0,2
m972	0,7	0	0,1	0,1	0,1
m973	0,7	0	0,1	0,2	0
Modelos	alfa1	Alfa 2	alfa3	Alfa 4	Alfa 5
m974	0,7	0	0,2	0	0,1
m975	0,7	0	0,2	0,1	0
m976	0,7	0	0,3	0	0
m977	0,7	0,1	0	0	0,2
m978	0,7	0,1	0	0,1	0,1
m979	0,7	0,1	0	0,2	0
m980	0,7	0,1	0,1	0	0,1
m981	0,7	0,1	0,1	0,1	0
m982	0,7	0,1	0,2	0	0
m983	0,7	0,2	0	0	0,1
m984	0,7	0,2	0	0,1	0
m985	0,7	0,2	0,1	0	0
m986	0,7	0,3	0	0	0
m987	0,8	0	0	0	0,2
m988	0,8	0	0	0,1	0,1
m989	0,8	0	0	0,2	0
m990	0,8	0	0,1	0	0,1
m991	0,8	0	0,1	0,1	0
m992	0,8	0	0,2	0	0
m993	0,8	0,1	0	0	0,1
m994	0,8	0,1	0	0,1	0
m995	0,8	0,1	0,1	0	0
m996	0,8	0,2	0	0	0
m997	0,9	0	0	0	0,1
m998	0,9	0	0	0,1	0
m999	0,9	0	0,1	0	0
m1000	0,9	0,1	0	0	0
m1001	1	0	0	0	0

Anexo 3. Parámetros para las instancias de validación

Los datos suministrados por la empresa son:

Puesto de trabajo	Valores para los riesgo físicos y ergonómicos				
	Reba	jsi	ruido	Temp	Luxes
N°					
1	12	1	78,6	30	347
2	11	3	76,3	30	347
3	4	1	71,6	30	2500
4	6	1	80,5	30	327
5	7	1	82	30	327
6	11	3	71,1	30	347
7	10	3	72,2	30	347
8	12	3	76,9	30	327
9	13	1	71,6	30	327
10	10	3	76,9	31,17	280
11	6	1	71,6	30	2500
12	7	1	71,6	31,99	467
13	8	0,25	71,6	30	214

Anexo 4. Pruebas experimentales

Se corrió la metaheurística PSO, con las combinaciones de parámetros, luego se obtuvo la participación (ranking de posición) en el frente de Pareto real de cada uno de ellos, como se muestra:

c1	c2	vmax	wmax	wmin	Posición en el PF-true (ranking)
0,3	0,2	1	0,4	0,2	1
0,3	0,2	1	0,4	0,3	2
0,3	0,2	1	0,4	0,4	3
0,3	0,2	1	0,4	0,5	4
0,3	0,2	1	0,4	0,6	5
0,3	0,2	1	0,4	0,7	6
0,3	0,2	1	0,4	0,8	7
0,3	0,2	1	0,4	0,9	8
0,3	0,2	1	0,4	1	9
0,3	0,2	1	0,5	0,1	10
0,3	0,2	1	0,5	0,2	11
0,3	0,2	1	0,5	0,3	12
0,3	0,2	1	0,5	0,4	13
0,3	0,2	1	0,5	0,5	14
0,3	0,2	1	0,5	0,6	15
0,3	0,2	1	0,5	0,7	16
0,3	0,2	1	0,5	0,8	17
0,3	0,2	1	0,5	0,9	18
0,3	0,2	1	0,5	1	19
0,3	0,2	1	0,6	0,1	20
0,3	0,2	1	0,6	0,2	21
0,3	0,2	1	0,7	0,3	22
0,3	0,2	1	0,7	0,4	23
0,3	0,2	1	0,7	0,5	24
0,3	0,2	1	0,7	0,6	25
0,3	0,2	1	0,7	0,7	26
0,3	0,2	1	0,7	0,8	27
0,3	0,2	1	0,7	0,9	28
0,3	0,2	1	0,7	1	29
0,3	0,2	1	0,8	0,1	30
0,3	0,2	1	0,8	0,2	31
0,3	0,2	1	0,8	0,3	32

0,3	0,2	1	0,8	0,4	33
0,3	0,2	1	0,8	0,5	34
0,3	0,2	1	0,8	0,6	35
0,3	0,2	1	0,8	0,7	36
0,3	0,2	1	0,8	0,8	37
0,3	0,2	1	0,8	0,9	38
0,3	0,2	1	0,8	1	39
0,3	0,2	1	0,9	0,1	40
0,3	0,2	1	0,9	0,2	41
0,3	0,2	1	0,9	0,3	42
0,3	0,2	1	0,9	0,4	43
0,3	0,2	1	0,9	0,5	44
0,3	0,2	1	0,9	0,6	45
0,3	0,2	1	0,9	0,7	46
0,3	0,2	1	0,9	0,8	47
0,3	0,2	1	0,9	0,9	48
0,3	0,2	1	0,9	1	49
0,3	0,2	1	1	0,1	50

Se tomaron los primero 20 con más participación en el frente:

c1	c2	vmax	wmax	wmin	Posición en el PF-true (ranking)
0,3	0,2	1	0,4	0,2	1
0,3	0,2	1	0,4	0,3	2
0,3	0,2	1	0,4	0,4	3
0,3	0,2	1	0,4	0,5	4
0,3	0,2	1	0,4	0,6	5
0,3	0,2	1	0,4	0,7	6
0,3	0,2	1	0,4	0,8	7
0,3	0,2	1	0,4	0,9	8
0,3	0,2	1	0,4	1	9
0,3	0,2	1	0,5	0,1	10
0,3	0,2	1	0,5	0,2	11
0,3	0,2	1	0,5	0,3	12
0,3	0,2	1	0,5	0,4	13
0,3	0,2	1	0,5	0,5	14

0,3	0,2	1	0,5	0,6	15
0,3	0,2	1	0,5	0,7	16
0,3	0,2	1	0,5	0,8	17
0,3	0,2	1	0,5	0,9	18
0,3	0,2	1	0,5	1	19
0,3	0,2	1	0,6	0,1	20

Entre los seleccionados se realizó de nuevo corridas para ver entre ellos, cual mostraba mejor participación, se tomaron los primeros 10, obteniéndose lo siguiente:

c1	c2	vmax	wmax	wmin	Posición en el PF-true (ranking)
0,3	0,2	1	0,5	1	1
0,3	0,2	1	0,5	0,9	2
0,3	0,2	1	0,4	0,5	3
0,3	0,2	1	0,4	0,6	4
0,3	0,2	1	0,4	0,7	5
0,3	0,2	1	0,4	0,8	6
0,3	0,2	1	0,4	0,9	7
0,3	0,2	1	0,4	1	8
0,3	0,2	1	0,5	0,1	9
0,3	0,2	1	0,5	0,2	10

Finalmente se volvió a realizar ranking entre ellos, obteniendo que el siguiente grupo de paramentos es el que mejor se comportó en las pruebas experimentales:

c1	c2	vmax	wmax	wmin	Posición en el PF-true (ranking)
0,3	0,2	1	0,5	1	1

Anexo 5. Parámetros para las instancias de experimentación, 15 trabajadores en todos los posibles turnos de rotación

La generación de las instancias experimentales fue ejecutada en Matlab, con la función

```
par=random('unif',a,b,Nfila,Ncolumna);
```

Donde

a : valor mínimo

b : valor máximo

Nfila: número de filas de la entrega de datos

Ncolumna : número de columnas de la entrega de datos

	DOSIS RUIDO (K2)	DOSIS RUIDO (K3)	DOSIS RUIDO (K4)	JSI	REBA	TEMP	LUX
job1	0,157490131	0,104993421	0,078745066	8	7	31	1768
job2	0,0625	0,041666667	0,03125	7	10	31	436
job3	0,396850263	0,264566842	0,198425131	7	8	31	1262
job4	0,5	0,333333333	0,25	1	11	31	2209
job5	0,099212566	0,06614171	0,049606283	4	10	31	604
job6	0,198425131	0,132283421	0,099212566	7	10	31	1179
job7	0,198425131	0,132283421	0,099212566	7	8	32	2124
job8	0,0625	0,041666667	0,03125	8	7	31	1535
job9	0,314980262	0,209986842	0,157490131	10	9	31	1117
job10	0,125	0,083333333	0,0625	5	7	32	360
job11	0,793700526	0,529133684	0,396850263	5	10	32	797
job12	0,396850263	0,264566842	0,198425131	9	6	31	692
job13	0,629960525	0,419973683	0,314980262	5	9	31	1143
job14	0,078745066	0,05249671	0,039372533	3	7	32	987
job15	0,049606283	0,033070855	0,024803141	10	12	30	1322

Anexo 6. Parámetros para las instancias de experimentación, 20 trabajadores en todos los posibles turnos de rotación

La generación de las instancias experimentales fue ejecutada en Matlab, con la función

```
par=random('unif',a,b,Nfila,Ncolumna);
```

Donde

a : valor mínimo

b : valor máximo

Nfila: número de filas de la entrega de datos

Ncolumna : número de columnas de la entrega de datos

	DOSIS RUIDO (K2)	DOSIS RUIDO (K3)	DOSIS RUIDO (K4)	JSI	REBA	TEMP	LUX
job1	0,03125	0,020833333	0,015625	2	6	32	403
job2	0,039372533	0,026248355	0,019686266	10	7	30	659
job3	0,198425131	0,132283421	0,099212566	3	10	31	1975
job4	0,629960525	0,419973683	0,314980262	6	13	31	1463
job5	0,049606283	0,033070855	0,024803141	4	8	30	1289
job6	0,099212566	0,06614171	0,049606283	5	6	30	1427
job7	0,0625	0,041666667	0,03125	4	13	32	609
job8	0,024803141	0,016535428	0,012401571	4	7	32	1689
job9	0,5	0,333333333	0,25	10	10	32	2453
job10	0,25	0,166666667	0,125	9	10	32	1504
job11	0,793700526	0,529133684	0,396850263	1	8	32	649
job12	0,5	0,333333333	0,25	3	6	32	623
job13	0,157490131	0,104993421	0,078745066	9	7	31	917
job14	0,078745066	0,05249671	0,039372533	5	9	30	1646
job15	0,157490131	0,104993421	0,078745066	2	6	30	441
job16	0,0625	0,041666667	0,03125	7	6	31	1943
job17	0,396850263	0,264566842	0,198425131	2	12	31	355
job18	0,078745066	0,05249671	0,039372533	7	10	31	862
job19	0,099212566	0,06614171	0,049606283	4	10	31	2115
job20	0,024803141	0,016535428	0,012401571	3	7	31	1572

Anexo 7. Parámetros para las instancias de experimentación, 25 trabajadores en todos los posibles turnos de rotación

La generación de las instancias experimentales fue ejecutada en Matlab, con la función

```
par=random('unif',a,b,Nfila,Ncolumna);
```

Donde

a : valor mínimo

b : valor máximo

Nfila: número de filas de la entrega de datos

Ncolumna : número de columnas de la entrega de datos

	DOSIS RUIDO (K2)	DOSIS RUIDO (K3)	DOSIS RUIDO (K4)	JSI	REBA	TEMP	LUX
job1	0,157490131	0,104993421	0,078745066	4	13	31	2464
job2	0,5	0,333333333	0,25	10	10	31	669
job3	0,25	0,166666667	0,125	6	11	31	1604
job4	0,099212566	0,06614171	0,049606283	7	7	32	835
job5	0,314980262	0,209986842	0,157490131	10	8	32	1158
job6	0,049606283	0,033070855	0,024803141	3	10	30	2210
job7	0,03125	0,020833333	0,015625	10	10	30	441
job8	0,049606283	0,033070855	0,024803141	1	8	31	1896
job9	0,198425131	0,132283421	0,099212566	1	10	31	1969
job10	0,5	0,333333333	0,25	6	7	31	2403
job11	0,629960525	0,419973683	0,314980262	4	9	30	836
job12	0,25	0,166666667	0,125	9	11	32	807
job13	0,629960525	0,419973683	0,314980262	7	7	32	1664
job14	0,314980262	0,209986842	0,157490131	4	9	32	955
job15	0,396850263	0,264566842	0,198425131	7	11	30	745
job16	0,198425131	0,132283421	0,099212566	4	7	31	2053
job17	0,396850263	0,264566842	0,198425131	2	10	30	1683
job18	0,039372533	0,026248355	0,019686266	1	10	32	461
job19	0,62996	0,419973683	0,314980262	4	11	30	773
job20	0,79370	0,529133684	0,396850263	9	12	30	2233
job21	0,03125	0,020833333	0,015625	2	11	31	1757
job22	0,015625	0,010416667	0,0078125	10	7	31	1809
job23	0,03125	0,020833333	0,015625	10	12	31	541
job24	0,03125	0,020833333	0,015625	7	7	32	757
job25	0,049606283	0,033070855	0,024803141	4	12	32	1056

Anexo 8. Parámetros para las instancias de experimentación, 30 trabajadores en todos los posibles turnos de rotación

La generación de las instancias experimentales fue ejecutada en Matlab, con la función

```
par=random('unif',a,b,Nfila,Ncolumna);
```

	DOSIS RUIDO (K2)	DOSIS RUIDO (K3)	DOSIS RUIDO (K4)	JSI	REBA	TEMP	LUX
job1	0,157490131	0,104993421	0,078745066	8	6	30	1734
job2	0,314980262	0,209986842	0,157490131	1	9	32	325
job3	0,0625	0,041666667	0,03125	8	7	32	1488
job4	0,629960525	0,419973683	0,314980262	4	9	31	2110
job5	0,157490131	0,104993421	0,078745066	1	6	30	1656
job6	0,25	0,166666667	0,125	3	8	32	1044
job7	0,396850263	0,264566842	0,198425131	3	8	31	1861
job8	0,629960525	0,419973683	0,314980262	7	10	32	2457
job9	0,25	0,166666667	0,125	8	12	32	748
job10	0,198425131	0,132283421	0,099212566	6	11	31	1633
job11	0,25	0,166666667	0,125	4	10	31	1429
job12	0,049606283	0,033070855	0,024803141	6	8	31	744
job13	0,396850263	0,264566842	0,198425131	5	12	30	963
job14	0,198425131	0,132283421	0,099212566	9	6	30	539
job15	0,314980262	0,209986842	0,157490131	1	6	31	1479
job16	0,793700526	0,529133684	0,396850263	6	7	32	1304
job17	0,314980262	0,209986842	0,157490131	1	9	32	1268
job18	0,049606283	0,033070855	0,024803141	4	12	31	990
job19	0,099212566	0,06614171	0,049606283	10	8	32	1777
job20	0,5	0,333333333	0,25	5	13	30	2445
job21	0,629960525	0,419973683	0,314980262	2	6	30	1379
job22	0,793700526	0,529133684	0,396850263	6	6	31	2383
job23	0,049606283	0,033070855	0,024803141	9	6	31	1567
job24	0,024803141	0,016535428	0,012401571	3	8	32	500
job25	0,198425131	0,132283421	0,099212566	3	13	32	1041
job26	0,03125	0,020833333	0,015625	4	11	30	2179
job27	0,314980262	0,209986842	0,157490131	2	8	30	507
job28	0,793700526	0,529133684	0,396850263	10	6	32	1331
job29	0,793700526	0,529133684	0,396850263	3	9	32	2254
job30	0,157490131	0,104993421	0,078745066	3	10	32	1874

Anexo 9. Soluciones Frente de Pareto Instancia De Validación.

FRENTE INSTANCIA DE VALIDACIÓN 1.

DOSIS	JSI	REBA	LUXE	T	ALGORITMO N°
0,163473	4	25	654	63,16	1
0,135073	4	24	561	61,99	1
0,145371	6	25	654	63,16	1
0,137988	4	24	607	61,99	1
0,135073	6	25	627	61,99	1
0,135073	6	22	607	61,99	1
0,135073	4	23	541	61,99	2
0,136307	6	23	627	61,99	2
0,136307	4	22	561	61,99	2
0,136307	6	20	561	61,99	2
0,275976	6	25	674	61,99	3
0,316986	6	22	674	61,99	3
0,363965	6	23	674	61,99	3
0,363965	6	22	674	61,99	3
0,363965	6	22	674	61,99	3
0,363965	6	22	674	61,99	3
0,363965	6	22	674	61,99	3
0,363965	6	22	674	61,99	3
0,363965	6	22	674	61,99	3
0,270146	4	24	674	61,99	3
0,270146	4	24	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,270146	6	20	494	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	63,16	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,270146	6	20	494	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3

0,290742	6	22	674	61,99	3
----------	---	----	-----	-------	---

DOSIS	JSI	REBA	LUXE	T	ALGORITMO N°
0,290742	6	22	674	63,16	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,270146	6	20	494	61,99	3
0,270146	6	20	494	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,270146	4	25	674	61,99	3
0,270146	4	24	674	61,99	3
0,270146	4	24	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,270146	6	20	494	61,99	3
0,270146	6	20	494	61,99	3
0,275976	4	24	674	61,99	3
0,275976	4	24	674	61,99	3
0,275976	4	25	674	61,99	3
0,363965	4	22	494	61,99	3
0,363965	6	22	674	61,99	3
0,270146	4	24	674	61,99	3
0,270146	4	24	674	61,99	3
0,290742	4	23	674	61,99	3
0,290742	4	23	674	61,99	3
0,270146	4	22	494	61,99	3
0,270146	4	24	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,270146	6	20	494	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,290742	6	22	674	61,99	3
0,270146	4	24	674	61,99	3

0,270146	4	24	674	61,99	3
----------	---	----	-----	-------	---

DOSIS	JSI	REBA	LUXE	T	ALGORITMO N°
0,270146	4	24	674	61,99	3
0,290742	4	23	674	61,99	3
0,270146	4	25	674	61,99	3
0,270146	4	24	674	63,16	3
0,290742	4	23	674	61,99	3

FRENTE INSTANCIA DE VALIDACIÓN 2.

DOSIS	JSI	REBA	LUXE	T	ALGORITMO N°
0,192056	7	32	981	93,16	1
0,1698	7	33	934	91,99	1
0,149295	7	35	934	91,99	1
0,194971	7	31	1001	92,34	1
0,17478	7	33	981	92,34	1
0,17478	9	33	954	91,99	1
0,1698	7	36	981	92,34	1
0,147614	9	36	974	91,99	1
0,168566	7	36	954	91,99	1
0,178864	7	33	954	91,99	1
0,173546	7	29	755	91,99	1
0,17478	7	34	1001	91,99	1
0,149295	9	34	974	91,99	2
0,246881	6,25	32	868	91,99	2
0,158359	7	30	908	91,99	2
0,17478	6,25	36	888	91,99	2
0,168566	7	29	775	93,16	2
0,17478	7	29	775	91,99	2
0,246881	6,25	34	888	91,99	2
0,176461	7	29	868	91,99	2
0,176461	7	29	888	93,16	2
0,149295	7	31	868	93,16	2
0,147614	7	35	908	93,16	2
0,147614	7	32	888	91,99	2
0,176461	7	30	954	93,16	2
0,17478	6,25	31	888	93,16	2

0,147614	7	31	841	91,99	2
0,150976	7	30	841	93,98	2
0,14638	7	34	868	91,99	2
DOSIS	JSI	REBA	LUXE	T	ALGORITMO N°
0,149295	7	30	774	92,34	2
0,155444	7	30	888	91,99	2
0,17478	6,25	34	841	91,99	2
0,147614	9	31	868	91,99	2
0,148061	7	33	908	93,16	2
0,17478	7	32	934	91,99	2
0,14638	7	33	821	93,16	2
0,348409	9	33	1041	91,99	3
0,23304	7	28	1021	91,99	3
0,228641	7	28	1021	91,99	3
0,196818	9	33	1041	91,99	3
0,196818	9	33	1041	93,16	3
0,196818	9	33	1041	91,99	3
0,197415	7	28	1041	91,99	3
0,213806	7	30	841	91,99	3
0,196818	9	33	1041	91,99	3
0,197415	7	28	1041	91,99	3
0,197415	7	28	1021	91,99	3
0,196818	9	34	1041	91,99	3
0,197415	7	28	1021	91,99	3
0,195173	7	28	841	91,99	3
0,195173	7	28	841	91,99	3
0,196818	9	33	1041	91,99	3
0,196818	9	33	1041	91,99	3
0,262622	7	30	841	91,99	3
0,299594	9	33	1041	91,99	3
0,269262	7	29	841	91,99	3
0,346764	7	28	841	91,99	3
0,348409	9	33	1041	91,99	3
0,257719	7	28	1021	91,99	3
0,257719	7	28	1021	91,99	3
0,196818	9	33	1041	91,99	3
0,196818	9	33	1041	91,99	3
0,197415	7	28	1021	91,99	3
0,195173	7	28	1021	91,99	3

0,196818	9	33	1041	91,99	3
0,196818	6,25	37	841	91,99	3
0,195173	7	28	841	91,99	3
DOSIS	JSI	REBA	LUXE	T	ALGORITMO N°
0,195173	6,25	29	841	91,99	3
0,195173	7	28	841	93,16	3
0,348409	6,25	29	841	91,99	3
0,335815	6,25	29	841	91,99	3
0,195173	6,25	35	841	93,16	3

FRENTE INSTANCIA DE VALIDACIÓN 3.

DOSIS	JSI	REBA	LUXE	T	ALGORITMO N°
0,181107	8	42	1168	121,99	1
0,184853	8	41	1168	121,99	2
0,186087	8	42	1215	121,99	2
0,181107	10	41	1215	121,99	2
0,186087	9,25	41	1235	121,99	2
0,186087	10	40	1195	121,99	2
0,203293	10	45	1388	121,99	3
0,29978	10	44	1388	121,99	3
0,27138	12	40	1388	121,99	3
0,276472	12	40	1388	121,99	3
0,263168	12	40	1388	121,99	3
0,318289	12	40	1388	122,34	3
0,203293	10	36	1368	121,99	3
0,263168	12	40	1388	123,16	3
0,263168	10	36	821	122,34	3
0,157687	10	44	1388	121,99	3
0,157687	12	40	1388	121,99	3
0,157687	10	43	1388	121,99	3
0,179873	12	40	1388	121,99	3
0,186087	10	36	1368	121,99	3
0,208273	8	36	821	123,98	3
0,157687	10	44	1388	121,99	3
0,157687	10	44	1388	121,99	3
0,157687	12	40	1388	123,16	3
0,157687	12	40	1388	121,99	3

0,157687	12	40	1388	121,99	3
0,184853	10	36	1368	123,51	3
0,157687	10	44	1388	121,99	3
DOSIS	JSI	REBA	LUXE	T	ALGORITMO N°
0,15892	12	40	1388	121,99	3
0,157687	10	44	1388	121,99	3
0,157687	12	44	1388	121,99	3
0,157687	12	40	1388	123,16	3
0,157687	10	45	1388	121,99	3
0,157687	12	40	1388	123,16	3
0,182788	10	36	821	122,34	3
0,272614	8	46	1388	122,34	3
0,234768	8	46	1388	121,99	3
0,27138	8	44	1388	123,98	3
0,206278	10	36	1368	121,99	3
0,204596	10	36	1368	123,16	3
0,159368	8	46	1388	121,99	3
0,226557	8	43	821	121,99	3
0,186087	10	36	1368	121,99	3
0,263168	10	36	821	121,99	3
0,186087	10	36	1368	123,16	3
0,157687	10	42	1388	121,99	3
0,186087	8	41	821	121,99	3
0,190171	8	38	821	121,99	3
0,15892	10	37	1368	123,98	3
0,204596	8	36	821	123,16	3
0,157687	12	40	1388	123,16	3
0,326947	8	36	821	121,99	3
0,15892	8	44	1388	121,99	3
0,261935	8	36	821	122,34	3
0,159368	8	46	1388	121,99	3
0,157687	10	42	1388	123,16	3
0,157687	10	42	1388	121,99	3
0,157687	12	40	1388	123,16	3
0,186087	8	42	821	121,99	3
0,15892	8	37	821	123,16	3
0,160602	8	36	821	123,98	3
0,203363	8	46	1388	121,99	3
0,203293	8	46	1388	121,99	3

0,27138	8	45	1388	121,99	3
0,29978	8	46	1388	121,99	3
0,272458	8	43	821	121,99	3
DOSIS	JSI	REBA	LUXE	T	ALGORITMO N°
0,186087	10	42	1388	121,99	3
0,263168	10	42	1388	121,99	3
0,208273	12	40	1388	121,99	3
0,195151	10	36	1368	121,99	3
0,285355	8	36	821	123,16	3
0,159368	8	46	1388	121,99	3
0,157687	8	44	1388	121,99	3
0,157687	8	44	1388	122,34	3
0,157687	8	44	1388	122,34	3
0,157687	8	44	1388	123,16	3
0,157687	8	37	821	121,99	3
0,263168	8	44	1388	121,99	3
0,190171	10	36	1368	121,99	3
0,176642	8	36	821	121,99	3
0,226557	8	44	1388	121,99	3
0,231763	10	36	1388	123,16	3
0,171347	8	38	1388	122,34	3
0,166681	8	36	821	122,34	3
0,166681	8	36	821	122,34	3
0,166681	8	36	821	122,34	3
0,345456	8	36	821	121,99	3
0,190171	8	38	1388	121,99	3
0,15892	8	37	821	121,99	3
0,157687	8	49	821	123,16	3
0,226782	8	36	821	123,98	3

Anexo 10. Programación del modelo en GAMS

```
*****
*                               OPCIONES DEL SOLVER                               *
*****

OPTION ITERLIM=300000;
OPTION RESLIM= 1800;
OPTION subsystems;
option optca=0;
option optcr=0.01;

*****

* ESTABLECIONDEL LOS CONJUNTO DE LAS VARIABLES Y
PARAMETROS                               *
*****

SET

i tipo de trabajador /W1*W30/
j tipo de trabajo/job1*job30/
k cambios de turnos /k1*k2/
m cantidad de modelos matematicos/m1*m1003/
n cantidad de alfas/n1*n5;

scalar turnos cantidad de turnoa a rotar en el día /2/;

*****
```

*** IMPORTANDO datosmetalprest1 (PARAMETROS) DE EXCEL**

***PARAMETROS DE LA CARGA ERGONOMICA**

\$call gdxxrw.exe datosmetalprest.xlsx par=cjsi rng=carga_ergo!B2:C32

Rdim=1 Cdim=0

parameter cjsi(j);

\$GDXIN datosmetalprest.gdx

\$LOAD cjsi

\$GDXIN

***PARAMETROS DE LOS NIVELES DE PRESION SONORA**

\$call gdxxrw.exe datosmetalprest.xlsx par=db rng=carga_decibel!B2:C32

Rdim=1 Cdim=0

parameter db(j);

\$GDXIN datosmetalprest.gdx

\$LOAD db

\$GDXIN

***PARAMETROS DE LOS NIVELES DE CARGA ERGONOMICA POSTURAL**

\$call gdxxrw.exe datosmetalprest.xlsx par=creba rng=carga_Reba!B2:C32

Rdim=1 Cdim=0

parameter creba(j);

\$GDXIN datosmetalprest.gdx

\$LOAD creba

\$GDXIN

***PARAMETROS DE LOS NIVELES DE TEMPERATURA**

**\$call gdxrw.exe datosmetalprest.xlsx par=temp rng=carga_temp!B2:C32
Rdim=1 Cdim=0
parameter temp(j);
\$GDXIN datosmetalprest.gdx
\$LOAD temp
\$GDXIN**

***PARAMETROS DE EXPOSICION A LUXES**

**\$call gdxrw.exe datosmetalprest.xlsx par=nv rng=carga_lx!B2:C32 Rdim=1
Cdim=0
parameter nv(j);
\$GDXIN datosmetalprest.gdx
\$LOAD nv
\$GDXIN**

***ALFAS DE LA FUNCION OBJETIVO**

**\$call gdxrw.exe datosmetalprest.xlsx par=alfa rng=alfas!A2:F1003 Rdim=1
Cdim=1
parameter alfa(m,n);
\$GDXIN datosmetalprest.gdx
\$LOAD alfa
\$GDXIN**

*** CALCULANDO EL PARAMETRO DE DURACION MAXIMA DE LA TAREA
POR DB ***

parameter dur(j) tiempo de exposicion al trabajo j;

dur(j)=8/(2(((db(j)-85)/3)));**

*** CREANDO ESPACIOS DE MEMORIA PARA GUARDAR LAS
SOLUCIONES ***

parameter ZMULTI(m) valor de la funcion objetivo de cada modelo;

parameter FO1(m) valor de la funcion objetivo 1 de cada modelo;

parameter FO2(m) valor de la funcion objetivo 2 de cada modelo;

parameter FO3(m) valor de la funcion objetivo 3 de cada modelo;

parameter FO4(m) valor de la funcion objetivo 4 de cada modelo;

parameter FO5(m) valor de la funcion objetivo 5 de cada modelo;

parameter estadosolver(m) devuelve el estado del solver;

parameter estadomodelo(m) devuelve el valor del estado dle modelo;

**scalar ZMODEL memoria temporal para el valor de la funcion objetivo de
cada modelo ;**

ZMODEL=1;

**scalar solu1 memoria temporal para el valor de la funcion objetivo 1 de cada
modelo ;**

solu1=1;

**scalar solu2 memoria temporal para el valor de la funcion objetivo 2 de cada
modelo;**

solu2=1;

**scalar solu3 memoria temporal para el valor de la funcion objetivo 2 de cada
modelo;**

solu3=1;

**scalar solu4 memoria temporal para el valor de la funcion objetivo 2 de cada
modelo;**

solu4=1;

scalar solu5 memoria temporal para el valor de la funcion objetivo 2 de cada modelo;

solu5=1;

scalar estado1;

estado1 =0;

scalar estado2;

estado2=0;

* FORMULACION DEL MODELO MATEMATICO *

VARIABLES

$X(i,j,k)$

z valor funcion objetivo del modelo multiobjetivo

jsi carga ergonomica repetitiva

reba carga ergonomica postural

Dmaxtemp medida de la temperatura

Dmaxr dosis maxima de ruido

Nveces numero de veces en un puesto de trabajo

expo(i);

binary variable X

positive variable Nveces

positive variable jsi

positive variable reba

positive variable Dmaxtemp

positive variable Dmaxr;

Equations

R1(i,k)

R2(j,k)

R3a(i)

R3b(i)

R3c(i)

R4(i)

R5(i)

R6

R7

Fmin(m)

r91(i)

r92(i)

r93(i)

r94(i)

r95(i)

r96(i)

r97(i)

r98(i)

r99(i)

r910(i)

r911(i)

r912(i)

r913(i);

* contador para la sentencia for *

scalar s contador ;

s=354;

Fmin(m)\$ (ord(m) eq s)..z=e= alfa(m,"n1")*jsi + alfa(m,"n2")*Dmaxr +
alfa(m,"n3")*reba + alfa(m,"n4")*Dmaxtemp-
alfa(m,"n5")*Nveces;

R1(i,k).. sum((j),X(i,j,k))=e=1;

R2(j,k).. sum((i),X(i,j,k))=e=1;

R3a(i)..sum((j,k), X(i,j,k)*cjsi(j))=l=jsi;

R3b(i)..sum((j,k), X(i,j,k)*creba(j))=l=reba;

R3c(i)..sum((j,k), X(i,j,k)*temp(j))=l=Dmaxtemp;

R4(i)..sum((j,k),(X(i,j,k)*8)/(dur(j)*turnos))=l=Dmaxr;

R5(i)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=g=Nveces;

R6..Dmaxr=l=1;

R7..jsi=l=34;

r91(i)\$ (ord(i) eq 1)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=l=expo(i);

r92(i)\$ (ord(i) eq 2)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=l=expo(i);

r93(i)\$ (ord(i) eq 3)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=l=expo(i);

r94(i)\$ (ord(i) eq 4)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=l=expo(i);

r95(i)\$ (ord(i) eq 5)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=l=expo(i);

```

r96(i)$(ord(i) eq 6)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=l=expo(i);
r97(i)$(ord(i) eq 7)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=l=expo(i);
r98(i)$(ord(i) eq 8)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=l=expo(i);
r99(i)$(ord(i) eq 9)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=l=expo(i);
r910(i)$(ord(i) eq 10)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=l=expo(i);
r911(i)$(ord(i) eq 11)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=l=expo(i);
r912(i)$(ord(i) eq 12)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=l=expo(i);
r913(i)$(ord(i) eq 13)..sum((j,k), X(i,j,k)*nv(j))=l=expo(i);

```

```

*****

```

```

* SOLUIONANDO EL MODELO MULTIOBJETIVO CON TODOS SUS ALFAS

```

```

*

```

```

*****

```

```

*scalar xx;

```

```

*xx=modelorotacion.solvestat;

```

```

model modelorotacion/all/;

```

```

for(s=354 to 354 by 1, solve modelorotacion using mip minimizing z; display
X.l, jsi.l, reba.l, Dmaxr.l, Dmaxtemp.l, Nveces.l, z.l, expo.l,

```

```

modelorotacion.solvestat, modelorotacion.Modelstat;

```

```

;ZMODEL=z.l; ZMULTI(m)$(ord(m) eq s)=ZMODEL

```

```

;solu1=jsi.l;FO1(m)$(ord(m) eq s)=solu1;

```

```

solu2=Dmaxr.l;FO2(m)$(ord(m) eq s)=solu2; solu3=reba.l;FO3(m)$(ord(m)
eq s)=solu3;

```

```

solu4=Dmaxtemp.l;FO4(m)$(ord(m) eq
s)=solu4; solu5=Nveces.l;FO5(m)$(ord(m) eq

```

```

s)=solu5; estado1=modelorotacion.solvestat; estadosolver(m)$(ord(m) eq
s)=estado1;

```

```
;estado2=modelorotacion.Modelstat;estadomodelo(m)$(ord(m) eq  
s)=estado2;Execute_unload "datosmetalprest.gdx"  
;Execute 'gdxxrw.exe datosmetalprest.gdx var=X.I rng=resultados!A1';  
Execute 'gdxxrw.exe datosmetalprest.gdx var=X.I rng=resultados!A1'  
;Execute 'gdxxrw.exe datosmetalprest.gdx par=FO1.I  
rng=soluciones!b2';Execute 'gdxxrw.exe datosmetalprest.gdx par=FO2.I  
rng=soluciones!b5'  
;Execute 'gdxxrw.exe datosmetalprest.gdx par=FO3.I  
rng=soluciones!b8';Execute 'gdxxrw.exe datosmetalprest.gdx par=FO4.I  
rng=soluciones!b11'  
; Execute 'gdxxrw.exe datosmetalprest.gdx par=FO5.I  
rng=soluciones!b14';Execute 'gdxxrw.exe datosmetalprest.gdx par=ZMULTI.I  
rng=soluciones!b17';  
;Execute 'gdxxrw.exe datosmetalprest.gdx par=estadosolver.I  
rng=soluciones!b20
```

Anexo 11. Programación enjambre

```
clc
clear all;
format short;%long e;
NTUR=xlsread('I1.xlsx','hoja1','A2');%4;%input('DIGITE EL NUMERO DE
TURNOS A REALIZAR EN LA JORNADA LABORAR: ');
NTRAB=xlsread('I1.xlsx','hoja1','B2');%4;%input('DIGITE EL NUMERO DE
TRABAJOS A REALIZAR EN LA JORNADA LABORAR: ');
Tnuve=100;%input('DIGITE EL TAMAÑO DE LA NUVE: ');
Niter=20;%input('DIGITE EL NUMERO DE ITERACIONES: ');
C1=0.3;%input('DIGITE EL COMPONENTE COGNITIVO: ');
C2=0.2;%input('DIGITE EL COMPONENTE SOCIAL: ');
Vmax=1;%input('DIGITE LA VELOCIDAD MAXIMA: ');
Wmax=0.5;%input('DIGITE EL FACTOR DE INERCIA MAXIMO: ');
Wmin=0.1;%input('DIGITE EL FACTOR DE INERCIA MINIMO: ');
nc=10;%NÚMERO DE CORRIDAS
DosisRuido=(xlsread('I1.xlsx','hoja1',strcat('A4:A',num2str(4+NTRAB-
1))))';%[0.05 0.1 0.3 0.1];
Jsi=(xlsread('I1.xlsx','hoja1',strcat('B4:B',num2str(4+NTRAB-1))))';%[5
2 10 4];
REBA=(xlsread('I1.xlsx','hoja1',strcat('C4:C',num2str(4+NTRAB-
1))))';%[4 6 1 12];
T=(xlsread('I1.xlsx','hoja1',strcat('D4:D',num2str(4+NTRAB-1))))';%[28
32 25 35];
Luz=(xlsread('I1.xlsx','hoja1',strcat('E4:E',num2str(4+NTRAB-
1))))';%[10 25 43 21];
MSP=zeros(1,NTUR*NTRAB+10);%MATRIZ SUPERPOBLACIÓN
tic;
cnd=0;
Primero2=Factibilidad(NTRAB,NTUR,DosisRuido);
for cnc=1:nc
disp(cnc);
Nuve=rand(Tnuve,NTUR*NTRAB);
Nuve(1,:)=Primero2(1:NTUR*NTRAB);
VEL=rand(Tnuve,NTUR*NTRAB);
COMB=zeros(2*Tnuve,NTUR*NTRAB+10);
Pbest=inf(1,NTUR*NTRAB+2);
%EVALUAMOS POSICIÓN
W=Wmax;
MEJ=rand(Tnuve,NTUR*NTRAB);
MEJ=POSICIONESINI_DOSIS(NTUR,NTRAB,Tnuve,MEJ,DosisRuido,Primero2);%empeza
mos las mejores posiciones aleatoriamente
MEJ=POSICIONESINI_Jsi(NTUR,NTRAB,Tnuve,MEJ,Jsi);
MEJ=POSICIONESINI_REBA(NTUR,NTRAB,Tnuve,MEJ,REBA);
MEJ=POSICIONESINI_Luz(NTUR,NTRAB,Tnuve,MEJ,Luz);
MEJ=POSICIONESINI_T(NTUR,NTRAB,Tnuve,MEJ,T);

for y=1:Niter
%EVALUACIÓN DE LA NUVE
```

```

Nuve=EVALUACION_DE_LA_NUVE (NTUR,NTRAB,Tnuve,Nuve,DosisRuido,Primero2);
Nuve=EVALUACION_DE_LA_NUVE_Jsi (NTUR,NTRAB,Tnuve,Nuve,Jsi);
Nuve=EVALUACION_DE_LA_NUVE_REBA (NTUR,NTRAB,Tnuve,Nuve,REBA);
Nuve=EVALUACION_DE_LA_NUVE_Luz (NTUR,NTRAB,Tnuve,Nuve,Luz);
Nuve=EVALUACION_DE_LA_NUVE_T (NTUR,NTRAB,Tnuve,Nuve,T);

if y==1 %para la primera iteración
    COMB (1:Tnuve, :)=MEJ (:, :);
    COMB (Tnuve+1:2*Tnuve, :)=Nuve (:, :);
    TCOMB=Tnuve*2;
end

%ORGANIZAMOS LAS DOMINADAS Y NO DOMINADAS
NDOMD=zeros (1,NTRAB*NTUR+10);
DOM=zeros (1,NTRAB*NTUR+10);
NDOMN=zeros (1,NTRAB*NTUR+10);
cNDN=0;
cNDD=0;
cD=0;
i=1;
for ir=1:TCOMB
    if COMB (ir,NTRAB*NTUR+7)>0
        COMB (ir,NTRAB*NTUR+7)=COMB (ir,NTRAB*NTUR+7)*(-1);
    end
end
% disp (COMB (:,NTRAB*NTUR+1:NTRAB*NTUR+10));
while i<=TCOMB

    c2=0;
    j=1;
    c3=0;
    c5=0;
    while j<=TCOMB
        if i~=j
            c1=0;
            c4=0;
            for k=1:5
                if COMB (i,NTRAB*NTUR+(2*k)-
1)<COMB (j,NTRAB*NTUR+(2*k)-1)
                    if k==4
                        c4=c4+1;
                    end
                    c1=c1+1;
                elseif COMB (i,NTRAB*NTUR+(2*k)-
1)==COMB (j,NTRAB*NTUR+(2*k)-1)
                    c4=c4+1;
                end
            end
            if c1==5
                c2=c2+1;
            elseif c1==0 && c4==0
                c3=c3+1;
            end
        end
    end
end

```

```

        if c4~=0 && c4~=5 && (c4+c1)==5
            c2=c2+1;
        end
        if c4==5 && i>j

            c5=c5+1;
            else
                c3=c3-1;
            end
        end
    end
    j=j+1;
end
end
if c5>=1
    c3=2;
end
if c2>=1 && c3<=0
    cNDD=cNDD+1;
    NDOMD(cNDD,:)=COMB(i,:);
elseif c2==0 && c3<=0
    cNDN=cNDN+1;
    NDOMN(cNDN,:)=COMB(i,:);
elseif c3>0
    cD=cD+1;
    DOM(cD,:)=COMB(i,:);
end
i=i+1;
end
NDOMD(:,NTRAB*NTUR+7)=NDOMD(:,NTRAB*NTUR+7)*(-1);
NDOMN(:,NTRAB*NTUR+7)=NDOMN(:,NTRAB*NTUR+7)*(-1);
DOM(:,NTRAB*NTUR+7)=DOM(:,NTRAB*NTUR+7)*(-1);
COMB=zeros(1,NTRAB*NTUR+10);
MEJ=NDOMD;
TDOM=size(DOM);
TNDOMD=size(NDOMD);
TNDOMN=size(NDOMN);
TRDOM=TDOM(1,1);
TRNDOMD=TNDOMD(1,1);
TRNDOMN=TNDOMN(1,1);

%CALCULO DE LA NUEVA POSICIÓN

if cNDN~=0 && cNDD~=0 % CUANDO HAY DE LAS DOS NO DOMINADAS
    for ii=1:Tnuve
        for jj=1:NTUR*NTRAB

VEL(ii,jj)=W*VEL(ii,jj)+(C1*rand*(NDOMD(randi(cNDD),jj)-
Nuve(ii,jj)))+(C2*rand*(NDOMN(randi(cNDN),jj)-MEJ(randi(cNDD),jj)));
            Nuve(ii,jj)=Nuve(ii,jj)+VEL(ii,jj);
            if Nuve(ii,jj)<0
                if Nuve(ii,jj)<-1
                    Nuve(ii,jj)=Nuve(ii,jj)+fix(Nuve(ii,jj))+1;
                else

```



```

        Nuve(ii,jj)=Nuve(ii,jj)*(-1);
    end
end
if Nuve(ii,jj)>0
    Nuve(ii,jj)=Nuve(ii,jj)-fix(Nuve(ii,jj));
end

end

end
elseif cNDN==0 && cNDD~=0 %CUANDO NO HAY NO DOMINADAS QUE NO
DOMINEN
    for ii=1:Tnuve
        for jj=1:NTUR*NTRAB

VEL(ii,jj)=W*VEL(ii,jj)+(C1*rand*(NDOMD(randi(cNDD),jj)-
Nuve(ii,jj)))+(C2*rand*(NDOMD(randi(cNDD),jj)-MEJ(randi(cNDD),jj)));
        Nuve(ii,jj)=Nuve(ii,jj)+VEL(ii,jj);
        if Nuve(ii,jj)<0
            if Nuve(ii,jj)<-1
                Nuve(ii,jj)=Nuve(ii,jj)+fix(Nuve(ii,jj))+1;
            else
                Nuve(ii,jj)=Nuve(ii,jj)*(-1);
            end
        end
        if Nuve(ii,jj)>0
            Nuve(ii,jj)=Nuve(ii,jj)-fix(Nuve(ii,jj));
        end

        end

    end
elseif cNDN~=0 && cNDD==0 %CUANDO NO HAY NO DOMINADAS QUE DOMINEN
    for ii=1:Tnuve
        for jj=1:NTUR*NTRAB

VEL(ii,jj)=W*VEL(ii,jj)+(C1*rand*(NDOMN(randi(cNDN),jj)-
Nuve(ii,jj)))+(C2*rand*(NDOMN(randi(cNDN),jj)-MEJ(randi(cNDN),jj)));
        Nuve(ii,jj)=Nuve(ii,jj)+VEL(ii,jj);
        if Nuve(ii,jj)<0
            if Nuve(ii,jj)<-1
                Nuve(ii,jj)=Nuve(ii,jj)+fix(Nuve(ii,jj))+1;
            else
                Nuve(ii,jj)=Nuve(ii,jj)*(-1);
            end
        end
        if Nuve(ii,jj)>0
            Nuve(ii,jj)=Nuve(ii,jj)-fix(Nuve(ii,jj));
        end

        end

    end

end
end

```

```

end
%ESCOGEMOS A QUIENES VAMOS A RANKEAR PARA LA PROXIMA ITERACIÓN YA
%CALCULADAS LAS NUEVAS POSICIONES SEGUN LA FORMULA DE VELOCIDAD
if (TRNDOMD+TRNDOMN)>Tnuve
    if cNDN~=0 && cNDD~=0 %CUANDO HAY DE LAS DOS NO DOMINADAS
        TCOMB=TRNDOMD+TRNDOMN+Tnuve;
        COMB(1:TRNDOMD,:)=NDOMD;
        COMB(TRNDOMD+1:TRNDOMD+TRNDOMN,:)=NDOMN;
        COMB(TRNDOMD+TRNDOMN+1:TCOMB,:)=Nuve;
    elseif cNDN==0 && cNDD~=0 %CUANDO NO HAY NO DOMINADAS QUE NO
DOMINEN
        TCOMB=TRNDOMD+Tnuve;
        COMB(1:TRNDOMD,:)=NDOMD;
        COMB(TRNDOMD+1:TCOMB,:)=Nuve;
    elseif cNDN~=0 && cNDD==0
        TCOMB=TRNDOMN+Tnuve;
        COMB(1:TRNDOMN,:)=NDOMN;
        COMB(TRNDOMN+1:TCOMB,:)=Nuve; %CUANDO NO HAY NO
DOMINADAS QUE DOMINEN
    end
end
if (TRNDOMD+TRNDOMN)<=Tnuve %CUANDO HAY DE LAS DOS NO DOMINADAS
    TCOMB=Tnuve*2;
    if cNDN~=0 && cNDD~=0
        COMB(1:TRNDOMD,:)=NDOMD;
        COMB(TRNDOMD+1:TRNDOMD+TNDOMN,:)=NDOMN;
        COMB(TRNDOMD+TNDOMN+1:TRNDOMD+TNDOMN+Tnuve,:)=Nuve;
        for i=(TRNDOMD+TNDOMN+Tnuve+1):(2*Tnuve)
            COMB(i,:)=DOM(randi(TRDOM),:);
        end
    elseif cNDN==0 && cNDD~=0 %CUANDO NO HAY NO DOMINADAS QUE NO
DOMINEN
        COMB(1:TRNDOMD,:)=NDOMD;
        COMB(TRNDOMD+1:TRNDOMD+Tnuve,:)=Nuve;
        for i=(TRNDOMD+Tnuve+1):(TCOMB)
            COMB(i,:)=DOM(randi(TRDOM),:);
        end
    elseif cNDN~=0 && cNDD==0 %CUANDO NO HAY NO DOMINADAS QUE
DOMINEN
        COMB(1:TRNDOMN,:)=NDOMN;
        COMB(TRNDOMN+1:TRNDOMN+Tnuve,:)=Nuve;
        for i=(TRNDOMN+Tnuve+1):(TCOMB)
            COMB(i,:)=DOM(randi(TRDOM),:);
        end
    end
end
end

W=Wmax-y*((Wmax-Wmin)/Niter);
% % disp(Nuve);
end

if cnc==1
    MSP(1:TRNDOMD,:)=NDOMD;
else

```

```

        TSP=size(MSP);
        MSP((TSP+1):(TSP+TRNDOMD),:)=NDOMD;
end
cnd=TRNDOMD+cnd;
end

cont3=0;
solucion=zeros(1,NTRAB*NTUR+10);
TSP=size(MSP);
for i=1:TSP(1,1)-1
    cont2=0;
    for j=(i+1):TSP(1,1)
        cont=0;
        for k=1:5
            if MSP(i,NTRAB*NTUR+(2*k))==MSP(j,NTRAB*NTUR+(2*k))
                cont=cont+1;
            end
        end
        if cont==4
            cont2=cont2+1;
        end
        if cont==5
            cont2=cont2+1;
        end
    end
    if cont2==0
        cont3=cont3+1;
        solucion(cont3,:)=MSP(i,:);
        if i==(MSP(1,1)-1)
            cont3=cont3+1;
            solucion(cont3,:)=MSP(j,:);
        end
    else
        if i==(TSP(1,1)-1)
            cont3=cont3+1;
            solucion(cont3,:)=MSP(i,:);
        end
    end

end

end

%ENVIAMOS LAS NO DOMINADAS DE CADA SUPERPOBLACIÓN
DOM=zeros(1,NTRAB*NTUR+10);
NDOMSOLUCION=zeros(1,NTRAB*NTUR+10);
cND=0;
cD=0;
i=1;
while i<=cont3

    c2=0;
    j=1;

```

```

c3=0;
c5=0;
while j<=cont3
    if i~=j
        c1=0;
        c4=0;
        c5=0;
        for k=1:5
            if
solucion(i,NTRAB*NTUR+(2*k))<solucion(j,NTRAB*NTUR+(2*k))
                c1=c1+1;
            elseif
solucion(i,NTRAB*NTUR+(2*k))==solucion(j,NTRAB*NTUR+(2*k))
                c4=c4+1;
            elseif
solucion(i,NTRAB*NTUR+(2*k))>solucion(j,NTRAB*NTUR+(2*k))
                c5=c5+1;
            end
        end
        if c5==5 || (c5+c4)==5
            c3=c3+1;
        else
            c2=c2+1;
        end
    end
    j=j+1;
end
if c2>0 && c3==0
    cND=cND+1;
    NDOMSOLUCION(cND,:)=solucion(i,:);
elseif c3>0
    cD=cD+1;
    DOM(cD,:)=solucion(i,:);
end
i=i+1;
end
NDOMSOLUCION(:,NTRAB*NTUR+11)=1;
xlswrite('Resultados.xlsx',cND,'Hoja1','A2');
xlswrite('Resultados.xlsx',NDOMSOLUCION,'Hoja1',strcat('A4:AK',num2str(cN
D+3)));
disp(toc);

```

Anexo 12. Programación algoritmo genético

```
lc
clear all;
NTUR=xlsread('I1.xls','hoja1','A2');%4;%input('DIGITE EL NUMERO DE
TURNOS A REALIZAR EN LA JORNADA LABORAR: ');
NTRAB=xlsread('I1.xls','hoja1','B2');%4;%input('DIGITE EL NUMERO DE
TRABAJOS A REALIZAR EN LA JORNADA LABORAR: ');
Tp=100;%input('DIGITE EL TAMAÑO DE LA POBLACIÓN: ');
Niter=20;%input('DIGITE EL NUMERO DE ITERACIONES: ');
Pcruz=0.8;%input('DIGITE LA PROBABILIDAD DE CRUZAMIENTO: ');
Pmut=0.2;%input('DIGITE LA PROBABILIDAD DE MUTACIÓN: ');
DosisRuido=(xlsread('I1.xls'),'hoja1',strcat('A4:A',num2str(4+NTRAB-
1))))';%[0.05 0.1 0.3 0.1];
Jsi=(xlsread('I1.xls'),'hoja1',strcat('B4:B',num2str(4+NTRAB-1))))';%[5
2 10 4];
REBA=(xlsread('I1.xls'),'hoja1',strcat('C4:C',num2str(4+NTRAB-1))))';%[4
6 1 12];
T=(xlsread('I1.xls'),'hoja1',strcat('D4:D',num2str(4+NTRAB-1))))';%[28
32 25 35];
Luz=(xlsread('I1.xls'),'hoja1',strcat('E4:E',num2str(4+NTRAB-1))))';%[10
25 43 21];
nc=10;%NUMERO DE CORRIDAS

MSP=zeros(1,NTUR*NTRAB+10);%MATRIZ SUPERPOBLACIÓN
tic;
cnd=0;
for cnc=1:nc
    disp(cnc);
    Pob=zeros(Tp,NTUR*NTRAB);
    Solucion=zeros(1,NTUR*NTRAB);
    Encoding=zeros(1,NTUR*NTRAB);
    %GENERAMOS LA POBLACIÓN INICIAL
    for i=1:Tp
        for j=1:NTUR
            Pob(i,NTRAB*j-(NTRAB-1):NTRAB*j)=randperm(NTRAB);
        end
    end
    Primero=Factibilidad(NTRAB,NTUR,DosisRuido);
    Pob(1,:)=Primero(1:NTUR*NTRAB);
    %EVALUAMOS LA POBLACIÓN INICIA PARA LA DOSIS DE RUIDO DE ACUERDO A LA
    DESVIACIÓN ESTANDAR
    Pob=EvaluacionDosisRuido(Tp,NTRAB,NTUR,Pob,DosisRuido);
    %EVALUAMOS LA POBLACIÓN INICIA PARA EL Jsi DE ACUERDO A LA DESVIACIÓN
    ESTANDAR
    Pob=Evaluacion(Tp,NTRAB,NTUR,Pob,Jsi);
    %EVALUAMOS LA POBLACIÓN INICIA PARA EL REBA DE ACUERDO A LA
    DESVIACIÓN ESTANDAR
    Pob=Evaluacion_REBA(Tp,NTRAB,NTUR,Pob,REBA);
    %EVALUAMOS LA POBLACIÓN INICIA PARA EL FACTOR LUZ DE ACUERDO A LA
    DESVIACIÓN ESTANDAR
    Pob=Evaluacion_Luz(Tp,NTRAB,NTUR,Pob,Luz);
    %EVALUAMOS LA POBLACIÓN INICIA PARA EL FACTOR TEMPERATURA DE ACUERDO
    A LA DESVIACIÓN ESTANDAR
```

```

Pob=Evaluacion_TEM(Tp,NTRAB,NTUR,Pob,T);
DOM=zeros(2*Tp,NTRAB*NTUR+10);
for g=1:Niter
%ELEGIMOS A LOS PADRES A COMPETIR PORTORNEO Y REALIZAMOS CRUZAMIENTO
Hijos=Cruzamiento(Tp,NTRAB,NTUR,Pob,Pcruz,Primero);

%REALIZAMOS MUTACIÓN
Hijos=Mutacion(Tp,NTRAB,NTUR,Pmut,Hijos);

%EVALUAMOS HIJOS DOSIS DE RUIDO
Hijos=EvaluacionDosisRuido_H(Tp,NTRAB,NTUR,Hijos,DosisRuido,Primero);
%EVALUAMOS HIJOS Jsi
Hijos=Evaluacion_Hijos(Tp,NTRAB,NTUR,Hijos,Jsi);
%EVALUAMOS HIJOS REBA
Hijos=Evaluacion_Hijos_REBA(Tp,NTRAB,NTUR,Hijos,REBA);
%EVALUAMOS HIJOS TEMPERATURA
Hijos=Evaluacion_Hijos_TEM(Tp,NTRAB,NTUR,Hijos,T);
%EVALUAMOS HIJOS LUZ
Hijos=Evaluacion_Hijos_Luz(Tp,NTRAB,NTUR,Hijos,Luz);
%POB COMBINADA CON HIJOS
COMB=zeros(Tp,NTUR*NTRAB+10);
COMB(1:Tp,:)=Pob;
COMB((Tp+1):(2*Tp),:)=Hijos;

    for ir=1:2*Tp
        if COMB(ir,NTRAB*NTUR+7)>0
            COMB(ir,NTRAB*NTUR+7)=COMB(ir,NTRAB*NTUR+7)*(-1);
        end
    end
%para la primera iteración tankeamos solo la matriz COMBINADA

if g==1
R1=zeros(1,NTRAB*NTUR+10);
R2=zeros(1,NTRAB*NTUR+10);
DOM=zeros(1,NTRAB*NTUR+10);
cr1=0;
cr2=0;
cD=0;
i=1;
while i<=2*Tp

    c2=0;
    j=1;
    c5=0;
    c3=0;
    while j<=2*Tp
        if i~=j
            c1=0;
            c4=0;
            for k=1:5
                if COMB(i,NTRAB*NTUR+((2*k)-
1))<COMB(j,NTRAB*NTUR+((2*k)-1))
                    c1=c1+1;

```

```

                                elseif COMB(i,NTRAB*NTUR+(2*k)-
1) == COMB(j,NTRAB*NTUR+(2*k)-1)
                                c4=c4+1;
                                end
                                end
                                if c1==5
                                    c2=c2+1;
                                elseif c1==0
                                    c3=c3+1;
                                end
                                if c4==5
                                    if i>j
                                        c5=c5+1;
                                    else
                                        c3=c3-1;
                                    end
                                end
                                end
                                if c4~=0 && c1~=0 && (c4+c1)==5
                                    c2=c2+1;
                                end
                                end
                                end
                                j=j+1;
                                end
                                if c5>=1
                                    c3=2;
                                end
                                if c2>=1 && c3<=0
                                    cr1=cr1+1;
                                    R1(cr1,:)=COMB(i,:);
                                elseif c2==0 && c3<=0
                                    cr1=cr1+1;
                                    R1(cr1,:)=COMB(i,:);
                                elseif c2>=1 && c3>0
                                    cr2=cr2+1;
                                    R2(cr2,:)=COMB(i,:);
                                elseif c2==0
                                    cD=cD+1;
                                    DOM(cD,:)=COMB(i,:);
                                end
                                end
                                i=i+1;
                                end

                                ii=1;
                                while ii<=Tp
                                    if ii<=cr1 && R1(1,1)~=0
                                        Pob(ii,:)=R1(ii,:);
                                    elseif ii>cr1 && ii<=cr1+cr2 && R2(1,1)~=0
                                        Pob(ii,:)=R2(ii-cr1,:);
                                    elseif ii>(cr1+cr2)
                                        Pob(ii,:)=DOM(ii-cr1-cr2,:);
                                    end
                                    ii=ii+1;
                                end
                                end
                                R1(:,NTRAB*NTUR+7)=R1(:,NTRAB*NTUR+7)*(-1);

```

```

R2(:,NTRAB*NTUR+7)=R2(:,NTRAB*NTUR+7)*(-1);
DOM(:,NTRAB*NTUR+7)=DOM(:,NTRAB*NTUR+7)*(-1);
else
%Rankeamos la poblaciòn despùes de la iteraciòn 1 y tambien se rankea
con
%respecto ar rankin 1 y 2
Scr1=cr1;
Scr2=cr2;
if Scr1~=0
    COMB((2*Tp+1):(2*Tp+Scr1),:)=R1;
end
if Scr2~=0
    COMB((2*Tp+Scr1+1):(2*Tp+Scr1+Scr2),:)=R2;
end
for ir=1:2*Tp
    if COMB(ir,NTRAB*NTUR+7)>0
        COMB(ir,NTRAB*NTUR+7)=COMB(ir,NTRAB*NTUR+7)*(-1);
    end
end
DOM=zeros(1,NTRAB*NTUR+10);
R1=zeros(1,NTRAB*NTUR+10);
R2=zeros(1,NTRAB*NTUR+10);
cr1=0;
cr2=0;
cD=0;
i=1;
while i<=(2*Tp)+Scr1+Scr2

    c2=0;
    j=1;
    c3=0;
    c5=0;
    while j<=(2*Tp)+Scr1+Scr2
        if i~=j
            c1=0;
            c4=0;
            for k=1:5
                if COMB(i,NTRAB*NTUR+((2*k)-
1))<COMB(j,NTRAB*NTUR+((2*k)-1))
                    c1=c1+1;
                elseif COMB(i,NTRAB*NTUR+((2*k)-
1))==COMB(j,NTRAB*NTUR+((2*k)-1))
                    c4=c4+1;
                end
            end
            if c1==5
                c2=c2+1;
            elseif c1==0
                c3=c3+1;
            end
            if c4==5
                if i>j
                    c5=c5+1;
                else

```



```

        c3=c3-1;
        end
    end
    if c4~=0 && c1~=0 && (c4+c1)==5
        c2=c2+1;
    end
    end
    j=j+1;
end
if c5>=1
    c3=2;
end
if c2>=1 && c3<=0
    cr1=cr1+1;
    R1(cr1,:)=COMB(i,:);
elseif c2==0 && c3<=0
    cr1=cr1+1;
    R1(cr1,:)=COMB(i,:);
elseif c2>=1 && c3>0 && cr2<(2*Tp)
    cr2=cr2+1;
    R2(cr2,:)=COMB(i,:);
elseif c2==0
    cD=cD+1;
    DOM(cD,:)=COMB(i,:);
end
    i=i+1;
end

ii=1;
while ii<=Tp
    if ii<=cr1 && R1(1,1)~=0
        Pob(ii,:)=R1(ii,:);
    elseif ii>cr1 && ii<=cr1+cr2 && R2(1,1)~=0
        Pob(ii,:)=R2(ii-cr1,:);
    elseif ii>(cr1+cr2)
        Pob(ii,:)=DOM(ii-cr1-cr2,:);
    end
    ii=ii+1;
end
R1(:,NTRAB*NTUR+7)=R1(:,NTRAB*NTUR+7)*(-1);
R2(:,NTRAB*NTUR+7)=R2(:,NTRAB*NTUR+7)*(-1);
DOM(:,NTRAB*NTUR+7)=DOM(:,NTRAB*NTUR+7)*(-1);

end

end
if cr1~=0
    Solucion=R1;
elseif cr2~=0
    Solucion=R2;
end
if cr1==0 && cr2==0
    Solucion=DOM(1,:);
end

```

```

end

ts=size(Solucion);

if cnc==1
    MSP(1:ts(1,1),:)=Solucion;
else
    TSP=size(MSP);
    MSP((TSP+1):(TSP+ts(1,1)),:)=Solucion;
end
cnd=ts(1,1)+cnd;

end

cont3=0;
solucion=zeros(1,NTRAB*NTUR+10);
TSP=size(MSP);
for i=1:TSP(1,1)-1
    cont2=0;
    for j=(i+1):TSP(1,1)
        cont=0;
        for k=1:5
            if MSP(i,NTRAB*NTUR+(2*k))==MSP(j,NTRAB*NTUR+(2*k))
                cont=cont+1;
            end
        end
        if cont==4
            cont2=cont2+1;
        end
        if cont==5
            cont2=cont2+1;
        end
    end
    if cont2==0
        cont3=cont3+1;
        solucion(cont3,:)=MSP(i,:);
        if i==(MSP(1,1)-1)
            cont3=cont3+1;
            solucion(cont3,:)=MSP(j,:);
        end
    else
        if i==(TSP(1,1)-1)
            cont3=cont3+1;
            solucion(cont3,:)=MSP(i,:);
        end
    end

end

end
end

```

```

%ENVIAMOS LAS NO DOMINADAS DE CADA SUPERPOBLACIÓN
DOM=zeros(1,NTRAB*NTUR+10);
NDOMSOLUCION=zeros(1,NTRAB*NTUR+10);
cND=0;
cD=0;
i=1;
while i<=cont3

    c2=0;
    j=1;
    c3=0;
    c5=0;
    while j<=cont3
        if i~=j
            c1=0;
            c4=0;
            c5=0;
            for k=1:5
                if
solucion(i,NTRAB*NTUR+(2*k))<solucion(j,NTRAB*NTUR+(2*k))
                    if k~=4
                        c1=c1+1;
                    else
                        c5=c5+1;
                    end
                elseif
solucion(i,NTRAB*NTUR+(2*k))==solucion(j,NTRAB*NTUR+(2*k))
                    c4=c4+1;
                elseif
solucion(i,NTRAB*NTUR+(2*k))>solucion(j,NTRAB*NTUR+(2*k))
                    if k~=4
                        c5=c5+1;
                    else
                        c1=c1+1;
                    end
                end
            end
            if c5==5 || (c5+c4)==5
                c3=c3+1;
            else
                c2=c2+1;
            end
        end
        j=j+1;
    end
    if c2>0 && c3==0
        cND=cND+1;
        NDOMSOLUCION(cND,:)=solucion(i,:);
    elseif c3>0
        cD=cD+1;
        DOM(cD,:)=solucion(i,:);
    end
end

```

```
        i=i+1;
    end

NDOMSOLUCION(:,NTRAB*NTUR+11)=2;
xlswrite('Resultados.xlsx',cND,'Hoja2','A2');
xlswrite('Resultados.xlsx',NDOMSOLUCION,'Hoja2',strcat('A4:Ak',num2str(cND+3)));
disp(toc);
```