

**DISEÑO DE UN MODELO PARA LA ROTACIÓN LABORAL QUE PREVENGAN
LOS RIESGOS ERGONÓMICOS EN ACTIVIDADES REPETITIVAS,
MANIPULACIÓN DE CARGA Y POSTURAS FORZADAS.**

Holman Ospina Mateus
Ingeniero Industrial.



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ENFASIS INGENIERIA INDUSTRIAL
CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C.
JUNIO DE 2013

**DISEÑO DE UN MODELO PARA LA ROTACIÓN LABORAL QUE PREVENGAN
LOS RIESGOS ERGONÓMICOS EN ACTIVIDADES REPETITIVAS,
MANIPULACIÓN DE CARGA Y POSTURAS FORZADAS.**

Holman Ospina Mateus
Ingeniero Industrial.

*Trabajo de Tesis para Optar al Título de
Magister en Ingeniería con Énfasis en Ingeniería Industrial*

Director
Fabián Gazabón Arrieta
Master en Dirección de Operaciones y Calidad e Innovación

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
ENFASIS INGENIERIA INDUSTRIAL
CARTAGENA DE INDIAS D.T Y C.
JUNIO DE 2013

Cartagena de Indias D. T y C. 17 de Junio de 2013

Señores:

**COMITÉ EVALUADOR
Maestría en Ingeniería
Facultad de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Bolívar
Ciudad**

Respetados Señores:

Por medio de la presente me permito someter para estudio, consideración y aprobación el trabajo de grado titulado ***“DISEÑO DE UN MODELO PARA LA ROTACIÓN LABORAL QUE PREVENGAN LOS RIESGOS ERGONÓMICOS EN ACTIVIDADES REPETITIVAS, MANIPULACIÓN DE CARGA Y POSTURAS FORZADAS”*** desarrollada por la estudiante Holman Ospina Mateus, en el marco de la ***Maestría en Ingeniería (Énfasis Ingeniería Industrial)***.

Como director del proyecto considero que el trabajo es satisfactorio y amerita ser presentado para su evaluación.

Cordialmente,

Ms. Fabián Gazabón Arrieta

Director de Trabajo de Grado

Cartagena de Indias D. T y C. 17 de Junio de 2013

Señores:

**COMITÉ EVALUADOR
Maestría en Ingeniería
Facultad de Ingeniería
Universidad Tecnológica de Bolívar
Ciudad**

Respetados Señores:

Por medio de la presente me permito someter para estudio, consideración y aprobación el trabajo de grado titulado ***“DISEÑO DE UN MODELO PARA LA ROTACIÓN LABORAL QUE PREVENGAN LOS RIESGOS ERGONÓMICOS EN ACTIVIDADES REPETITIVAS, MANIPULACIÓN DE CARGA Y POSTURAS FORZADAS”*** desarrollada en el marco de la ***Maestría en Ingeniería (Énfasis Ingeniería Industrial)***.

Cordialmente,

Holman Ospina Mateus

Investigador

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del Jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena, Junio 2013

No que seamos competentes por nosotros mismos para pensar algo como de nosotros mismos, sino que nuestra competencia proviene de Dios.

2 corintios 3; 4.

A Dios por ser luz que ilumina mi vida cada día,

A mis padres por apoyarme en todos los momentos de mi vida y ser los patrocinadores de mis sueños,

A mis queridos hermanos (Eddy, Laura) por ser el apoyo y la voz de aliento en mi vida,

A mi novia (Johana María) quien siempre me ha apoyado y alentado en el desarrollo de este proyecto,

A todos aquellos Docentes que han aportado su granito de conocimiento, apoyo y motivación.

MUCHAS GRACIAS.

HOLMAN OSPINA MATEUS

CONTENIDO

CONTENIDO	7
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABLAS	11
INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVOS.....	15
Objetivos General	15
Objetivo Específicos	15
ASPECTOS METODOLÓGICOS	16
1. ESTADO DEL ARTE: ROTACIÓN LABORAL	17
1.1 Introducción	17
1.2 Conceptualización de Rotación Laboral	17
1.3 Ventajas y Desventajas de la Rotación Laboral	18
1.4 Aspectos y Criterios Claves en la Rotación Laboral	19
1.5 Escenarios de una Rotación Laboral	21
1.6 Rotación Laboral y los Trastornos Musculo Esqueléticos	22
1.7 Enfoque Empírico Aplicados en la Rotación Laboral	22
1.8 Enfoque en Optimización Aplicadas en la Rotación Laboral	24
1.9 Perspectivas y Conclusiones.....	29
2. RIESGOS ERGONOMICOS EN TRASTORNOS MUSCULO ESQUELETICOS	31
2.1 Introducción	31
2.2 Conceptualización de Trastornos Músculo Esqueléticos.....	31
2.3 Factores Biomecánicos y Trastornos Musculo Esqueléticos	32
2.4 Intervención Ergonómica, Métodos y Técnicas de Valoración Ergonómica	34
2.5 Métodos de Valoración Ergonómica para la Manipulación Manual de Carga.....	35
2.5.1 La Ecuación Revisada de NIOSH (National Institute For Occupational Safety and Health).....	35
2.6 Métodos de Valoración Ergonómica para el Análisis Postural.....	40
2.6.1 Método RULA (Rapid Upper Limbs Assessment)	40
2.7 Métodos de Valoración Ergonómica para la Repetitividad de Movimientos	45

2.7.1 Método OCRA (Ocupacional Repetitive Action Methods)	45
2.8 Perspectivas y Conclusiones.....	47
3. ROTACIÓN LABORAL BAJO UN ENFOQUE ERGONOMICO	49
3.1 Introducción	49
3.2 Formulación del Modelo de Rotación Laboral con Enfoque Ergonómico.	49
3.3 Esquema de Rotación Laboral	50
3.4 Tipos de Modelos de Rotación Laboral	51
3.5 Complejidad de Rotación Laboral con Enfoque Ergonómico.	52
3.6 Descripción de Modelos de Rotación Laboral	54
3.6.1 Modelo Matemático de Rotación Laboral para la Manipulación Manual de Carga.....	54
3.6.2 Modelo Matemático de Rotación Laboral para Actividades Repetitivas	55
3.6.3 Modelo Matemático de Rotación Laboral para la Fatiga Postural	57
3.7 Modelo Matemático Multiobjetivo de Rotación Laboral	58
3.7.1 Fundamentos de la Optimización Multiobjetivo	58
3.7.2 Formulación de Modelo de Optimización Multiobjetivo de Rotación Laboral.....	60
3.8 Perspectivas y Conclusiones.....	62
4. OPTIMIZACION MULTIOBJETIVO EN ROTACIÓN LABORAL CON ALGORITMOS GENETICOS	63
4.1 Introducción	63
4.2 Algoritmos Evolutivos	63
4.2.1 Algoritmos Genéticos	64
4.2.2 Aspectos Claves de los Algoritmos Genéticos	65
4.3 Algoritmos Genéticos Multiobjetivo.....	66
4.4 Procedimiento Propuesto de Algoritmo Genético Multiobjetivo para el Esquema de Rotación Laboral Ergonómico	67
4.4.1 Definición de Algoritmo Genético Multiobjetivo	67
4.4.2 Representación del Individuo (Solución)	68
4.4.3 Configuración de Población Inicial	69
4.4.4 Evaluación de los Individuos dentro de la Población (Fitness).....	70
4.4.5 Penalización de los Individuos dentro de la Población.....	75
4.4.6 Selección de Individuos dentro de la Población	76
4.4.7 Reemplazo de Individuos	76

4.4.8 Proceso de Reproducción de Individuos	77
4.4.9 Proceso de Mutación de Individuos.....	78
4.4.10 Parametrización de Algoritmo Genético	78
4.5 Perspectivas y Conclusiones.....	81
5. METODOLOGÍA Y VALIDACIÓN DE ROTACIÓN LABORAL MULTI OBJETIVO CON ENFOQUE ERGONÓMICO	82
5.1 Introducción.....	82
5.2 Modelo de Intervención para la Implementación de Rotación Laboral Multiobjetivo con Enfoque Ergonómico	82
5.3 Supuestos de Metodología Propuesta.....	85
5.4 Determinación Experimental de Parámetros del Algoritmo Genético Multiobjetivo	86
5.5 Caso de Estudio de Rotación Laboral Sobre Sistema Productivo	86
5.5.1 Análisis de los Resultados Generados por Algoritmo Genético Multiobjetivo.....	96
5.5.2 Análisis de los Resultados Comparativos.....	102
CONCLUSIONES.....	104
TRABAJOS FUTUROS	107
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA.....	108
ANEXOS.....	113
ANEXOS 1 - Determinación Experimental de Parámetros del Algoritmo Genético Multiobjetivo - Caso Académico.....	113
ANEXOS 2 - Sistema Productivo de Fabricación de Productos Plásticos.....	121
ANEXO 3 - Corridas de Algoritmo Genético de Forma Independiente para Riesgos por Manipulación de Carga, Repetividad de Tareas y Posturas Forzadas.....	125
ANEXO 4 - Contraste de Algoritmo Genético Multiobjetivo, Con Restricciones o Limitaciones y sin Restricciones o Limitaciones	129
ANEXO 5 - Modelos de Rotación Laboral Desarrollados en GAMS.....	130
ANEXO 6 - Aplicación de Programa Ejecutable para la Rotación Laboral Multiobjetivo	137
ANEXO 7. Resultado de Caso de Estudio Completo -CD	155
ANEXO 8. Plan de Rotación de Puestos de Trabajo.....	156

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Combinación de Factores Asociados a Trastornos Musculo Esqueléticos.....	13
Figura 2. Ventajas y Desventajas de Rotación Laboral.	18
Figura 3. Consideraciones Claves para la Implementación de un Sistema de Rotación Laboral.	20
Figura 4. Enfoques de un Sistema de Rotación Laboral.....	21
Figura 5. Evolución Empírica de Rotación Laboral.....	23
Figura 6. Modelo Conceptual de los TME, Adaptado de Karsh et al. (2001).	31
Figura 7. Representación de Duración, Frecuencia, Intensidad en el Nivel de Exposición al Riesgos, Tomado Radwin et al. (2001).....	32
Figura 8. Puntuación Postura de Brazo en Grupo A, Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).	41
Figura 9. Puntuación Postura de Antebrazo en Grupo A, Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).	41
Figura 10. Puntuación Postura de Muñeca en Grupo A, Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993)..	41
Figura 11. Puntuación Postura de Cuello en Grupo B, Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993). ...	42
Figura 12. Puntuación Postura de Tronco en Grupo B, Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993). ...	42
Figura 13. Flujo de Calculo de Riesgo por postura Forzada con Método RULA.	44
Figura 14. Condiciones Básicas en las Estrategias de Medición de los TME, Tomado de Burdorf y van der Beek (1999).	48
Figura 15. Representación Conceptual del Problema de Rotación Laboral Ergonómico.	51
Figura 16. Espacio de Solución para la Rotación de Puestos de Trabajo de n Tareas y Trabajos en 4 Periodos.	52
Figura 17. Representación de Conjunto de Pareto para un Problema multiobjetivo.	60
Figura 18. Esquema Básico de Algoritmo Genético	65
Figura 19. Aspectos Claves de los Algoritmos Genéticos	66
Figura 20. Esquema Básico de Algoritmo Genético por Clasificación no dominado (NSGA)	68
Figura 21. Representación de Solución de Esquema Rotación Laboral.....	69
Figura 22. Pseudocódigo para la Generación de Individuos.	70
Figura 23. Esquema de Cruce Monopunto para la Rotación Laboral.	77
Figura 24. Estrategia de Mutación para la rotación laboral.....	78
Figura 25. Flujo General de Algoritmo Genético Multiobjetivo Propuesto.....	80
Figura 26. Modelo de Intervención para la Implementación de Rotación Laboral Multiobjetivo.	82
Figura 27. Valoración de Riesgos Ergonómicos por Manipulación de Carga, Repetividad y Posturas Forzadas.....	93
Figura 28. Evolución de los objetivos del Modelo de Rotación Laboral.	96
Figura 29. Contraste de Riesgo por Manipulación de Carga, con y sin Rotación Laboral.....	100
Figura 30. Contraste de Riesgo por Repetividad de Operaciones, con y sin Rotación Laboral.....	100
Figura 31. Contraste de Riesgo por Posturas Forzadas, con y sin Rotación Laboral.....	101
Figura 32. Contraste de Experimentos de Validación de Modelos de Rotación Laboral.	103

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estado del Arte en Optimización para la Planificación de Rotación Laboral.....	25
Tabla 2. Relación entre los Factores Físicos de Trabajo y los Trastornos Musculo Esqueletitos, Tomado de Bernard (1997).....	33
Tabla 3. Factores de Exposición Evaluados por Diferentes Métodos, Adaptado de David (2005).	35
Tabla 4. Criterios Usados en el Desarrollo de Ecuación NIOSH, Tomado de Waters et al. (1993).....	36
Tabla 5. Multiplicador de Factor de Frecuencia.....	37
Tabla 6. Multiplicador de Factor de Agarre.....	37
Tabla 7. Puntuación Global A. Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).	43
Tabla 8. Puntuación Global B. Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).	43
Tabla 9. Puntuación de Actividad Muscular y Fuerza Aplicada. Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).	43
Tabla 10. Puntuación Final, Combina Factor C y D. Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).	44
Tabla 11. Multiplicador Relativo en Diferentes Usos de Fuerza. Tomado ISO_1228-3 (2007).	46
Tabla 12. Factor Multiplicador de postura forzada. Tomado de ISO_1228-3 (2007).	46
Tabla 13. Factor multiplicador de recuperación. Tomado de ISO_1228-3 (2007).	47
Tabla 14. Factor multiplicador de duración. Tomado de ISO_1228-3 (2007).	47
Tabla 15. Nivel de Riesgo OCRA. Tomado de ISO_1228-3 (2007).	47
Tabla 16. Transformación del Problema de la 3 Partición al Problema de Rotación Laboral Ergonómico. Tomado de Otto y Scholl (2011).	53
Tabla 17. Valoración de Variabilidad de Riesgo OCRA. Tomado de Asensio-Cuesta et al. (2012).	73
Tabla 18. Ejemplo de Penalización de Trabajadores dentro de Jornada de Rotación.....	75
Tabla 19. Valores experimentales de los parámetros del Algoritmo Genético Multiobjetivo.....	86
Tabla 20. Demanda Laboral del Sistema Productivo.....	88
Tabla 21. Selección de Trabajadores y Puestos de Trabajo a Rotar.....	89
Tabla 22. Resultados de Método de Valoración Ergonómico NIOSH.....	91
Tabla 23. Resultados de Método de Valoración Ergonómico RULA.....	92
Tabla 24. Resultados de Método de Valoración Ergonómico OCRA.....	93
Tabla 25. Relación de Puestos de Trabajo y Posiciones Vetadas.....	94
Tabla 26. Parámetros de AG, para Rotación Laboral.....	95
Tabla 27. Resultado de Corridas de Algoritmo Genético Multiobjetivo Propuesto.....	96
Tabla 28. Esquema y Resultados del Modelo de Rotación Laboral.....	97
Tabla 29. Resultados Discriminado por Objetivos del Modelo de Rotación.....	99
Tabla 30. Resultado de Experimentos de Validación de Efectividad de Modelos de Rotación Laboral. .	102
Tabla 31. Comparación de Trabajadores con Alto Nivel de Riesgos Ergonómicos.....	103

INTRODUCCIÓN

En el mundo laboral es común encontrar que las condiciones del trabajo no generan confort y mucho menos bienestar a los trabajadores, situación que se da porque en la antigüedad existía una concepción errónea donde el empleado se debía adaptar al trabajo y no el trabajo al ser humano (Mondelo et al., 2001). La importancia de proteger a los trabajadores, contra factores generadores de peligros, incidentes, accidentes y enfermedades laborales, justifican la implementación y la aplicación de acciones que busquen prevenir y mitigar riesgos que se relacionen con el desarrollo y desempeño de actividades cotidianas (OIT, 1996).

Los Trastornos Musculo Esqueléticos (TME) en el hombre son un conjunto de afecciones de los músculos, huesos, tendones y nervios que son generados por la repetición de movimientos en el cuerpo, la presencia de posturas inadecuadas, fuerza excesiva, sobreesfuerzo y condiciones climáticas extremas. Los trabajadores se encuentran propensos al desarrollo de trastornos musculo esqueléticos, debido a condiciones riesgosas y desfavorables en la dinámica de actividades y operaciones dentro de los puestos de trabajo. Las afecciones, incapacidades, absentismo laboral y enfermedades profesionales, muestran la presencia de trastornos musculo esqueléticos, que pone en riesgo la salud y calidad de vida de los trabajadores.

En 2010, se presentaron en Estados Unidos 346.000 casos de lesiones por trastornos musculo esqueléticos, donde los trabajadores requirieron de 11 días por fuera de actividad laboral para su recuperación (Bureau_of_Labor_Statistics, 2011, November 9). De acuerdo con las estadísticas desarrolladas en Colombia, sobre accidentes de trabajo ocurridos en el periodo 2009–2011, se detectó que en el país se presentan aproximadamente 500 accidentes de trabajo por año con consecuencias fatales, y la tasa de accidentalidad promedio se encuentra en 466.554 accidentes por año. Las cifras de enfermedades profesionales han aumentado notablemente pasando de 6.891 enfermedades profesionales en el 2009 a 9117 en el 2011 (FASECOLDA, 2000-2011), lo que indica un aumento del 32%. Esta cifra, es tres veces superior al promedio de enfermedades registradas entre los periodo 2005–2008. En Colombia, un trabajador es diagnosticado con una enfermedad labora cada hora (FASECOLDA, 2000-2011), Mientras que en los Estados Unidos, en promedio 40 trabajadores son diagnosticados cada hora con trastornos musculo esqueléticos. Todo lo anterior demuestra que los trastornos musculo esqueléticos se presentan con alta frecuencia y es importante centrar atención en ellos, pues las afecciones que presenta el trabajador son de naturaleza acumulativa e impactan en su rendimiento, así como la productividad del puesto de trabajo.

La prevención de los trastornos musculo esqueléticos es una de las tareas más importantes de estudio para la ergonomía, la salud ocupacional y la seguridad industrial. La presencia de desordenes en el sistema muscular pueden ser generados por diversas causas que hacen parte de los sistemas productivos, la carga laboral y el ambiente de trabajo. Los trastornos musculo esqueléticos se agrupan

en regiones como: la espalda, cuello, hombros; y sus síntomas prevalecen, y se pueden desencadenar en enfermedades profesionales.

En la Figura 1 se puede apreciar la combinación de los diversos factores propuesto en los estudios pionero de Putz-Anderson (1988). Entre los principales factores de riesgo laborales propensos al desarrollo de Trastornos Musculo Esqueléticos (TME) se encuentra: los movimientos repetitivos, que son características de las tareas cuando las personas están continuamente haciendo el mismo ciclo de trabajo, acciones técnicas y movimientos; la aplicación de fuerza, el cual es una actividad de manipulación de cargas; el trabajo prolongado sin tiempo de recuperación o periodo de descanso seguido, que permite la restauración de las funciones musculo esqueléticas; y el trabajo con posturas forzadas.



Figura 1. Combinación de Factores Asociados a Trastornos Musculo Esqueléticos.

En general, la prevención de accidentes y enfermedades de trabajo se puede hacer bajo tres enfoques como lo describió Kuijer et al. (1999), incluyendo: (i) las soluciones de ingeniería (el rediseño del trabajo, el rediseño del puesto de trabajo, el rediseño de la herramienta, y las propuestas de automatización); (ii) los controles administrativos (turnos de trabajo, descansos, rotación laboral); y (iii) el entrenamiento; y (iv) el uso de equipos de protección personal. En muchos casos las organizaciones en la búsqueda del bienestar del personal, se ven en la obligación de hacer grandes inversiones en mecanismos efectivos que garanticen la seguridad de sus trabajadores, no todas estas practicas son igual de efectivas y económicas, de igual manera no todas las empresas están en capacidad de invertir en reingenierías o en maquinaria de avanzada para solucionar estos inconvenientes, por lo cual una solución estratégica, como la Rotación de Puestos de Trabajo toma una alta relevancia. La rotación laboral es una solución poco costosa y de fácil ejecución (Kogi et al., 2003), que sí es llevada de una forma organizada, podrán alcanzar resultados muy alentadores para el bienestar de los trabajadores y la eficiencia de las compañías (Jorgensen et al., 2005).

El diseño de agendas de rotación laboral como un problema perteneciente al grupo denominado "Problemas de Horarios y Secuenciación", no es una actividad sencilla, en un sistema de rotación se deben analizar un gran número de aspectos como la carga física, la exposición, la duración y la frecuencia con que se presentan los diversos factores de riesgo relacionados con la actividad laboral, así como diferentes ítems relacionados con aspectos individuales, sociales, e inclusive psicológicos, a fin de obtener resultados prácticos al alcance de las posibilidades reales de las organizaciones.

Los métodos aplicados a la generación de rotación de puestos de trabajo se centran en el desarrollo de agendas de rotación que toman en consideración determinados factores de riesgo y aspectos organizacionales, tales como manipulación de carga, ruido, repetitividad de movimientos, competencias, motivación, fatiga, aburrimiento, tiempo ocioso, discapacidad. Sin embargo, estudios desarrollados por Kuijer et al. (2005) evidencian que los trastornos musculo esqueléticos se deben a múltiples factores que requieren ser valorados simultáneamente para poder desarrollar una programación para la asignación de puestos de trabajo que agreguen variabilidad y diversidad en la exposición a los riesgos de los individuos, y así contribuir al bienestar de los trabajadores (Mathiassen, 2006; Wells et al., 2010). Lo anterior son elementos de juicio que muestran la pertinencia de la realización del presente proyecto de investigación, en donde la rotación de puestos de trabajo es una opción que contribuye a la reducción de los trastornos musculo esqueléticos generados por las actividades laborales, garantizando que la carga de trabajo sea equitativamente distribuida entre los trabajadores y se consideren todos aquellos riesgos ergonómicos de forma simultánea presentes en el desarrollo de *actividades repetitivas, manipulación de carga y posturas forzadas*.

Debido a que la efectividad de una rotación de puestos de trabajo esta altamente relacionada con la manera como se diseña, lo importante es no caer en metodologías experimentales y empíricas, por tal motivo la toma de decisiones a la hora de implementar un sistema de rotación se deberá soportar por medio de criterios cuantitativos apoyados de técnicas de valoración ergonómicas que cuantifique el nivel de riesgo al cual se encuentra expuesto los trabajadores, a fin de realizar un análisis detallado que permita inducir las estaciones de trabajo y los trabajadores a rotar (Frazer et al., 2003). El proyecto de investigación se centrara en el diseño y creación de agendas de rotación de puestos de trabajo que permitan agregar diversidad en las actividades que desarrollan los trabajadores por medio de la aplicación de algoritmos genéticos multiobjetivo, en función de minimizar de manera simultánea los riesgos ergonómicos presentes en el desarrollo de actividades con manipulación de carga, tareas repetitivas y posturas forzadas e incómodas, las cuales son medidos por medio del uso de técnicas de valoración ergonómica como el método NIOSH (Waters et al., 1993), OCRA (2002), y RULA (McAtamney y Nigel Corlett, 1993).

OBJETIVOS

Objetivos General

- Diseñar un modelo para creación de agendas de rotación laboral que prevengan los riesgos ergonómicos generadores de trastornos musculo esqueléticos en actividades repetitivas, manipulación de carga y posturas forzadas mediante la aplicación de algoritmos genéticos.

Objetivo Específicos

- Describir las principales investigaciones referentes a las jornadas de rotación laboral, determinando los diferentes enfoques y criterios que deben ser tomados y considerados para su implementación en las organizaciones.
- Identificar las distintas técnicas de valoración ergonómicas que contribuyen a la cuantificación de riesgos ergonómicos en el desarrollo de actividades laborales.
- Plantear el modelo multiobjetivo que integre los riesgos ergonómicos por actividades repetitivas, manipulación de carga y posturas forzadas, aplicada a la rotación de puestos de trabajo.
- Generar un Algoritmo Genético que permita la programación de las jornadas de rotación laboral que contribuya a la minimización de los riesgos ergonómicos de los trabajadores en el desarrollo de actividades repetitivas, la manipulación de carga y posturas forzadas, y a su vez integrar distintos criterios y restricciones que puedan diversificar las agendas de rotación, soportado de herramientas programáticas.
- Validar y ajustar el diseño de un programa de rotación laboral desarrollado por medio de algoritmos genéticos, con base a la información de un escenario productivo.
- Determinar y comparar la efectividad del método propuesto para la rotación de puestos de trabajo que minimiza los riesgos ergonómicos en las actividades repetitivas, manipulación de carga y posturas forzadas de manera simultánea e independiente.

ASPECTOS METODOLÓGICOS

El presente proyecto de investigación que busca la creación de agendas de rotación de puesto de trabajo con el objetivo de minimizar el riesgo ergonómico en actividades repetitivas, manipulación de carga y postura forzada por medio de la aplicación de Algoritmos Genéticos, se desarrollará bajo el siguiente esquema:

- Inicialmente, se procederá a estudiar la rotación de puestos de trabajo como estrategia que permite agregar variabilidad en las actividades de los trabajadores, identificando sus ventajas y desventajas, aspectos claves en su implementación, así como investigaciones que permitan describir la rotación bajo un enfoque de aplicación y optimización.
- El segundo capítulo, se relaciona con el estudio de los trastornos musculo esqueléticos, donde se detallan conceptos, y a la vez se determina la intervención y los métodos de valoración ergonómica que serán incluidos para el desarrollo de un modelo de rotación laboral que considera la manipulación de carga, las repetitividad de tareas y las posturas forzadas.
- El diseño de los modelos de rotación laboral se exploran en el tercer capítulo, donde se concretan la formulación de los modelos de rotación, los esquemas y tipos de modelo para el problema, y la complejidad bajo un enfoque ergonómico, para luego desarrollar los modelos matemáticos que responden a cada uno de los objetivos y así ser integrados en un problema de características multiobjetivo.
- Una vez desarrollado el esquema multiobjetivo, se procede en el cuarto capítulo a construir el algoritmo genético multiobjetivo (NSGA) en conjunto con la aplicación de una herramienta computacional que contribuye a optimizar el problema de rotación laboral considerando varios objetivos simultáneamente.
- Finalmente, en el quinto capítulo se estructura una metodología que permita la creación de agendas de rotación de puesto de trabajo integrando la practicas de valoración ergonómica y se validan a través de un caso de estudio real donde se busca demostrar su efectividad.

1. ESTADO DEL ARTE: ROTACIÓN LABORAL

1.1 Introducción

La rotación laboral es una estrategia para la organización de la actividad laboral, que busca el mejoramiento del bienestar de los trabajadores, por medio del balance creado entre las competencias y habilidades, y las condiciones del trabajo. La implementación de técnicas y métodos que contribuyan en la toma de decisiones en la programación y planeación de las actividades, donde se optimicen los factores de riesgos laborales, ayuda a la preservar la salud de los trabajadores.

Un sistema de rotación parte del propósito de agregar variabilidad en las actividades donde el trabajador alterna el desarrollo de fuerzas y esfuerzos, los cuales son distribuidos en diferentes tareas que requieren distintos movimientos musculares durante la jornada laboral (Jonsson, 1988) y contribuyen en la reducción de carga física y el gasto energético del hombre (Kuijjer et al., 1999). Se ha demostrado que la rotación de puestos de trabajo se presenta como una práctica usual y económicas (Kogi et al., 2003), que busca la disminución de riesgos laborales dentro de la dinámica de las actividades desarrolladas por los trabajadores (Davis et al., 2005).

La aplicación de la rotación laboral a pesar de ser una transferencia de trabajadores en distintas puestos de la organización (Campion et al., 1994), su implementación requiere de un nivel de complejidad en la planeación con respecto a la demanda física del trabajo y el nivel de exposición, duración y frecuencia en el riesgo en que se incurre en la asignación de las tareas dentro las jornadas de trabajo (Frazer et al., 2003; Vezina, 2004; Davis et al., 2005; Asensio-Cuesta et al., 2012).

1.2 Conceptualización de Rotación Laboral

La rotación laboral se define como el proceso de alternar periódicamente a los trabajadores entre diferentes estaciones o actividades, con el objetivo de minimizar el desarrollo de operaciones con sobrecarga física y actividades monótonas (Jonsson, 1988), agregando a las jornadas laborales dinamismo y variabilidad (Kuijjer et al., 1999; Mathiassen, 2006; OSHA). Las tareas y actividades deben ser clasificadas y valoradas de acuerdo a la exposición de diversos factores de riesgo (fuerza, precisión, posición, repetición, ruido, temperatura, fatiga, entre otras), con la intención de obtener agendas de rotación que balanceen la carga laboral y mejoren el rendimiento organizacional (Vezina, 2004; Tharmmaphornphilas y Norman, 2007).

Dentro de otros conceptos, Huang (1999) lo define como la estrategia de transferir los empleados en distintas áreas de trabajo que necesitan de diferentes habilidades y responsabilidades. Por otra parte, Wells (2004) esquematiza un sistema de rotación, como el movimiento de trabajadores en periodos fijos e irregulares entre diferentes estaciones de trabajo, y finalmente un concepto más ergonómico implica que los trabajadores roten de tarea en tarea en periodos determinados, con el fin de reducir carga biomecánica para mejorar la motivación y bienestar de los empleados (Jorgensen et al., 2005).

Un sistema de rotación como una práctica de asignación y secuenciación de factores humanos, puede ser apreciado desde un enfoque táctico y operativo. Bajo una perspectiva táctica, se asume como una disciplina que distribuye las responsabilidades de los trabajadores, con el objetivo de generar preparación y entrenamiento a largo plazo. bajo una perspectiva operativa, se asume como un mecanismo para alternar el desarrollo de tareas y operaciones, durante un turno de trabajo o jornada laboral (Lodree et al., 2009).

La rotación laboral es muy utilizada en el desarrollo de habilidades y competencias por parte de los trabajadores (Huang, 1999), tomando en cuenta que el trabajador es el factor más importante de las organizaciones y su desempeño se relaciona con la productividad (Ortega, 2001; Eriksson y Ortega, 2006). Un diseño de una jornada de rotación laboral consiste en planear y programar la asignación y secuenciación de puestos de trabajo entre los trabajadores (Diego-Mas et al., 2009). Un programa de rotación óptimo depende en gran medida, de la variabilidad en la asignación y el balance de la carga laboral entre operaciones y tareas, donde no se busca proteger a un empleado en particular, sino reducir la exposición al riesgo de todos los trabajadores (Jorgensen et al., 2005; Aptel et al., 2008).

1.3 Ventajas y Desventajas de la Rotación Laboral

Desarrollar una aplicación de rotación de puestos de trabajo, como una medida que propende un cambio organizacional en los métodos de programación del personal genera un conjunto de beneficios y barreras (Ver Figura 2).

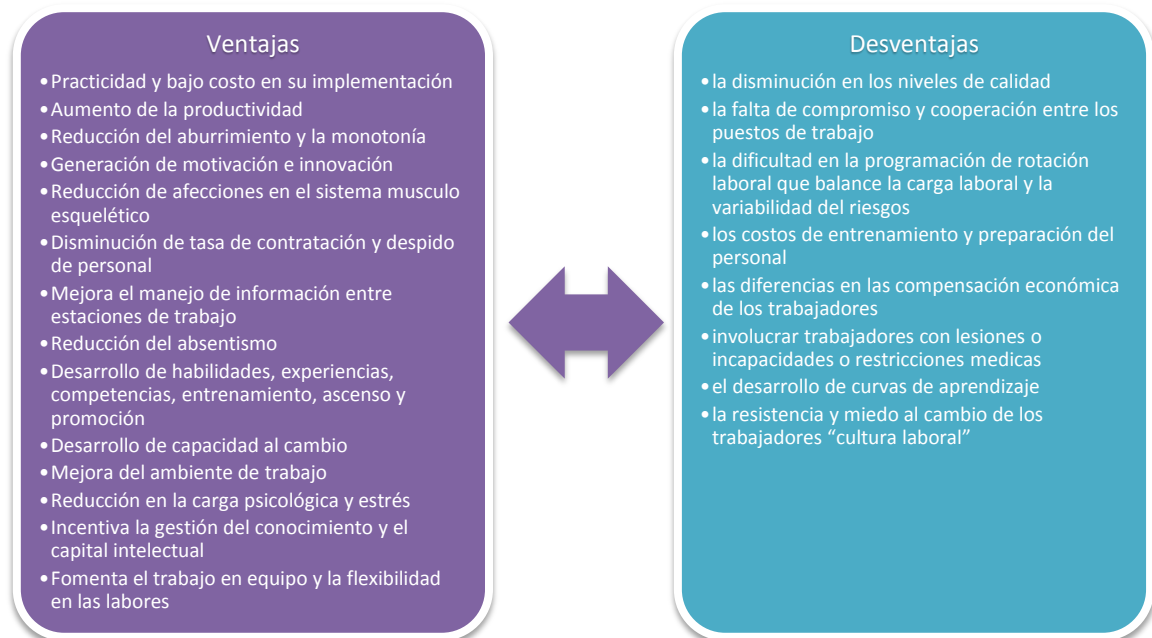


Figura 2. Ventajas y Desventajas de Rotación Laboral.

Triggs y King (2000), Davis et al. (2005), y Lodree et al. (2009), identificaron un conjunto de ventajas y beneficios que trae la rotación para las organizaciones, tales como: la practicidad y rapidez en su

aplicación, el bajo costo de implementación, el aumento de la productividad, el desarrollo de habilidades, experiencias y competencias de los trabajadores, el entrenamiento, el ascenso y promoción de empleados, la generación de motivación e innovación, la reducción de afecciones en el sistema musculoesquelético, la disminución de tasa de contratación y despido de personal, la reducción del aburrimiento y la monotonía, la reducción del absentismo, el desarrollo de capacidad al cambio, la mejora del ambiente de trabajo, y la reducción en la carga psicológica. Por otra parte, también se mejora el manejo del estrés (Ho et al., 2009), la percepción del trabajo y aspectos psicosociales del trabajador (Aptel et al., 2008), la información entre estaciones de trabajo, la gestión del conocimiento (Arya, 2004), el capital intelectual (Brunold y Durst, 2012), el trabajo en equipo y la flexibilidad en las labores (Uusitalo y Jarvi, 2004).

Diversos investigadores reconocen la existencia de un conjunto de barreras o desventajas que obstaculizan la implementación de un sistema de rotación, entre ellas: la resistencia y miedo al cambio de los trabajadores “cultura laboral” (Malinski, 2002), la falta de compromiso y cooperación entre los puestos de trabajo (Vezina, 2004), la dificultad en la programación de rotación laboral que balancee la carga laboral y la variabilidad de los riesgos (Lodree et al., 2009), los costos de entrenamiento y preparación del personal, las restricciones médicas, la disminución en los niveles de calidad mientras se inicia la implementación, el desarrollo de curvas de aprendizaje (Allwood y Lee, 2004), pérdida en el nivel de especialidad en las tareas (Brunold y Durst, 2012) y las diferencias en la compensación económica de los trabajadores (Eriksson y Ortega, 2006).

Wells (2004), declara que otro inconveniente en un sistema de rotación se presenta cuando se desea involucrar trabajadores con lesiones o incapacidades, pero investigaciones desarrolladas por Costa y Miralles (2009) y Asensio-Cuesta et al. (2010), valoran la rotación como una estrategia de inclusión de personas en condiciones de discapacidad, y a la vez en el procedimiento de introducción de trabajadores en rehabilitación en de los procesos organizacionales.

Estudios desarrollados por Jorgensen et al. (2005) cuantificaron y calificaron los objetivos, los factores, beneficios y barreras que se presentan cuando se desea implementar un sistema de rotación laboral. Los resultados de los estudios demostraron que los principales objetivos y beneficios que tienen las compañías y organizaciones son: la reducción de lesiones, accidentes e incapacidades relacionadas con trastornos musculoesqueléticos, así como el entrenamiento del personal para el desarrollo de habilidades y competencias. Por otra parte, factores como la reducción de riesgos laborales y el impacto en la producción son aspectos predominantes cuando se divisa la implementación. Los estudios evidenciaron que las desventajas de mayor impacto que ponen en riesgo la implementación de un sistema de rotación laboral se presentan con la disminución de los índices de calidad y las restricciones médicas de los trabajadores.

1.4 Aspectos y Criterios Claves en la Rotación Laboral

Un diseño de una jornada de rotación laboral consiste en planear y programar la asignación y secuenciación de puestos de trabajo entre los trabajadores (Diego-Mas et al., 2009), los cuales se

esquematizan bajo unos propósitos, y necesitan tomar en cuenta un conjunto de aspectos para dar respuesta a interrogantes como: ¿Quién lo implementara?, ¿En que estaciones de trabajo?, y ¿Cómo se implementara?. Wells (2004) y Vezina (2004), describen diversas consideraciones en el desarrollo de un sistema de rotación laboral (Ver Figura 3).

Desde la percepción organizacional, se requiere respetar principios de calidad y producción, para dar paso a la implementación de un sistema de rotación (Davis et al., 2005). Una asignación y distribución de puestos de trabajo implica que las organizaciones cuenten con la presencia de empleados capacitados y formados en la ejecución de diversas actividades (Aptel et al., 2008), y así contar con escalas salariales propicias para los empleados inmersos en el plan de rotación laboral (Vezina, 2004; Davis et al., 2005).

Según Frazer et al. (2003), Davis et al. (2005), Mathiassen (2006) y Wells et al. (2010), un factor de éxito determinante en la implementación de un sistema de rotación se encuentra relacionado con la variabilidad en la exposición a los riesgos laborales dentro de los puestos de trabajos, debido a que permite infundir diversidad en la carga laboral. Una mala selección de los individuos que realizaran las tareas puede llevar a la disminución de la productividad de la organización y aumento de costos operativos (Campion et al., 1994), para que esta estrategia sea eficaz es necesario que los trabajadores se encuentren interesados en desarrollar y adoptar nuevas habilidades (Ellis, 1999).

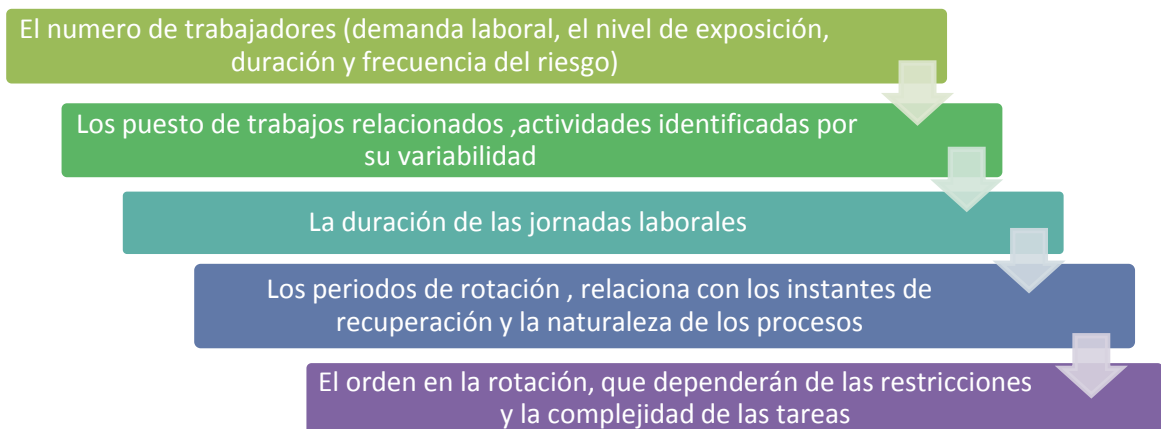


Figura 3. Consideraciones Claves para la Implementación de un Sistema de Rotación Laboral.

Jaturanonda et al. (2006) y Huang (1999), distinguieron criterios claves de los trabajadores a la hora de implementar un sistema de rotación tales como: la antigüedad en puestos de trabajo, los años de servicio en la compañía, la edad, el comportamiento, las características personales, la disposición, la preparación, la adaptabilidad, la compensación y por ultimo las habilidades, competencias y conocimientos.

Uno de los parámetros que caracterizan a un sistema de rotación se encuentra relacionado con los intervalos de asignación de puestos de trabajo. Si el movimiento se lleva acabo con mucha frecuencia, el trabajador pasaría la mayor parte de su tiempo recibiendo instrucciones y capacitaciones acerca de sus

nuevas tareas y por otro lado, si se queda demasiado tiempo en un departamento, podría perder muchas de las habilidades adquiridas en los puestos de trabajo anteriores (Kotaro, 2012). Tharmmaphornphilas y Norman (2004), aplicaron un diseño experimental que permitió determinar los intervalos apropiados de rotación en casos prácticos conocidos, donde se concluye que los rangos deben responder a la naturaleza del sistema productivo en un margen aproximado de 2 horas. Estudios desarrollados por Jorgensen et al. (2005) demostraron que un intervalo de 2 horas es el más utilizado por las compañías para implementar un sistema de rotación. Finalmente, Filus y Okimorto (2012) comprobaron que intervalos entre 1 y 2 horas son propicios para la disminución de la fatiga muscular en esquemas de rotación laboral.

1.5 Escenarios de una Rotación Laboral

Un diseño de una jornada de rotación laboral consiste en planear y programar la asignación y secuenciación de puestos de trabajo entre los trabajadores (Diego-Mas et al., 2009), los cuales se esquematizan bajo un conjunto de propósitos, dentro de los que se hallan: i) la reestructuración en capacidad de fuerza laboral, ii) la reasignación periódica de los empleados, iii) la mejora de la eficiencia y la productividad (Jaturanonda et al., 2006). A continuación se hace referencia en distintos ambientes sobre los que se puede dar una rotación de puestos de trabajo (Ver Figura 4).



Figura 4. Enfoques de un Sistema de Rotación Laboral.

De acuerdo con Eriksson y Ortega (2006), la rotación laboral es una herramienta para el entrenamiento y preparación, que ayuda a las organización conozca las capacidades de sus trabajadores. La preparación en diversos puestos de trabajo permite aumentar la acumulación del capital humano y la motivación de los trabajadores, debido a que el conocimiento no depende de una sola persona, y de este modo aplicar la rotación como una herramienta para compartir el conocimiento (Wells, 2004). Campion et al. (1994) determina la rotación laboral como un instrumento para el desarrollo de carrera dentro de las organizaciones, las cuales deja un gran aprendizaje.

Un sistema de rotación mejorar la percepción del trabajo y también contribuye a en factores psicosociales del trabajador y su visión acerca del estrés (Rissén et al., 2002). La rotación laboral se creo inicialmente como una estrategia para acabar con la fatiga, el aburrimiento y la monotonía (Hsieh y Chao, 2004; Aptel et al., 2008). La rotación laboral como un instrumento para la mejora de productividad, permite el desarrollo de destrezas que pueden ser aplicas a la solución de problemas, de modo que se mejora la curva de aprendizaje, y se cuantifica que tanto pueden los trabajadores aprender (Allwood y

Lee, 2004). Una rotación de puestos de trabajo como mecanismo de prevención de trastornos musculo esqueléticos ayuda a prevenir la sobrecarga muscular que se presentan en las tareas, brindando seguridad y salud en el trabajo, y tomando en cuenta que los trastornos musculo esqueléticos son de origen multifactorial (Kuijjer et al., 1999; Kogi et al., 2003).

1.6 Rotación Laboral y los Trastornos Musculo Esqueléticos

La presencia de trastornos musculo esqueléticos en los trabajadores son atribuidos a la ejecución de actividades laborales que contienen repetitividad de movimientos entre tareas, una constante manipulación de cargas, y la adopción de posturas incómodas o inadecuadas (Grant et al., 1997; Rissén et al., 2002). Este conjunto de actividades promueve la generación de trastornos musculo esqueléticos en diversas partes del cuerpo, desarrollando afecciones, dolencias y enfermedades profesionales, que traen consigo incapacidades y altos costos para las organizaciones (Kuijjer et al., 1999; Asensio-Cuesta et al., 2012).

La rotación de puestos puede prevenir lesiones, pero también puede aumentar la probabilidad de contraer una lesión (Frazer et al., 2003). Dicho de otra forma, un trabajador que tiene un empleo con baja exposición a contraer una enfermedad o a sufrir una lesión, se podría ver afectado al aplicar un nuevo puesto de trabajo que puede tener una alta exposición a estos factores y así contradecir lo que busca un sistema de rotación (Jorgensen et al., 2005).

De acuerdo con las distintas medidas propuestas para controlar la presencia de trastornos de traumas musculo esqueléticos se encuentra: la reingeniería del puesto de trabajo, la organización del trabajo, la implementación de elementos de protección personal, el entrenamiento y la aplicación de controles administrativos. La implementación de soluciones ergonómicas debe comenzar con una modificación del puesto del trabajo y una aplicación de técnicas para la organización y programación de actividades (Kuijjer et al., 1999). La ingeniería de control o medidas administrativas que permiten la inclusión de alternativas como la rotación de puestos de trabajo, es una opción poco costosa para las organizaciones (Kogi et al., 2003; Tharmmaphornphilas y Norman, 2007), controlan la exposición al riesgos (Asensio-Cuesta et al., 2012), y previenen la aparición de trastornos musculo esqueléticos (Kuijjer et al., 1999; Rissén et al., 2002; Wells et al., 2010). Aspectos como la demanda física del trabajo y el nivel de exposición, duración y frecuencia de los riesgos, tienen importancia en la generación de trastornos musculo esqueléticos, si se toma en cuenta que cada trabajador se adapta al puesto de trabajo y le imprime su ritmo (Vezina, 2004), por tal motivo la implementación de sistemas de rotación permite intervenir dichos aspectos sin modificar ni cambiar los sistemas productivos.

1.7 Enfoque Empírico Aplicados en la Rotación Laboral

Bajo un contexto experimental, los estudios en la rotación de puestos de trabajo se fundamentan en determinar la importancia y efectividad de esta medida administrativa dentro de la gestión organizacional, sin profundizar en cual podría ser la mejor programación y secuenciación de tareas (Lodree et al., 2009). La Figura 5 muestra la evolución en diversas investigaciones que capitalizaron los resultados de implementar sistemas de rotación, y a continuación se detallan así:

Jonsson (1988), desarrolló pruebas electromiográficas en los hombros de los trabajadores de una industria electrónica, demostrando que la rotación laboral genera variados niveles de actividad muscular, tomando en cuenta que las variaciones se encuentran relacionadas con el tipo de actividad que se realiza, la personas encargadas y como se alternan las tareas; Hazzard y Mautz (1992) implementaron la rotación en una industria de televisores, observando obstáculos en la diferenciación de niveles de riesgo de las tareas y la falta de entrenamiento por parte del trabajador para ejercer un nuevo rol en la rotación; Henderson y Kumar (1992) practicaron la rotación en una industria avícola donde clasificaron las actividades con la demanda laboral y desarrollaron las asignaciones del personal. Como consecuencias del estudio, se obtuvo una reducción de las afecciones musculo esqueléticas por parte de algunos empleados mientras tareas con un alto nivel de estrés no contaron con el mismo éxito; Grant et al. (1997) plantearon la rotación de puestos de trabajo en la sección de embarque en una industria de muebles en Estados Unidos como estrategia para mitigar los riesgos de los trabajadores en la manipulación de materiales y mercancías.

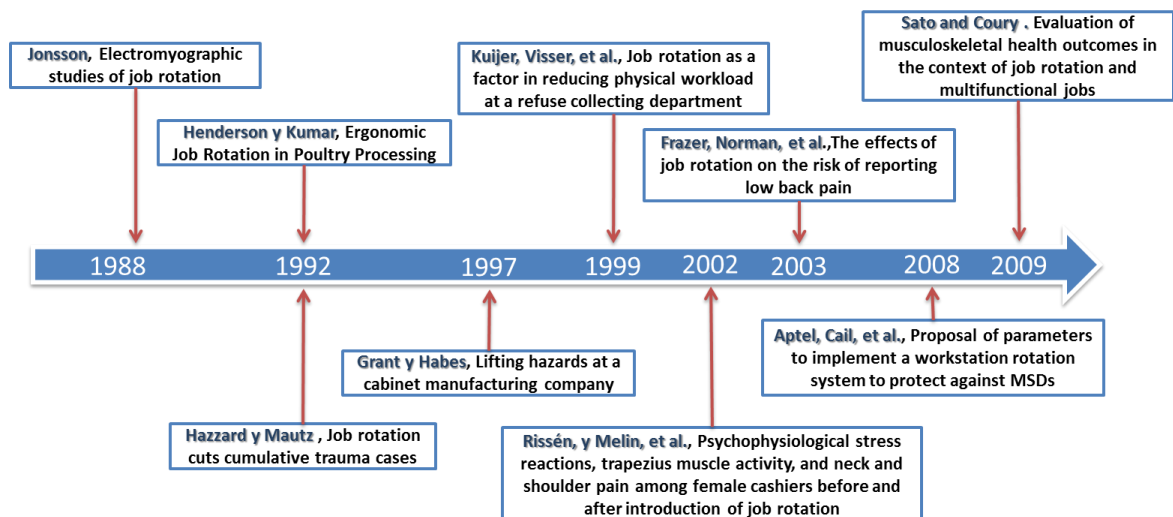


Figura 5. Evolución Empírica de Rotación Laboral.

Kuijer et al. (1999) con un estudio desarrollado en trabajadores encargados de la recolección de basuras (barredores, recolectores y conductores) por grupos, comprobaron que la rotación tienen un impacto en el nivel de fatiga y esfuerzo de los trabajadores, evidenciando un efecto significativo en el gasto energético y la duración de las actividades. Rissén et al. (2002) evaluaron la rotación de cajeras de un supermercado, bajo aspectos físico-psicológicos del estrés y síntomas musculo esqueléticos. Los resultados concluyen que la rotación mejora moderadamente la carga y percepción laboral. Frazer et al. (2003) estudiaron el efecto que causa la rotación en la generación de afecciones en la columna. El caso fue valorado en una línea de ensamble donde demostraron los efectos que genera el cambio de actividades con diversa carga de trabajo. Aptel et al. (2008) analizaron la aplicación de un sistema de rotación en una industria de hornos, evidenciando un impacto positivo en factores psicosociales de los trabajadores, y su percepción del estrés y monotonía. También demostraron la ineficiencia de aplicar la rotación como alternativa de prevención de trastornos musculo esqueléticos cuando no existe

variabilidad y cambios en la demanda laboral de los puestos de trabajo. Sato Tde y Coury (2009) estudiaron la rotación de los trabajadores en una industria de productos para oficinas, donde se cuantifico el nivel de riesgo a través de la percepción y valoraciones ergonómicas (EWA) en tareas con alta manipulación y repetitividad de movimientos en operación realizadas en postura fija, sentados o caminado. Los estudios desarrollados permitieron identificar que la variabilidad muscular en la carga de trabajo es un factor clave para la rotación laboral.

1.8 Enfoque en Optimización Aplicadas en la Rotación Laboral

La creación de agendas de rotación de puestos de trabajo como problema de optimización combinatoria que hace parte de los modelos para la programación y secuenciación de jornadas laborales, necesitan en la mayoría de casos técnicas heurísticas y metaheurísticas para su solución, a causa de la gran cantidad de factores que se deben considerar (Carnahan et al., 2000). Para la asignación de n trabajadores en n tareas en un periodo t , el número total de agendas es $(n!)^t$. Debido al tamaño del conjunto de soluciones potenciales hacen que la valoración de las agendas de rotación sea un problema complejo y extenso de característica NP Hard (nondeterministic polynomial time). (Por ejemplo; Un conjunto de 5 empleados en 5 puestos de trabajo cada hora en una jornada laboral de 8 horas, el numero total de agendas de rotación disponibles es de 42 Cuatrillones de posibilidades). Dentro de los primeros modelos aplicados a la asignación de trabajadores se encuentra el desarrollado por Pinedo (1995), el cual ha sido utilizado en numerosas aplicaciones de programación.

El problema de asignación y secuenciación de tareas a empleados esta clasificado dentro de la categoría de problemas de optimización combinatoria, aunque existen técnicas de programación entera aplicados a este tipo de problemas (Carnahan et al., 2000; Tharmmaphornphilas et al., 2003; Aryanezhad et al., 2009; Costa y Miralles, 2009; Azizi et al., 2010), otros autores han explorando el uso de heurísticas (Kullpattaranirun y Nanthavanij, 2005; Yaoyuenyong y Nanthavanij, 2006; Tharmmaphornphilas y Norman, 2007; Costa y Miralles, 2009; Otto y Scholl, 2012) y metaheurísticas (Carnahan et al., 2000; Seçkiner y Kurt, 2007; Seçkiner y Kurt, 2008; Diego-Mas et al., 2009; Michalos et al., 2010; Asensio-Cuesta et al., 2011; Asensio-Cuesta et al., 2012; Ayough et al., 2012), como una alternativa para solucionar este tipo de problemas, donde existe un espacio de solución muy amplio (Ver Tabla 1).

AUTOR	AÑO	OBJETIVO (RIESGO)	METODO
Carnahan, et al.	2000	Manipulación de carga (JSI)	PE y Algoritmo Genético
Tharmmaphornphilas, et al.	2003	Ruido (NIOSH-DND)	PE
Kullpattaranirun y Nanthavanij	2005	Ruido	Algoritmo Genético
Yaoyuenyong y Nanthavanij	2006	Ruido	Heurística
Bhadury y Radovilsky	2006	Costo de Asignación y Aburrimiento	Heurística
Tharmmaphornphilas y Norman	2007	Manipulación de Carga (JSI)	Heurística
Seçkiner y Kurt	2007	Carga Laboral	Recocido Simulado
Seçkiner y Kurt	2008	Carga Laboral	Colonia de Hormigas
Yaoyuenyong y Nanthavanij	2008	Ruido – Gasto Energético	Heurística
Aryanezhad, et al.	2009	Ruido, Manipulación de Carga, Habilidades y Tiempo de Ocio	Heurística- PL Metrica
Diego-Mas, et al.	2009	Repetitividad de Movimientos	Algoritmo Genético

AUTOR	AÑO	OBJETIVO (RIESGO)	METODO
Costa y Miralles	2009	Balanceo de Línea y Discapacidad	Heurística
Azizi, et al.	2010	Aburrimiento y Variación del Conocimiento (Olvido)	Algoritmo Genético, Recocido Simulado y Búsqueda Tabú
Michalos, et al.	2010	Fatiga , Distancia, Competencias y la Repetitividad de Tareas	Algoritmo Inteligente
Asensio-Cuesta et al.	2010	Repetitividad y Discapacidad	Algoritmo Genético
Asensio-Cuesta et al.	2011	Repetitividad y Competencias	Algoritmo Genético
Asensio-Cuesta et al.	2012	Repetitividad de Tareas (OCRA)	Algoritmo Genético
Ayough, et al.	2012	Aburrimiento	Algoritmos de Competencia Imperativa y Algoritmo Genético
Otto y Scholl	2012	Genérico (Enfoque Ergonómico)	Heurística y Búsqueda Tabú.
Moreira y Costa	2013	Discapacidad y Limitaciones	Heurística-PE

Tabla 1. Estado del Arte en Optimización para la Planificación de Rotación Laboral.

Los trabajos desarrollados por Carnahan et al. (1998; 1999; 2000) han sido generalmente aceptado como estudio pionero enfocado al problema de la rotación de puestos de trabajo aplicado a la prevención de trastornos musculo esqueléticos. Carnahan et al. (2000), precursores en la creación de agendas de rotación de puestos de trabajo utilizo programación entera y un algoritmo genético para la construcción de un programa de rotación laboral que previene en las tareas de manipulación de carga y la generación de lesiones en la espalda, el riesgo es evaluando por medio del método ergonómico JSI “Job Severity Index”. Dentro de las herramientas implementadas en la solución del problema esta la utilización de clúster de información como una opción de desarrollar agendas alternas.

Tharmmaphornphilas et al. (2003) propusieron un modelo de programación lineal entera que minimiza la exposición al ruido y reduce la probabilidad de perdida de la capacidad auditiva en los trabajadores en diferentes tareas. La construcción matemática del modelo se desarrolló con el tiempo promedio ponderado del nivel y la dosis de exposición diaria al ruido en un aserradero. El resultado de este estudio manifestó que la aplicación del modelo de programación de jornadas laborales trae beneficios en términos de reducir la exposición al ruido, pero deja de lado otros factores de riesgos como vibración, temperatura, toxicidad o trastornos musculo esqueléticos que son importantes en la salud y el bienestar de los trabajadores.

A nivel de métodos heurísticos, Kullpattaranirun y Nanthavanij (2005) presentaron una metodología para hallar la asignación de un grupo de trabajadores con riesgo en la exposición al ruido. Dentro del método propuesto se incluye una nueva dinámica de parametrización de un algoritmo genético con el objetivo de reducir el tiempo computacional para la obtención de respuestas con calidad. Yaoyuenyong y Nanthavanij (2006) también plantearon un método algorítmico aplicado al problema de asignación mínima de trabajadores expuestos al riesgo sonoro con capacidad de obtener respuestas adecuadas con eficiencia computacional.

Bhadury y Radovilsky (2006), plantearon un modelo de programación entera con el cual se busca minimizar los costos de asignación de las tareas y el aburrimiento de los trabajadores. El planteamiento general del modelo multiobjetivo fue modificado en tres versiones que tomaban el aburrimiento de los empleados en diferentes escenarios. Para cada uno de los modelos planteados se expuso la implementación de un algoritmo y validado por medio de métodos heurísticos.

Tharmmaphornphilas y Norman (2007), desarrollaron un método heurístico para el desarrollo de agendas de rotación de puestos de trabajo robusto que reduce la exposición de afecciones en la espalda debida a la manipulación de carga valorada a través del "Job Severity Index". La heurística Greedy RD toma en cuenta factores y características reales para el problema, con capacidad de arrojar soluciones muy ajustadas (Calidad), donde no se conoce con certeza la información en la demanda de las actividades de los trabajadores y existen diversos perfiles de los trabajadores. El autor potencializa la versatilidad de la aplicación para ser repicadas en otros tipos de riesgos y al mismo tiempo ser analizada con respecto a otros factores tales como: productividad, entrenamiento, satisfacción de los empleados, gestión del cambio, compensación, y ausentismo entre otros aspectos.

Yaoyuenyong y Nanthavanij (2008), generaron dos procedimientos heurísticos para la reducción de exposición diaria como un factor de riesgo ocupacional, evaluado la metodología dentro de problemas donde el riesgo es igual para todos los trabajadores, y donde los riesgos son independientes. La heurística tiene como objetivos encontrar el número de trabajadores mínimo dentro de un esquema de rotación, luego determina el periodos de asignación de los trabajadores y finalmente, se retroalimenta y mejora la asignación de los trabajadores dentro de los puestos de trabajo. Dentro de los ejemplos propuestos, el procedimiento heurístico demuestra tener un buen rendimiento.

Aryanezhad et al. (2009), desarrollaron un modelo multiobjetivo que combina cuatro criterios simultáneamente para programar la rotación de trabajadores: (i) minimizar el máximo nivel de exposición a lesiones auditivas medido por medio de la dosis diaria de ruido , (ii) minimizar el nivel de riesgo en la espalda por manipulación de carga evaluado por medio del JSI (Job Severity Index), (iii) priorizar en el desarrollo de nivel de habilidades y competencias, y por ultimo (iv) minimizar el tiempo ocio de los trabajadores. Finalmente el problema es resuelto como un modelo integrado por medio del método LP-métrico, y para comprobar su eficacia se resuelve por separado cada uno de los objetivo y son comparados con el modelo general, encontrado que el resultado es mejor sobre los modelos de un solo objetivo.

Costa y Miralles (2009), Consideraron la programación de puestos de trabajo dentro de la asignación y balanceo de una línea de ensamble aplicados a personas discapacitadas. El modelo radica en el estudio de agendas de puestos de trabajo inmerso en un problema de balanceo de línea (ALWABP), donde se busca imprimir diversidad en las tareas y mejorar los niveles de productividad. La construcción del modelo de programación lineal mixto parte de la estructura del balanceo de línea con trabajadores que poseen diferente eficiencia y luego se integra con las restricciones de rotación de puestos de trabajo, donde la función objetivo es maximizar la variabilidad de tareas desarrolladas por los trabajadores en distintos periodos. El planteamiento para resolver el modelo se da por medio de un modelo mixto y un

algoritmo de descomposición. El método heurístico soluciona el problema por objetivos, hallando una respuesta inicial que hace parte de la primera agenda de rotación y luego se actualiza el modelo en cada uno de los periodos para completar la rotación de puestos de trabajo, demostrando su eficiencia con respecto a la calidad de las respuestas y su rendimiento computacional.

Azizi et al. (2010), desarrollaron un modelo de programación matemática aplicada al problema de rotación en sistema de manufactura cuyo objetivo es minimizar el aburrimiento y la variación del conocimiento (olvido) de los trabajadores. En la rotación de puestos de trabajo se debe manejar un balance entre los periodos y las frecuencias de rotación, que le permita al trabajador adaptarse en la nueva asignación de actividades y a la vez generar competencias diversas. Dentro la aplicaciones metaheurísticas los autores implementaron la combinación de un algoritmo genético, un recocido simulado y una búsqueda tabú, enfocado a la solución de rotación de trabajadores denominado SAMED-JR. Al comparar el rendimiento del SAMED-JR y cada una de las metaheurísticas por separado en el problema con diferentes escenarios, los resultados demuestran un mejor rendimiento en calidad de respuesta y tiempo de convergencia sobre el método heurístico híbrido. La aplicación de modelos que integren la curva de aprendizaje y olvido de los trabajadores, es una práctica innovadora, la cual se valora por medio del tiempo de retraso por falta de habilidades y motivaciones en la ejecución de las operaciones por parte del trabajador.

La aplicación del algoritmo de recocido simulado de Seçkiner y Kurt (2007) y el algoritmo de colonia de hormigas (Seçkiner y Kurt, 2008), demostraron ser una nueva aplicación en la solución del problema de agendas de puestos de trabajo para disminuir la carga laboral de los trabajadores. El estudio del problema de rotación de puestos de trabajo se desarrollo con diferentes replicas en un problema de asignación de trabajadores tomando diferentes intervalos de rotación. Los resultados arrojados por los dos métodos demuestran que son adecuados y bastante efectivo para la complejidad del problema, pero la efectividad de estas metaheurísticas se ponen a prueba cuando se incrementa al elevar el número de trabajadores en la rotación.

La utilización de un algoritmo inteligente por parte de Michalos et al. (2010) y el diseño de una herramienta web (Michalos et al., 2011) permitieron imprimir una dinámica de flexibilidad en la obtención de agendas de rotación de puestos de trabajo. El algoritmo toma múltiples criterios como el costo, la fatiga acumulada, distancia entre puesto de trabajo, las competencias y la repetitividad de tareas. El método se encuentra diseñado bajo una perspectiva tecnológica, que permite la actualización de la información de la carga laboral de acuerdo con la demanda y la gestión productiva. Debido al carácter multicriterio que posee el método es necesario trabajar en un diseño experimental que cuantifique la participación de cada uno de los factores dentro de la solución del modelo y a la vez profundizar en el diseño de las frecuencias de rotación.

Por medio de un algoritmo genético Diego-Mas et al. (2009) determinaron un conjunto de agendas de rotación de puesto de trabajo con característica multicriterio. El algoritmo tomaba en cuenta 48 aspectos agrupados en 4 ítems como movimientos, capacidades generales, capacidades de comunicación y capacidades mentales. En la ejecución del modelo se utiliza la cuantificación de los movimientos

musculares de los trabajadores como función objetivo a mejorar, y los demás ítems son tomados como restricciones o penalizaciones a cumplir en el diseño de las agendas de trabajo. El modelo multicriterio busca la reducción de la monotonía, la fatiga y riesgos de presencia de trastornos musculoesqueléticos. El modelo toma las limitaciones y preferencias del trabajador, y así el empleado es participativo en la creación de las agendas de trabajo. Dentro de futuros aspectos se halla la inclusión de diversos factores que tomen en cuenta valoraciones ergonómicas que prevengan la aparición de trastornos de traumas acumulativos. La construcción metodológica para la generación de agendas de trabajo está plasmada en un software llamado DPI-ASEPEYO.

Asensio-Cuesta et al. (2010) proponen un algoritmo genético multicriterio, aplicado a la creación de un programa de rotación laboral para empleados en condición de rehabilitación y discapacidad (física, psicológica y comunicativa). El modelo es planteado de forma similar al de Diego-Mas et al. (2009) y es restringido por aquellas actividades y puestos de trabajo que pueden desempeñar los trabajadores con algún tipo de limitación o carencia de habilidad o competencia. En el desarrollo se toma el perfil y las competencias laborales que dispone la organización para hacer participar a trabajadores con discapacidad. La función de validación del modelo es cuantificada en relación con los movimientos musculares ejercidos por los trabajadores en cada una de las áreas de trabajo. El algoritmo genético es validado y comparado con una agenda de rotación restringida, y una no restringida, demostrando su desempeño en la obtención de respuestas adecuadas. Luego, Asensio-Cuesta et al. (2011), diseñan un algoritmo genético con la capacidad de incluir aspectos ergonómicos, físicos, y criterios de competencias laborales. Dentro de los criterios ergonómicos se toma la repetitividad de movimientos musculares del cuerpo. Los resultados demostraron su calidad y en un tiempo computacional adecuado.

Ayough et al. (2012) ejecutaron un estudio en la creación de agendas de rotación de puestos de trabajo para el aburrimiento de los empleados. El método es planteado por medio de un modelo de programación entera que busca minimizar el nivel de aburrimiento en las actividades ejecutadas por el trabajador. El problema toma la aplicación de trabajadores y puesto de trabajos no balanceados, lo que se considera una innovación en este tipo de modelos. El modelo es resuelto a través de algoritmos genéticos y algoritmos de competencia imperativa (ICA), donde este último demuestra su potencialidad al ser capaz de obtener mejores respuestas en igual tiempo computacional.

Asensio-Cuesta et al. (2012), desarrollaron un método para diseñar agendas de puestos de trabajo que previene la generación de afecciones musculoesqueléticas por el desarrollo de actividades repetitivas. Las tareas repetitivas dentro del puesto de trabajo, cuantificando el nivel de riesgo al que se exponen los trabajadores las cuales fueron valoradas por medio del procedimiento ergonómico OCRA. El método cumple su propósito, generando agendas de trabajo que balancea el riesgo de repetitividad de operaciones entre los trabajadores, previniendo que su actividad persista en niveles de alto riesgo.

Otto y Scholl (2012), desarrollaron la aplicación de un enfoque ergonómico desde un contexto genérico, aplicando una heurística de suavizado que permita la búsqueda de respuestas eficientes para el problema de rotación laboral donde existe un alto nivel de complejidad, aplicado dentro de la industria de ensamble automotriz. La implementación de la heurística dentro de una búsqueda tabú demostraron

tener mejor rendimiento en contraste con heurística Greedy RD y el solver FICO Xpress, generando así mejor calidad de respuestas en menor tiempo computacional.

Moreira y Costa (2013), Propone un algoritmo híbrido que usa una programación entera mixta para la seleccionar los programas adecuados para de un grupo de soluciones heurísticamente construidos. La investigación propone equilibrar las cadenas de montaje con los trabajadores heterogéneos en los centros de trabajo protegido para personas discapacitadas, teniendo en cuenta los horarios de trabajo a tiempo parcial. Este problema muestra que bajo este enfoque es rápido, flexible y preciso en comparación con los métodos disponibles actuales.

1.9 Perspectivas y Conclusiones

La rotación laboral es una práctica que se vienen dando en el sector manufacturero y de servicios. Estudios desarrollados por Osterman (1994) evidenciaron que un 26% de los establecimientos tienen involucrados a sus trabajadores en rotación laboral, más adelante encuestas desarrolladas por el mismo autor demostraron que esta cifra había aumentado en un 50% en 1997. Luego, Gittleman et al. (1998) reportó que el 24% de las compañías con más de 50 trabajadores han implementado la rotación laboral. Finalmente, Jorgensen et al. (2005) en estudios realizados reveló que el 42% de industrias estudiadas en Estados Unidos aplicaron la rotación laboral como un instrumento en la gestión organizacional y estratégica para enfrentar los trastornos musculoesqueléticos.

Según Cosgel y Miceli (1999) la rotación laboral es considerado uno de los éxitos en los cambios organizacionales desarrollados por las compañías japonesas, donde se pasó de un trabajo especializado a obtener trabajos polifuncionales dentro de la organización, y generando un ahorro en los costos de entrenamiento. En un sistema de rotación nos es fácil comparar la efectividad de los estudios de la rotación de puestos de trabajo, debido a que el problema posee una complejidad que hace de cada aplicación un caso único (Vezina, 2004), en el que muchas veces los trabajadores no están en capacidad de percibir los mismos beneficios (Cosgel y Miceli, 1999), de modo que los efectos de la especialización del trabajo y la rotación laboral generan resultados diferentes debido a los cambios en la naturaleza de los puestos de trabajo (Hsieh y Chao, 2004).

La rotación laboral es una medida administrativa que aunque es de carácter temporal, puede ser estandarizada (Huang, 1999), cabe resaltar que no existen estudios que cuantifiquen su beneficio en el largo plazo de acuerdo con los diversos factores de riesgos estimados dentro de los sistemas productivos. La rotación laboral como método de organización del trabajo no podrá reemplazar el rediseño de puestos de trabajo que los requieran, debido a que un sistema de rotación ponen en control un conjunto de riesgos, mientras la reingeniería del puesto del trabajo se encuentra en capacidad de aislarlo y disminuir los factores de riesgo (Kuijjer et al., 2005). Bhadury y Radovitsky (2006), señalan que la ineffectividad de la rotación de puestos de trabajo está altamente correlacionada con la estructura como se diseñan las agendas de rotación, lo adecuado es no caer en metodologías simples. Por tal motivo Jaturanonda et al. (2006) recomiendan la toma de decisiones apoyadas de criterios cuantitativos a la hora de implementar sistemas de rotación.

La rotación laboral tiene un efecto positivo en la disminución de la carga física, enriqueciendo el trabajo y haciendo menos monótono, además es un factor motivador que intrínsecamente aumenta la satisfacción en el puesto de trabajo, reduciendo significativamente la percepción de la carga física del trabajo (Kuijjer et al., 1999). Definitivamente estrategias como la rotación se deberá realizar bajo un marco inductivo y participativo a fin de minimizar aquellos impactos generados al implementar completamente la rotación de puestos de trabajo (Lodree et al., 2009). El balance entre los pros y contras que ofrece metodologías como la rotación de puestos de trabajo, lo hacen una herramienta multipropósito, que requiere un alto grado de planeación y programación, donde sus efectividad neta esta dada en el largo plazo (Malinski, 2002; Davis et al., 2005).

La aplicación de rotación, además de estar relacionada con aspectos ergonómicos también pueden ser aplicadas en procesos donde se requiere mejorar el rendimiento y la productividad, es el caso de la reasignación de puestos de trabajo dentro de los sistemas productivos (Zülch et al., 2004), el balanceo de línea (Otto y Scholl, 2011; Moreira y Costa, 2013), presupuestar la prevención de accidente (Asawarungsaengkul y Nanthavanij, 2008), la programación y locación de la fuerza de trabajo (Asawarungsaengkul y Nanthavanij, 2008) (Othman et al., 2012), la asignación dentro de celdas de manufactura (McDonald et al., 2009), y la creación de destreza para la solución de problemas por parte de los trabajadores (Allwood y Lee, 2004).

Dentro de las últimas investigaciones, Michalos et al. (2013) demostraron que la adopción de técnicas de rotación laboral puede mejorar significativamente la calidad de los productos, reduciendo de manera drástica el número de errores que se presentan en una línea de montaje. En el estudio se estudiaron las características del operador, el producto, así como el entorno de ensamblaje a fin de que la probabilidad de ocurrencia de error al ser calculado para cada tarea de montaje. El método se aplica en un caso de estudio, con la participación del conjunto de los vehículos pesados. En este caso, la distribución de la fatiga y el enriquecimiento del entorno de trabajo pueden conducir a la reducción de errores de montaje.

2. RIESGOS ERGONOMICOS EN TRASTORNOS MUSCULO ESQUELETICOS

2.1 Introducción

Los diferentes cambios organizacionales han contribuido notablemente en las características del trabajo, dentro de las compañías siempre existirán cambios, como lo pueden ser variaciones en los niveles de producción, los cuales impactan y generan modificaciones en la fuerza y carga laboral, de manera que si la exposición a diversos factores de riesgos ocupacionales y la fatiga se intensifican puede llevar al desarrollo de dolencias y afecciones en los trabajadores. La alta incidencia de desordenes musculo esqueléticos requiere trabajar en su control y prevención, debido a su incidencia en discapacidades, absentismo laboral y repercusiones en la salud, además de las compensaciones económicas que deben ser asignadas a los trabajadores con estos síntomas y los efectos sobre la productividad de las organizaciones (Council_of_Medicine, 2001). En la actualidad el estudio y diagnostico de todas aquellas actividades que generan estrés sobre el sistema musculo esquelético son de interés general para la comunidad académica (Bernard, 1997; Aptel et al., 2002).

2.2 Conceptualización de Trastornos Músculo Esqueléticos

Las trastornos musculo esqueléticos son desordenes y afecciones que involucran nervios, tendones, músculos y estructura ósea del hombre, que se dan por sus labores y actividades cotidianas. La mayor parte de dolencias se presentan en el cuello, extremidades superiores e inferiores, hombros, codo y espalda (Bernard, 1997). Aptel et al. (2002) lo define como una condición multifactorial del trabajador con componentes ocupacionales asociados con aspectos físicos, psicosociales, individuales presentes en el puesto de trabajo, que se manifiestan por medio de inflamaciones, estrés y trastornos degenerativos responsables de dolor y el deterioro funcional en tejidos, nervios y músculos.

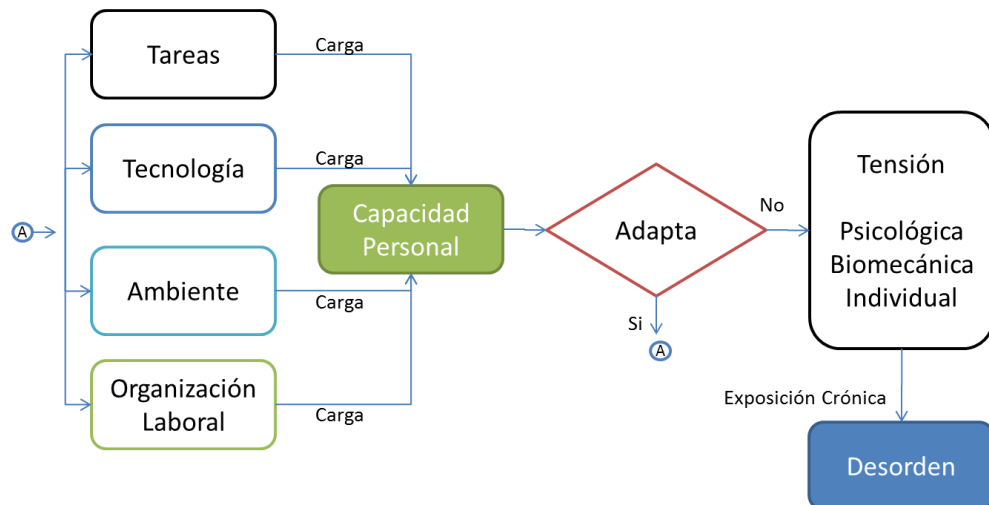


Figura 6. Modelo Conceptual de los Trastornos Musculo Esqueléticos, Adaptado de Karsh et al. (2001).

En la Figura 6 se presenta un modelo conceptual adaptado de Karsh et al. (2001) que sintetiza los diferentes elementos de un sistema laboral que afecta al sistema musculo esqueléticos. Dentro del modelo, los elementos interactúan de la misma forma como las actividades de trabajo son llevadas a cabo. El hombre como centro del sistema con sus características físicas, personalidad, percepciones y comportamiento. El hombre cuenta con la tecnología para el desarrollo de sus tareas, pero al tiempo sus capacidades se relaciona con las habilidades para el manejo de la tecnología. Los requisitos de las tareas también afectan las habilidades y conocimientos necesarios. Tanto las tareas, tecnología, el contenido del trabajo exigen de carga física al trabajador. Las tareas y las tecnologías se llevan a cabo en un entorno que involucra aspectos físicos y sociales del ambiente laboral. Existe una estructura organizacional que define la naturaleza de las actividades, y el nivel de interacción y control en la carga de trabajo. Todas estas consideraciones se combinan para definir las cargas de las personas. Es la capacidad de la persona para hacer frente a estas cargas que producen desordenes y que puede conducir a la tensión musculo esquelética. La capacidad de equilibrar estas cargas determina los desordenes y la tensión potencial.

Numerosos estudios epidemiológicos han establecido que aspectos claves en la aparición de trastornos musculo esqueléticos dependen en gran medida a los niveles de exposición ocupacionales (intensidad, frecuencia y duración (Ver Figura 7)) en factores biomecánicos (movimientos repetitivos, manipulación de carga, esfuerzos extenuantes, posturas incómodas), factores psicosociales (estrés, carga mental, ansiedad, desesperación, relaciones interpersonales, organización, funcionalidad, temporalidad, autonomía, monotonía) y factores individuales (edad, género, antropometría, hábitos, actividad física, contextura, patrones genéticos)(Bernard, 1997; Aptel et al., 2002; Faucett, 2005).

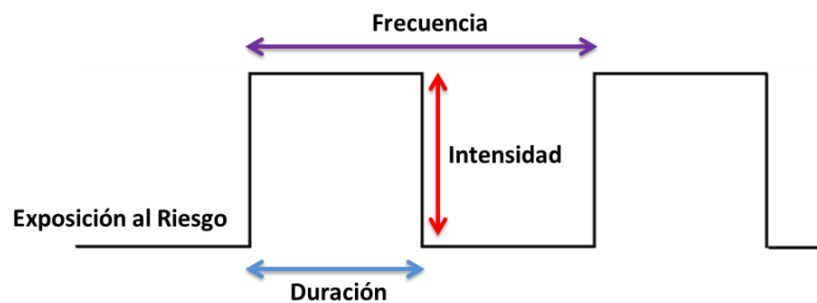


Figura 7. Representación de Duración, Frecuencia, Intensidad en el Nivel de Exposición al Riesgos, Tomado Radwin et al. (2001).

2.3 Factores Biomecánicos y Trastornos Musculo Esqueléticos

Las revisiones recientes de las investigaciones han demostrado evidencia sustancial de que los factores biomecánicos específicos, tales como la repetición, la fuerza y la postura juegan un papel importante en la causas del trabajo relacionados con los trastornos musculo esqueléticos (Bernard, 1997; Council_of_Medicine, 2001). En la Tabla 2 se evidencia el nivel de interrelación de diversos factores de riesgo y las áreas de cuerpo más afectadas, tomando en cuenta diversos estudios epidemiológicos valorador por Bernard (1997) en elementos laborales incluidos la fuerza de asociación, la consistencia, la temporalidad, la relación dosis-respuesta, y la coherencia de las pruebas.

La carga laboral afecta todos aquellos factores biomecánicos, considerando como carga laboral el estrés físico en la estructura anatómica del cuerpo, el estrés incluye fuerza (cinética), movimiento (cinemática), oscilación (vibración) y fuentes térmicas (temperatura). Los trastornos en la parte inferior de la espalda son relacionados con levantamientos, altos esfuerzos y posturas incómodas (Punnett y Wegman, 2004). En el cuello y los hombros es notorio en los trabajos que no se ejecuten en el ángulo adecuado, es decir que no se encuentran en posturas neutrales, que son los trabajos que especialmente se realizan por encima de la cabeza, como también altas fuerzas y movimientos (Silverstein y Clark, 2004). En el caso del brazo es la combinación de fuerzas, posturas incómodas y movimientos de alta frecuencia lo que ocasiona los desórdenes. Por último en la región de la mano y la muñeca los trastornos están relacionados a una actividad muscular sostenida en el antebrazo y al movimiento repetitivo de los dedos.

Parte del Cuerpo	Factor de Riesgo	Fuerte Evidencia	Evidencia	Evidencia Insuficiente
Cuello Cuello- Hombro	<i>Repetición</i>		X	
	<i>Fuerza</i>		X	
	<i>Postura</i>	X		
	<i>Vibración</i>			X
Hombros	<i>Repetición</i>		X	
	<i>Fuerza</i>			X
	<i>Postura</i>		X	
	<i>Vibración</i>			X
Codo	<i>Repetición</i>			X
	<i>Fuerza</i>		X	
	<i>Postura</i>			X
	<i>Combinación</i>	X		
Mano-Muñeca Túnel del Carpo	<i>Repetición</i>		X	
	<i>Fuerza</i>		X	
	<i>Postura</i>			X
	<i>Combinación</i>	X		
	<i>Vibración</i>		X	
Mano-Muñeca Tendinitis	<i>Repetición</i>		X	
	<i>Fuerza</i>		X	
	<i>Postura</i>		X	
	<i>Combinación</i>	X		
Mano-Muñeca Vibraciones mano-brazo	<i>Vibración</i>	X		
Espalda	<i>Carga y Manipulación</i>	X		
	<i>Postura Incómoda</i>		X	
	<i>Alta Carga Física</i>		X	
	<i>Vibraciones</i>	X		
	<i>Postura Estática</i>			X

Tabla 2. Relación entre los Factores Físicos de Trabajo y los Trastornos Musculo Esqueleticos, Tomado de Bernard (1997).

Los trastornos musculo esqueléticos afectan principalmente en los miembros superiores, dentro de la información más completa en la actualidad recopilada por académicos existe una lista de las 12 desórdenes musculo esqueléticos en los miembros superiores, así: Dolor en Cuello, Síndrome del Manguito Rotador, Epicondilitis Media y Lateral, Atrapamiento del Nervio Cubital, Atrapamiento del Nervio Radial, Tendinitis, Enfermedad de Quervain, Síndrome del Túnel Carpiano, Síndrome del Canal de Guyón, Fenómeno de Raynaud, Vibración de Mano y Brazo, y Trastornos Musculo Esqueléticos de Miembros Superiores No Especificado (Aptel et al., 2002).

2.4 Intervención Ergonómica, Métodos y Técnicas de Valoración Ergonómica

Las evaluaciones ergonómicas pueden ser realizadas por medio de análisis biomecánico, análisis clínico o análisis epidemiológico, con el objetivo de identificar la exposición en riesgos en tareas como manipulación de carga, repetitividad de actividades y posturas forzadas e incómodas (Sato Tde y Coury, 2009). Las condiciones del trabajo son los principales factores de riesgo que impacta la capacidad funcional de los trabajadores, por tal motivo la intervención del puesto de trabajo puede disminuir la incidencia de trastornos musculoesqueléticos (Aptel et al., 2002). Las intervenciones ergonómicas permiten conocer el nivel de riesgo, exposición, esfuerzo, percepción, dolores de los trabajadores (Sato Tde y Coury, 2009).

Existe un conjunto de métodos y herramientas que son utilizadas para el análisis de tareas, ambientes y equipos. Dentro de las técnicas se incluyen herramientas, técnicas de observación directa y técnicas de medición indirectas. Los métodos de medición directa requieren de equipos mecánicos y/o eléctricos que señalan una medida o escala. En caso de medición directa se encuentran pruebas con electromiógrafos, dinamómetros, luxómetros entre otros. La selección de métodos o técnicas es un paso clave, que dependerá de experiencia, la práctica y el ambiente laboral.

Hoy en día existen métodos que contribuyen a la realización de valoraciones ergonómicas con el objetivo de identificar niveles de riesgos asociados con el desarrollo de actividades laborales. Entre los métodos que permiten evaluar el riesgo, se encuentran técnicas relacionadas con la adopción de posturas forzadas (Método RULA (McAtamney y Nigel Corlett, 1993), Método OWAS (Karhu et al., 1977), la manipulación manual de cargas (Método NIOSH (Waters et al., 1993), y Tablas de Snook y Ciriello (Snook y Ciriello, 1991), y la realización de movimientos repetitivos (Método JSI (Moore y Garg, 1995), Método OCRA (Colombini et al., 2002).

Dentro de los estudios desarrollados por Dempsey et al. (2005) los métodos y herramientas más utilizadas por los ergónomos para la valoración de riesgos laborales, se hallan los aparatos de medición y las video cámaras en las herramientas, por otra parte, las técnicas de medición directa se encuentra el uso de sensores para halar y empujar, en conjunto con el dinamómetro. En las técnicas ergonómicas de observación que los profesionales más utilizan se encuentran el método NIOSH (83,1%), método JSI (39,3%) y el método RULA (51,6%), en aspectos como manipulación de carga, repetitividad y posturas inadecuadas respectivamente. El 50% de los ergónomos se apoyan de plataformas informáticas o información de soporte (Check List, Tablas, Referencias) para el desarrollo de valoraciones ergonómicas.

En esta sección, se hace énfasis en aquellos métodos ergonómicos más conocidos en la cuantificación de riesgos propenso al desarrollo de trastornos musculoesqueléticos y con mayor cobertura en diversos factores de exposición (Ver Tabla 3), como lo muestran estudios desarrollados por Dempsey et al. (2005), David (2005) y Chiasson et al. (2012).

Potencialidad de la Herramienta	Técnica	Postura	Fuerza/Carga	Frecuencia de Movimientos	Duración	Recuperación/Descanso	Vibración	Otros*
Manipulación Manual de Carga	NIOSH	X	X	X	X	X		X
Repetitividad	JSI	X	X	X	X			X
Repetitividad	OCRA	X	X	X	X	X	X	X
Posturas	RULA	X	X	X				
Posturas	OWAS	X	X					

*Incluye, Compresión mecánica, uso de guantes, condiciones ambientales, implementos, agarre, trabajo en equipo, demanda visual, factores individuales y psicosociales.

Tabla 3. Factores de Exposición Evaluados por Diferentes Métodos, Adaptado de David (2005).

Finalmente, hacer uso de métodos de valoración ergonómicas en aspectos como lo son la manipulación de carga, la repetitividad y las posturas inadecuadas, se deben dar bajo las necesidades de poder medir adecuadamente la demanda a los niveles de exposición ocupacionales de los trabajadores, donde se cuente con la mejor cantidad y calidad de información que refleje la realidad del puesto de Trabajo. A la luz de los métodos necesarios para la valoración de riesgos de manipulación de carga se encuentra el Método NIOSH, para la valoración de repetitividad se encuentra el Método OCRA, y por último en la valoración de posturas inadecuadas se halla el Método RULA. La pertinencia de cada uno de los métodos anteriormente mencionados se da por la capacidad de tomar en cuenta diversos aspectos (Ver Tabla 3) que enriquecen la toma y calidad de información abordada como técnicas ergonómicas por observación.

2.5 Métodos de Valoración Ergonómica para la Manipulación Manual de Carga.

2.5.1 La Ecuación Revisada de NIOSH (National Institute For Occupational Safety and Health)

El National Institute For Occupational Safety and Health (NIOSH) en 1991 establece la ecuación revisada para la manipulación de carga, la cual incluye criterios claves para la protección de la salud de los trabajadores, como lo son aspectos biomecánicos, fisiológicos y psicológicos. NIOSH es pionero en establecer una ecuación ampliamente utilizada para la evaluación y definición de límites en la manipulación de carga.

El Método NIOSH (Waters et al., 1993) ayuda a la evaluación de tareas en las que requieren el levantamiento de cargas, permitiendo obtener un peso máximo recomendado (RWL: Recommended Weight Limit) para manipular en el puesto de trabajo, evitando los sobreesfuerzos y la aparición de lesiones en la espalda. La ecuación NIOSH permite el manejo de un índice límite para la manipulación de carga (LI), el cual se relaciona con la posibilidad de generar trastornos musculoesqueléticos en la parte baja de la espalda, así como afecciones en los hombros y los brazos. Las dolencias en espalda, hombros y brazos se deben a sobreesfuerzo, repetitividad en la manipulación de materiales, el halar y empujar, así como posturas incómodas o extremas que requieren de flexión corporal.

La ecuación NIOSH se fundamenta en criterios científicos y la relación de generar trastornos musculoesqueléticos, donde se fijan límites admisibles donde el trabajador puedan manipular carga sin perjuicio

del trabajador en una jornada laboral. Tomar de forma simultanea aspectos biomecánicos, fisiológicos y psicológicos dentro de la ecuación NIOSH se fundamenta en criterios científicos y su relación con la contribución en la generación de trastornos musculo esqueléticos (Ver Tabla 4).

Aspecto	Criterio de Decisión	Corte/ Valor
Biomecánico	Máxima Fuerza de Compresión	3.4 KN (770 Lb)
Fisiológico	Máximo Gasto Energético	2.2 – 4.7 (Kcal/Min)
Psicofísico	Máximo Peso Aceptable	Mujeres 75%, Hombres 99%

Tabla 4. Criterios Usados en el Desarrollo de Ecuación NIOSH, Tomado de Waters et al. (1993)

Los aspectos biomecánicos ayuda a conocer el nivel de estrés lumbar en los periodos de manipulación tomando en cuenta: i) el conjunto de vertebras donde se acumula el estrés (L5S1) como el lugar de mayor esfuerzo; ii) el vector de compresión critica de fuerza; iii) la fuerza de compresión 3.4 KN genera un incremento de riesgo de lesión lumbar. Los aspectos fisiológicos asocian el estrés metabólico, la fatiga y la repetitividad, fijando un límite en el consumo y gasto energético necesario en el desarrollo de tareas que requieren el levantamiento de carga y manipulación de materiales. Los aspectos psicofísico se relacionan con la percepción de los trabajadores en la capacidad de carga.

En el desarrollo de ecuación NIOSH se requiere conocer el sitio o locación donde se desarrolla la manipulación de materiales, una constante de carga establecida y la expresión matemática del método. La ecuación de NIOSH calcula el peso límite recomendado mediante la fórmula:

$$RWL = LC \times HM \times VM \times DM \times AM \times FM \times CM$$

Donde:

LC (Load Constant): La constante de carga varía entre 23 Kg o 25 Kg, depende en gran medida del personal que desarrolla la manipulación de la carga.

Multiplicador Horizontal (HM): La distancia horizontal es un criterio importante en la generación de dolencias en la columna. La fuerza axial aplicada a la columna es proporcional a la distancia horizontal. El multiplicador horizontal (HM) se determina por: $HM = 25 / H$. Donde, H es la distancia desde punto donde se toma la carga medida sobre el plano horizontal entre las manos y los tobillos, medida en centímetros.

Multiplicador Vertical (VM): El levantamiento de materiales desde posiciones fijas en el piso ponen en riesgo las afecciones en la columna. Cada vez que se desarrolla un levantamiento de materiales desde el piso se incrementa el esfuerzo lumbar y el gasto energético. El multiplicador vertical (VM) se determina por: $VM = (1 - 0,003 |V - 75|)$. Donde, V es la distancia que existe desde las manos hasta la posición fija de la carga en el suelo, medida en centímetros.

Multiplicador de Distancia (DM): El desplazamiento de carga es un factor necesario en la valoración de la manipulación de carga. El multiplicador de distancia (DM) se determina por: $DM = 0,82 + 4,5 / D$. Donde, D es la distancia en centímetros desde que se genera el levantamiento hasta donde se libera la carga.

Multiplicador de Asimetría (AM): las variaciones que pueda tomar el tronco ponen en riesgo la salud de los trabajadores. El multiplicador de asimetría (AM) se determina por: $AM=1-(0,0032 A)$. Donde, A es el ángulo de asimetría, donde el ángulo corresponde al desplazamiento de la carga desde una postura sagital. La medida se da en grados.

Multiplicador de Frecuencia (FM): La frecuencia de manipulación de carga esta relacionada con la cantidad de maniobras o levantamientos que son ejercidos en el tiempo. El método NIOSH provee unos factores alineados a la frecuencia y duración de las actividades y la distancia vertical en centímetros. El multiplicador de frecuencia (FM) esta determinada por la Tabla 5.

FRECUENCIA elev/min	DURACIÓN DEL TRABAJO					
	Corta (≤1 hora)		Moderada >1 - 2 horas		Larga >2 - 8 horas	
	V<75	V>75	V<75	V>75	V<75	V>75
>0,2	1	1	0,95	0,95	0,85	0,85
0,5	0,97	0,97	0,92	0,92	0,81	0,81
1	0,94	0,94	0,88	0,88	0,75	0,75
2	0,91	0,91	0,84	0,84	0,65	0,65
3	0,88	0,88	0,79	0,79	0,55	0,55
4	0,84	0,84	0,72	0,72	0,45	0,45
5	0,8	0,8	0,6	0,6	0,35	0,35
6	0,75	0,75	0,5	0,5	0,27	0,27
7	0,7	0,7	0,42	0,42	0,22	0,22
8	0,6	0,6	0,35	0,35	0,18	0,18
9	0,52	0,52	0,3	0,3	0	0,15
10	0,45	0,45	0,26	0,26	0	0,13
11	0,41	0,41	0	0,23	0	0
12	0,37	0,37	0	0,21	0	0
13	0	0,34	0	0	0	0
14	0	0,31	0	0	0	0
15	0	0,28	0	0	0	0
>15	0	0	0	0	0	0

Tabla 5. Multiplicador de Factor de Frecuencia.

El factor de frecuencia que existe en el método NIOSH, compagina con las tablas de Snook y Ciriello (1991) en los criterios por debajo 4 levantamientos por minuto, y luego en levantamientos superiores se alimenta con diversas investigaciones relacionada con el gasto energético en el levantamiento de materiales.

Multiplicador de Agarre (CM): La manera como se toman o agarran la carga afecta los esfuerzos necesarios. El multiplicador de agarre (CM) esta determinada por la Tabla 6.

Agarres	V < 75 cm	V > 75cm
Bueno	1,00	1,00
Medio	0,95	1,00
Pobre	0,90	0,90

Tabla 6. Multiplicador de Factor de Agarre.

El método NIOSH arroja el Índice de levantamiento (IL), el cual se calcula como el cociente entre el peso de la carga levantada y el límite de peso recomendado calculado para las tareas, así:

$$IL = \frac{PC}{RWL}$$

Donde:

IL es el índice de levantamiento; PC es el peso de la carga; RWL es el Peso Máximo Recomendado en la que se desarrolla las operaciones.

La ecuación NIOSH es interpretada de acuerdo a tres intervalos de riesgos. Cuando $IL \leq 1$ la actividad no repercute un riesgo grave para los trabajadores, cuando $1 < IL \leq 3$ la actividad es propensa a ocasionar problemas en los trabajadores, y finalmente $IL > 3$ la tarea ocasionará problemas en la salud de los trabajadores. En el desarrollo de un análisis multitarea no se deberá caer en la simplificación de cálculos para el diagnóstico del nivel de riesgo, en el cual se pondere el nivel de riesgo relacionado con la actividad de mayor influencia e incidencia, por tal motivo NIOSH recomienda un Índice de Levantamiento Compuesto (IL_c), así:

$$IL_c = ILT_1 + (ILT_2 (F_1 + F_2)) - (ILT_2 (F_1)) + (ILT_3 (F_1 + F_2 + F_3)) - (ILT_3 (F_1 - F_2)) + \dots$$

Donde: ILT_1 es el índice mayor de levantamiento de las tareas individuales; $ILT_i(F_j)$ es el índice de levantamiento de la tarea i, calculado a la frecuencia de la tarea j; $ILT_i (F_j + F_k)$ es el índice de levantamiento de la tarea i, calculado a la frecuencia de la tarea j, más la tarea k.

En el análisis de un nuevo procedimiento para la evaluación secuencial de trabajos que requieran la manipulación manual de carga a través del uso del método NIOSH, Waters et al. (2007) definieron un índice para la valoración de trabajos que rotan. El indicador SLI (Sequential Lifting Index) es un nuevo concepto para el cálculo de la demanda física del trabajo que rota en diferentes puestos de trabajo y que permite dar prioridad en el nivel de riesgos en los que incurren los trabajadores en actividades con manipulación manual de carga. El SLI asume: i) la demanda física de un conjunto de tareas que necesitan rotar son diferentes; ii) el tiempo en cada una de las tareas o estaciones de trabajo son un aspecto importante en el cálculo; iii) la demanda fisiológica esta en función de la secuencia de las actividades que requieren la manipulación de carga. Los pasos para calcular el Índice de Levantamiento Secuencial (SLI) son:

- Ordenar la secuencia en que se desarrollan las tareas, diferenciado los segmentos de trabajo de 4 horas de trabajo continuo. Se debe asumir que ninguna tarea de manipulación manual (simple o múltiple) puede durar más de 4 horas de forma continua sin un periodo de recuperación (ejemplo, trabajo liviano o almuerzo). En los casos en que el tiempo total de trabajo sea superior a 8 horas, se puede calcular el valor SLI para cada período de 4 horas y luego tomar el mayor de los valores para representar el SLI para el trabajo como un todo.

- Calcular el LI, Tomando en cuenta los periodos de las tareas y las categorías donde se asignadas a cada uno de los factores de frecuencia, que dan referencia de los tiempo de duración de las tareas.
- Obtener el máximo LI (LImax) para cada una de las categorías de tareas, el cual se calcula con el factor de frecuencia que posee la tarea en su totalidad, es decir el periodo más largo de duración continua con manipulación manual de carga.
- Calcular el Tiempo de Fracción que dura las actividades de manipulación de carga. (TF = Tiempo de Tarea / 240 minutos).
- Organizar las tareas de acuerdo con LImax en orden descendente y asignar valores de LI_i y LImax_i en respectivo orden de las tareas i.

El Índice de Levantamiento Secuencia (SLI) se calcula, así:

$$SLI = LI_1 + (LImax_1 - LI_1) \times K$$

Donde K es:

$$K = \frac{\sum LImax_1 \times TF_1 + LImax_2 \times TF_2 + \dots + LImax_n \times TF_n}{LImax_1}$$

El Método NIOSH contribuye a disminuir los riesgo de padecer afecciones en la columna, modifica los limites de los trabajadores en la manipulación de carga de acuerdo con su la capacidad física, y permite que la carga de trabajo sea modificada o posea variabilidad con el propósito de proteger la salud de los trabajadores. El método NIOSH se apoya de valoraciones dotadas por las tablas Snook y Ciriello, donde la ecuación NIOSH permite ser más conservador en los límites admisibles en la manipulación manual de carga. Es importante resaltar que las escalas de alerta para el método NIOSH por medio del calculo IL y SLI no son equivalentes, y deberán ser analizadas de acuerdo con la naturaleza de los puestos de trabajo (Waters et al., 2007).

Dentro de sus limitaciones se encuentra la falta estudios científicos que demuestren la aparición de trastornos musculo esqueléticos, donde la mayoría de estudios fisiológicos son generados en laboratorio. Dentro de otros limitantes se halla que aspectos fisiológicos actúan en función de fatiga asociada a los ejercicios de manipulación de carga y dejan de lado la repetitividad. En aspectos claves del método NIOSH es importante resaltar la interacción de los 3 criterios (biomecánicos, fisiológicos y psicofísicos) en la generación de valoración dentro de la metodología, debido a que al ser analizados de forma independiente no protegen la salud de los trabajadores. Además, la consideración de factores multiplicativos dentro del método genera dependencia entre los diversos aspectos valorados, es decir si un factor es crítico automáticamente afecta a todos los demás. Finalmente, El método NIOSH es una solución ergonómica para disminuir el estrés asociado con tareas de carga, que pone en riesgo la generación de trastornos musculo esqueléticos en la columna, hombros y brazos.

2.6 Métodos de Valoración Ergonómica para el Análisis Postural

2.6.1 Método RULA (Rapid Upper Limbs Assessment)

El método RULA ((McAtamney y Nigel Corlett, 1993) permite evaluar la exposición que tiene los trabajadores en actividades con posturas inadecuadas e incómodas, que afectan el puesto de trabajo con trastornos musculoesqueléticos en los miembros superiores. El método como instrumento de valoración ergonómica no requiere la utilización de equipos especiales para realizar una identificación rápida en el cuello, tronco y extremidades superiores por carga muscular y física que experimenta el cuerpo. La metodología RULA contribuye a la generación de acciones para la disminución del nivel de riesgo de los trabajadores.

El método RULA es una herramienta para el análisis postural, la fuerza necesaria, y las acciones musculares que valida el nivel de riesgo percibido por el hombre. El método nace en la industria de la confección, y luego se constituye en un método completo que puede ser aplicado en diversas industrias y puestos de trabajo. En su implementación es necesaria la identificación de variadas posturas del cuerpo, al igual que una puntuación que registra el nivel de riesgo de los trabajadores. Finalmente el método cubre, números de movimientos, fuerza, trabajo estático y muscular, posturas determinadas por el puesto de trabajo.

Existen factores claves que afectan la respuesta individual como lo son factores individuales, factores ambientales y condiciones de los puestos de trabajo, y factores psicosociales. El método fue diseñado para hacer frente a este tipo de aspectos y permitir: i) proveer un método rápido, para evaluar la exposición a riesgos musculoesqueléticos en la extremidades superiores; ii) identificar el esfuerzo muscular asociado con la postura, ejecución de fuerza, postura estática y trabajo repetitivo, asociado con la fatiga muscular; iii) proveer resultados para estudios epidemiológicos o macro ergonómicos.

La implementación del método es superior a otros métodos de valoración ergonómica postural, debido a que no se requieren equipos, instrumentos, herramientas o conocimiento especializado. El desarrollo del método se da en 3 instancias o fases: i) identificación y registro postural del trabajo; ii) Definición del sistema de puntuación; iii) La consolidación de escalas de puntuación que determinan el nivel de riesgo.

El método divide la evaluación en dos grupos, el grupo A que incluye los miembros superiores (brazo, antebrazos y muñecas) y el grupo B que posee las piernas, el cuello y el tronco. De acuerdo con una puntuación a cada parte del cuerpo se compila la puntuación por grupos y así obtener un nivel de riesgo global. El método RULA al igual que el método OWAS (Karhu et al., 1977) se utiliza la numeración y puntuación como el objetivo de darle claridad y sencillez para ser utilizada rápidamente.

A continuación se detalla la puntuación para cada uno de los grupos y sus componentes, los cuales se encuentran fundamentados por estudios epidemiológicos e investigaciones referenciadas en el método RULA (McAtamney y Nigel Corlett, 1993).

- **Grupo A (Brazos, Antebrazo y Muñeca)**

Brazo: El nivel de riesgo y puntuación son asignados con la postura angular del brazo (Ver Figura 8). Si el hombro o el brazo se aumentan su posición se aumenta la puntuación en 1. Si el operador se inclina o el peso se apoya se resta una puntuación de 1.

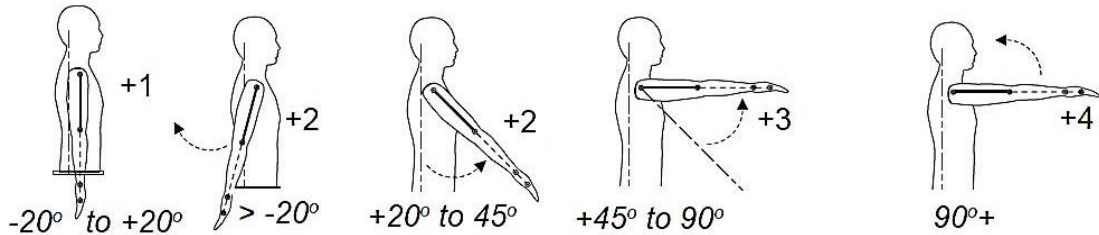


Figura 8. Puntuación Postura de Brazo en Grupo A, Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).

Antebrazo: El nivel de riesgo y puntuación son asignados con la postura angular del antebrazo (Ver Figura 9). Además si los brazos trabajan por fuera del centro del cuerpo se aumentan su la puntuación en 1.

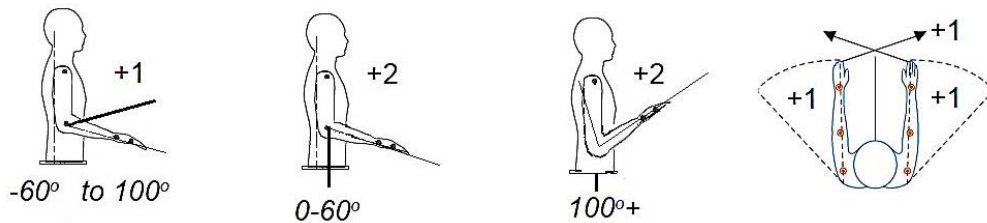


Figura 9. Puntuación Postura de Antebrazo en Grupo A, Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).

Muñeca: El nivel de riesgo y puntuación son asignados con la postura o movimiento de la muñeca (Ver Figura 10). Si la muñeca se mueve de manera lateral o con torsión se aumentan su la puntuación en 1.

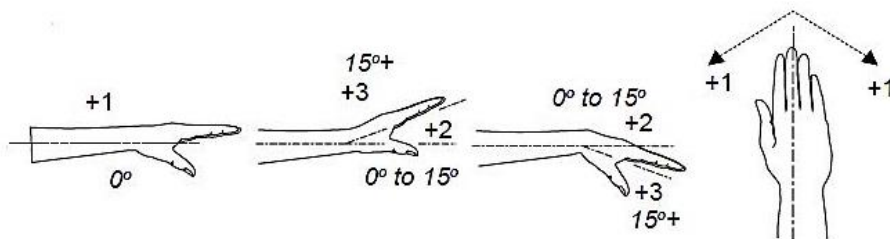


Figura 10. Puntuación Postura de Muñeca en Grupo A, Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).

Muñeca-Mano: El nivel de riesgo y puntuación son asignados con modificaciones del movimiento de la muñeca. Si asigna una puntuación de 1 si se encuentra en un rango medio de giro. Si la muñeca se encuentra en o cerca al final de giro se asigna una puntuación de 2.

- **Grupo B (Cuello, Tronco, Piernas)**

Cuello: El nivel de riesgo y puntuación son asignados con la postura angular del cuello (Ver Figura 11). Si el cuello se tuerce se aumenta la puntuación en 1. Si existe flexión lateral se aumenta la puntuación en 1.

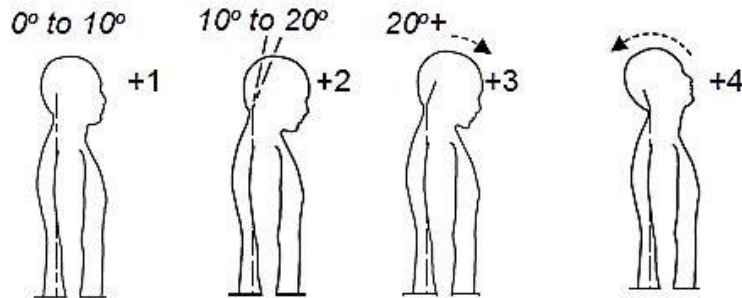


Figura 11. Puntuación Postura de Cuello en Grupo B, Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).

Tronco: El nivel de riesgo y puntuación son asignados con la postura angular del Tronco (Ver Figura 12). Si existe inclinación lateral de tronco se aumenta la puntuación en 1. Si existe torsión del tronco se aumenta la puntuación en 1.

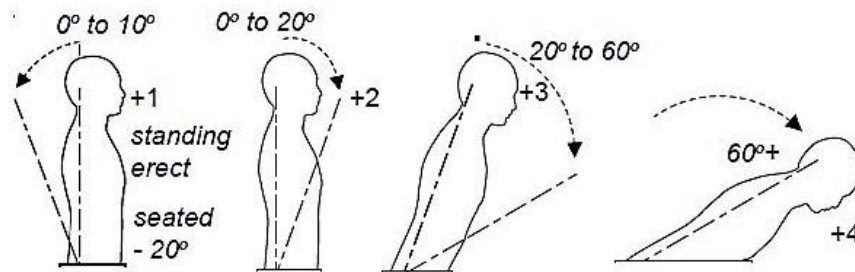


Figura 12. Puntuación Postura de Tronco en Grupo B, Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).

Piernas: El nivel de riesgo y puntuación son asignados con la postura de los pies. Si existe balance, peso uniforme y equilibrio con posibilidad de cambiar de postura se asigna una puntuación en 1. Si no existe balance en el peso uniforme del cuerpo entre los pies y las piernas, se asigna una puntuación de 2.

En el registro de la puntuación del método se da luego de evaluar los grupos A y B, a través de las Tabla 7 y Tabla 8, y se correlaciona cada uno de los elementos, generando una puntuación entre 1 a 9 para cada grupos respectivamente.

Brazo	Antebrazo	Muñeca							
		1		2		3		4	
		Giro de Muñeca		Giro de Muñeca		Giro de Muñeca		Giro de Muñeca	
		1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3
	3	2	3	3	3	3	3	4	4
2	1	2	3	3	3	3	4	4	4
	2	3	3	3	3	3	4	4	4
	3	3	4	4	4	4	4	5	5
3	1	3	3	4	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	4	4	4	4	4	5	5	5
4	1	4	4	4	4	4	5	5	5
	2	4	4	4	4	4	5	5	5
	3	4	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	7	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	8	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

Tabla 7. Puntuación Global A. Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).

Cuello	Tronco											
	1		2		3		4		5		6	
	Piernas	Piernas	Piernas	Piernas	Piernas	Piernas	Piernas	Piernas	Piernas	Piernas	Piernas	Piernas
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9

Tabla 8. Puntuación Global B. Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).

El método RULA, además permite correlacionar las posturas por grupos y al tiempo asignar puntuación por actividad muscular y fuerza aplicada (Ver Tabla 9), obteniendo un índice C y D, para los subgrupo A y B respectivamente.

Puntos	Posición
0	Si la carga o fuerza es menor de 2 Kg. y se realiza intermitentemente.
1	Si la carga o fuerza está entre 2 y 10 Kg. y se levanta intermitente.
2	Si la carga o fuerza está entre 2 y 10 Kg. y es estática o repetitiva.
2	Si la carga o fuerza es intermitente y superior a 10 Kg.
3	Si la carga o fuerza es superior a los 10 Kg., y es estática o repetitiva.
3	Si se producen golpes o fuerzas bruscas o repentinas.

Tabla 9. Puntuación de Actividad Muscular y Fuerza Aplicada. Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).

En la Figura 13, se ilustra la puntuación final del método RULA, donde se combina la puntuación C y D, y se genera una nueva puntuación como se evidencia en la Tabla 10.

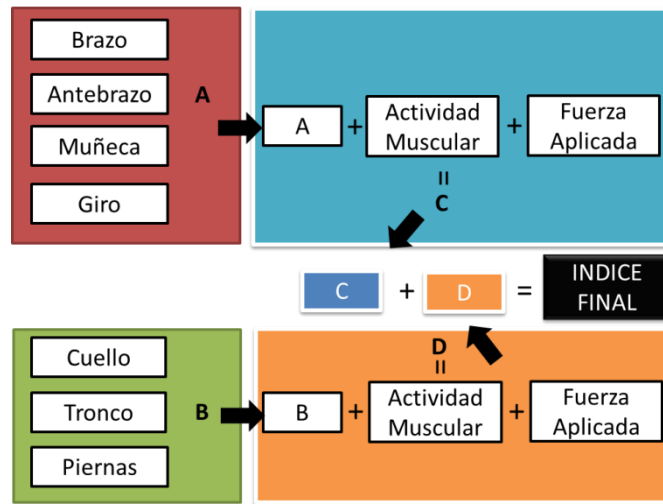


Figura 13. Flujo de Calculo de Riesgo por postura Forzada con Método RULA.

El método de evaluación postural contribuye a identificar los trabajos con riesgos importantes, de tal manera cuando la puntuación se halla entre 1 o 2 la postura es aceptable si no se mantiene o se repite durante largos períodos, entre 3 o 4 se enmarca en un riesgo bajo, entre 5 o 6 un riesgo medio y se requieren inspecciones, y cuando es 7 el riesgo es alto y las tareas continuas repercuten en la salud de los trabajadores.

Puntuación C	Puntuación D						
	1	2	3	4	5	6	7+
1	1	2	3	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	3	4	5	6	6
5	4	4	4	5	6	7	7
6	4	4	5	6	6	7	7
7	5	5	6	6	7	7	7
8	5	5	6	7	7	7	7

Tabla 10. Puntuación Final, Combina Factor C y D. Tomado de McAtamney y Nigel Corlett (1993).

Finalmente, el método RULA fue desarrollado para proporcionar una evaluación rápida de las cargas sobre el sistema musculo esquelético de los operadores debido a la postura, la función muscular y las fuerzas que ejercen y así prevenir trastornos de las extremidades superiores. RULA cumple el papel de proporcionar un procedimiento para seleccionar un gran número de operadores rápidamente, además el sistema de puntuación proporciona una indicación del nivel de carga experimentado por las partes individuales del cuerpo.

El método RULA se utiliza sin la necesidad de ningún equipo y, después de la capacitación en su uso, ha demostrado ser una herramienta confiable para llevar a cabo evaluaciones del puesto de trabajo. Puede

ser utilizado como una herramienta de detección o incorporarse a una evaluación más amplia de ergonomía, epidemiológica, carga física, carga mental, ambiental y de factores organizacionales.

2.7 Métodos de Valoración Ergonómica para la Repetitividad de Movimientos

2.7.1 Método OCRA (Ocupacional Repetitive Action Methods)

El método OCRA (Colombini et al., 2002; ISO_1228-3, 2007) se establece por consenso internacional como técnica referente para la evaluación de riesgos por trabajos repetitivo en extremidades superiores, ratificadas por medio de la norma ISO 11228-3 y UNE 1005-5. El objetivo del método es la evaluación y análisis de actividades que poseen actividades repetitivas, con factores de riesgo como fuerza, postura, movimientos forzados, repetitividad, periodos de recuperación y aspectos adicionales, los cuales afectan al trabajador dentro de su puesto de trabajo.

El método OCRA tiene ventajas tales como: i) análisis detallado de factores de riesgo físico-mecánico y la presencia de trastornos musculo esqueléticos en miembros superiores; ii) contribuye a la evaluación de actividades y tareas que participan de puestos de trabajo complejos (Rotación Laboral) y todas las estimaciones de nivel de riesgo; iii) la técnica ergonómica se fundamentada en estudios epidemiológicos, como método que permite la predicción de presencia de desordenes musculo esqueléticos dentro del trabajo.

Por medio del método OCRA es posible calcular el índice de exposición de movimientos repetitivos desarrollada por los miembros superiores, el número de acciones ejecutadas en tareas contantes, en relación al número de acciones recomendadas. El Indicador OCRA, es la proporción entre el número de acciones técnicas (N_{ATA}) llevadas a cabo durante un periodo y el número de referencias de acciones técnicas (N_{RTA}), para cada riesgo en un escenario determinado.

El indicador OCRA, se halla por medio de tres pasos básicos:

- i. Calcular la frecuencia de acciones técnicas/minuto y el numero de ATA llevadas a cabo en un periodo determinado.
 - a. Contabilizar el número de acciones técnicas N_{TC} en un Ciclo por Tarea J.
 - b. Evaluar su Frecuencia f por minuto, considerando el tiempo de ciclo T_c en segundo por Tarea J.

$$f_j = N_{TC} \times \frac{60}{T_c}$$

- c. Evaluar la duración total t_j , de las actividades repetitivas por periodo en minutos, para cada tarea j.
- d. Calcular el número total de acciones periódicas.

$$N_{ATA} = \sum (f_j \times t_j)$$

- ii. Calcular el número RTA.
- a. Calcular el número total de acciones periódicas de referencia, para todas tareas J.

$$N_{RTA} = \sum_{j=1}^n [k_f (F_{Mj} \times P_{MJ} \times R_{eMj} \times A_{Mj}) \times t_j] \times (R_{cM} \times t_M)$$

Dónde:

k_f : Constante de frecuencia de las acciones por minuto, se recomienda la utilización de 30 acciones/minuto, para su aplicación en ambientes industriales y soportados en literatura científica.

F_{Mj} : Relaciona la fuerza aplicada y su máxima contracción voluntaria para llevar a cabo acciones técnicas. Cuando se toma un nivel del factor de fuerza, la referencia debe ser siempre de fuerza media con respecto a la duración del ciclo y utilizando la escala de Borg, como se evidencia en Tabla 11.

Nivel de Fuerza	5	10	20	30	40	>50
Escala de Borg	0,5	1	2	3	4	>5
Multiplicador de Fuerza Fm	2	0,85	0,65	0,35	0,3	0,01

Tabla 11. Multiplicador Relativo en Diferentes Usos de Fuerza. Tomado ISO_1228-3 (2007).

P_{MJ} : Se define como las posturas que son potencialmente perjudiciales y movimiento que son sostenidos durante periodos prolongados, así como movimientos que son altamente repetitivos. Es optimo cuando la posición se desarrolla en periodo menor 1/3 del tiempo de ciclo. En la Tabla 12 se deriva la puntuación para la postura, tomando de esta forma la máxima puntuación de las condiciones evaluadas.

Postura Forzada o Posición Incomoda		Porción de Tiempo de Ciclo			
		menos de 1/3	1/3	2/3	3/3
Codo	Supinación (> 60)	1	0,7	0,6	0,5
Muñeca	Extensión (>45) o Flexión (> 45)				
Mano	Gancho de agarre o sujeción palmar (ancho)				
Codo	Pronación (>60) o flexión/extensión (> 60)		1	0,7	0,6
Muñeca	Muñeca radio / cúbito desviación (>20 °)				
Mano	Apretar				

Tabla 12. Factor Multiplicador de postura forzada. Tomado de ISO_1228-3 (2007).

R_{eMj} : Es el multiplicador de repetitividad, Cuando la tarea requiere la realización de las mismas acciones técnicas durante al menos 50% del tiempo de ciclo, o cuando el tiempo de ciclo es más corto que 15 s, $R_{eM} = 0,7$. De lo contrario, $R_{eM} = 1$.

A_{Mj} : Este factor penaliza de elementos adicionales (Vibración, precisión absoluta, compresión de estructuras anatómicas, la exposición a superficies y entornos fríos, uso de guantes y alto ritmo laboral condicionado por la maquinaria. Si uno o más factores adicionales están presentes al mismo tiempo para 1/3 (a partir de 25% a 50%) del tiempo de ciclo, $A_M = 0,95$; si uno o más

factores adicionales están presentes al mismo tiempo para 2/3 (a partir de 51% a 80%) del tiempo de ciclo, $A_M = 0,90$; si uno o más factores adicionales están presentes al mismo tiempo para 3/3 (más de 80%) del tiempo de ciclo, $A_M = 0,80$.

t_j : Tiempo Total de la duración de las tareas J en minutos.

R_{CM} : El factor de recuperación se basa en la presencia o ausencia de los períodos de descanso o relajación muscular adecuados. En la Tabla 13 se evidencia la ponderación.

Horas sin Periodo de Recuperación	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Factor Multiplicador, R_{cm}	1.0	0.90	0.80	0,70	0,60	0,45	0,25	0,10	0

Tabla 13. Factor multiplicador de recuperación. Tomado de ISO_1228-3 (2007).

t_M : El factor relacionado con el periodo total de duración de las tareas, se relaciona con la Tabla 14.

Tiempo total de duración de tarea en el turno (Horas)	<120	120-239	240-480	>480
Multiplicador de Duración, t_m	2	1,5	1	0,5

Tabla 14. Factor multiplicador de duración. Tomado de ISO_1228-3 (2007).

- iii. Calcular el indicador OCRA, y determinar las conclusiones de estudio.

$$\text{Índice OCRA} = \frac{N_{ATA}}{N_{RTA}}$$

Finalmente, los resultados del Índice OCRA considera que resultados así:

Índice OCRA	Nivel o Escala de Valoración
>9,1	Riesgo Inaceptable Alto
4,6 -9	Riesgo Inaceptable Leve
3,6-4,5	Riesgo Medio Alto
2,3 – 3,5	Riesgo Medio Leve
<2,2	Riesgo Aceptable

Tabla 15. Nivel de Riesgo OCRA. Tomado de ISO_1228-3 (2007).

2.8 Perspectivas y Conclusiones

Los Trastornos Musculo Esqueléticos se presentan por factores que pueden ser simples, secuenciales o simultáneos, donde existe una fuerte interacción entre factores biomecánicos y factores psicosociales. El nivel de estrés humano contribuye a la tensión y la mala salud, particularmente si persisten en el tiempo, y dependen de cómo el individuo percibe y reacciona a la situación estresante (Faucett, 2005). No existen métodos de valoración ergonómica mejores que otros, solo que existen métodos que se ajustan a las necesidades y objetivos que se requieren evaluar dentro de las estaciones de trabajo, tomando en cuenta que el desarrollo de trastornos musculo esqueléticos son de características multiobjetivo, donde muchas veces es necesario priorizar los riesgos a controlar. Lo mínimo que se espera de una

herramienta de valoración es cuantificar el nivel, intensidad de la fuerza, repetitividad, frecuencia y duración, así como aspectos relacionados con las posiciones adoptadas por los trabajadores, los periodos de los movimientos, y otras condiciones psicosociales y organizacionales (Burdorf y van der Beek, 1999). En síntesis, la Figura 14 establece las condiciones básicas que se deben establecer con las estrategias de medición para los trastornos músculo-esqueléticos dentro de los puestos de trabajo en las organizaciones, los cuales serán consideraras en el diseño de la metodología que permita enlazar todos los aspectos claves para generar agendas de rotación de puestos de trabajo desde una perspectiva integral.

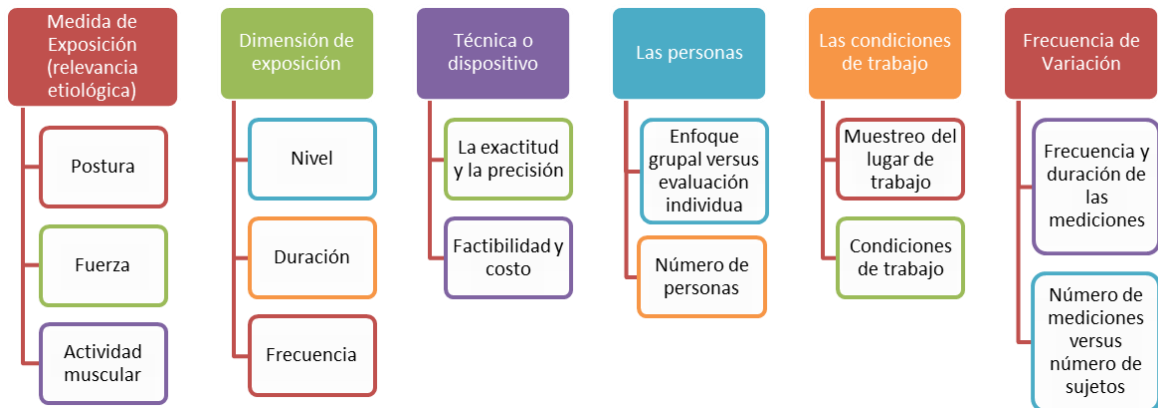


Figura 14. Condiciones Básicas en las Estrategias de Medición de los TME, Tomado de Burdorf y van der Beek (1999).

3. ROTACIÓN LABORAL BAJO UN ENFOQUE ERGONOMICO

3.1 Introducción

La implementación de rotación laboral se da por la necesidad de proteger a los trabajadores, las normas legales existentes, además de aspectos que buscan incentivar la motivación de las personas y así la productividad y la satisfacción laboral. Los riesgos ergonómicos son un factor clave, los cuales no dependen solamente del diseño y condiciones del puesto de trabajo, sino del contenido laboral (repetitividad, duración de las tareas, manipulación de carga, posturas, y aplicación de fuerza), donde rutinas como la rotación de puestos de trabajo ayudan a mejorar el bienestar, por medio del balance de los riesgos dentro de las diferentes estaciones de trabajo.

La reducción del nivel de riesgos ergonómicos por medio de la rotación de puestos de trabajo busca minimizar la carga ergonómica para el trabajador más expuesto a factores de riesgos laborales. Los primeros modelos fueron desarrollados por Carnahan et al. (2000). En el planteamiento la rotación laboral con un enfoque ergonómico es necesario examinar y hacer uso de métodos de valoración ergonómica para medir y cuantificar el nivel de riesgos en diferentes aspectos ergonómicos, los cuales son necesarios para la definición de los parámetros y la función objetivo del problema.

3.2 Formulación del Modelo de Rotación Laboral con Enfoque Ergonómico.

A continuación se describe el modelo básico para la rotación laboral en la asignación de trabajadores a tareas o puestos de trabajo, donde los riesgos ergonómicos son cuantificados con la intención de ser reducidos y balanceados entre los trabajadores. La formulación básica del modelo de rotación de puestos de trabajo puede ser desarrollado así:

Un conjunto J de n puestos de trabajo (definiendo de n como tareas o trabajos) $a_j \in J, j = 1, \dots, n$, y un número de periodos $T \in \mathbb{Z}^+$ dados. Los trabajos son asignados a trabajadores, expresado por la función de permutación $\pi_t(i)$, de esta manera en el periodo $t = 1, \dots, T$, trabajadores $i = 1, \dots, n$ tiene un rendimiento en el puesto de trabajo $a_{\pi_t(i)}$. Cada puesto de trabajo a_j se caracteriza por tener una valoración ergonómica por periodo $\varepsilon_{jt} = e_t(a_j) > 0$.

Para no perder las generalidades del modelo, suponemos puntos ergonómicos para ser integral. El objetivo es encontrar el conjunto de T permutaciones de trabajos $\{a_{\pi_1(1)}, a_{\pi_1(2)}, \dots, a_{\pi_1(n)}\}, \dots, \{a_{\pi_T(1)}, a_{\pi_T(2)}, \dots, a_{\pi_T(n)}\}$ donde la máxima exposición al riesgo E de cualquier trabajador es minimizada, por ejemplo $E = \max\{\sum_{t=1}^T e_t(a_{\pi_t(i)}) \mid i = 1, \dots, n\}$.

El modelo de programación lineal entera que representa el problema de rotación laboral es el siguiente:

Minimizar E

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n X_{ijt} = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$
$$\sum_{j=1}^n X_{ijt} = 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$
$$\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \varepsilon_{jt} X_{ijt} \leq E \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$X_{ijt} \in (0,1), \varepsilon_{jt} \in \mathfrak{R} \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

La rotación laboral se define a través de la variable binaria X_{ijt} , donde $X_{ijt} = 1$ si el trabajador i realiza la tarea j durante del periodo t , ó $X_{ijt} = 0$ en caso contrario. Las dos primeras restricciones permiten que cada trabajador sea asignado exactamente a un puesto de trabajo (tarea) en cada periodo. La restricción final cuantifica la puntuación por valoración ergonómica que asume un trabajador durante todos los periodos y puestos de trabajo. En relación con la función objetivo, la última restricción define **E** como el riesgo más elevado experimentado por cualquier trabajador, el cual necesita ser minimizado.

Debido a que la suma de la puntuación ergonómica sobre los puestos de trabajo (tareas) y los periodos se hallan dentro del programa de producción, y son datos conocidos (constantes), el valor más alto de riesgo E se disminuye si el nivel de riesgo de otros trabajadores se balancea. La función objetivo permite darle variabilidad y equidad a los riesgos que asumen todos los trabajadores dentro de la programación.

3.3 Esquema de Rotación Laboral

La utilización de términos como puestos de trabajo, o tareas, son compatibles dentro del problema de rotación laboral, de esta forma una labor es considerado por las tareas que posee un puesto de trabajo. Todas las operaciones que tienen que ser realizadas por los trabajadores, incluyendo sus tiempos y movimientos constitutivos de los trabajadores, se deben analizar con el apoyo de los sistemas de información de las organizaciones. Por lo tanto, es una práctica común y justificada asumir cargas de trabajo deterministas y riesgos ergonómicos deterministas para cada trabajador en cada puesto de trabajo (Otto y Scholl, 2012).

La representación conceptual de la rotación laboral, muestra que el problema se encuentra compuesto por dos subconjuntos. El primero de ellos está conformado por los trabajadores (i), mientras que el segundo lo conforman los puestos de trabajo o tareas (j) a los cuales se les realizar la asignación y secuenciación de rutinas de trabajo. En la Figura 15, el tamaño del conjunto (I), $|n|$ representa la cantidad total de trabajadores, mientras que el tamaño del conjunto (J), $|m|$, corresponde a la cantidad de puestos de trabajo o trabajos que se encuentran disponibles para designar en un periodo T.

Por otra parte, el conjunto de arcos representa la posibilidad de las asignaciones que se pueden dar de trabajadores y puestos de trabajo, asociando una variable de decisión X_{ijt} que representa si el trabajador i es asignado a la tarea j en el periodo t , o no. Es importante resaltar que este caso consisten en esquema de asignación balanceado, donde $m = n$, y cada trabajador puede ser asignado a un puesto de trabajo y viceversa. Así, también cada arco tiene asociado en la representación tiene un parámetro ε_{jt} relacionado con los niveles de valoración ergonómica que son percibidos en por los trabajadores i en el puesto de trabajo j en el periodo t .

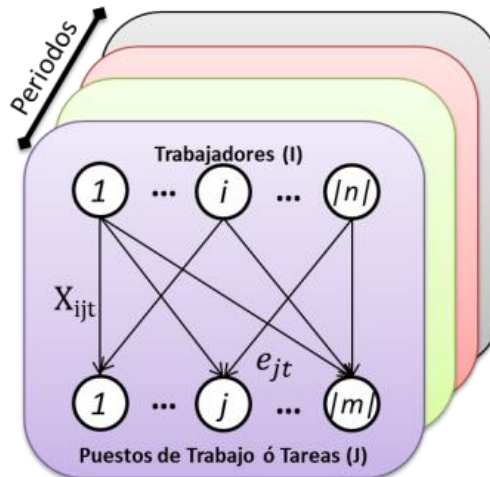


Figura 15. Representación Conceptual del Problema de Rotación Laboral Ergonómico.

3.4 Tipos de Modelos de Rotación Laboral

El modelo descrito anteriormente es conocido como el modelo general para la rotación de puestos de trabajo, donde el nivel de valoración ergonómica varía entre tareas dentro del puesto de trabajo (ε_{jt}), existen otras dos versiones del modelo, definidas de la siguiente manera:

- Rotación Laboral Dinámica o Individual, donde se definen valoraciones o puntuaciones de niveles de riesgo en periodos específicos, declarando ε_{ijt} como la medida o puntuación ergonómica del trabajador i realiza la tarea j durante del periodo t . Dentro del modelo se modifica ε_{jt} con ε_{ijt} en la ultima restricción.
- Rotación Laboral Estática o Simple, donde se definen valoraciones o puntuaciones de niveles de riesgo que no cambia entre periodos (no varia en el tiempo). Dentro del modelo se modifica ε_{jt} con ε_j en la ultima restricción.

El problema de rotación laboral bajo un enfoque ergonómico es similar al problema de programación de tareas en maquina en paralelo " $P_n|Prec|Cmax$ ", donde los trabajadores pueden ser definidos como maquinas que procesan trabajos sucesivos y cuyo objetivo es reducir la carga máxima ergonómica de cualquier trabajador (Makespan). Donde se debe preservar la precedencia entre puestos de trabajo, de

modo que los trabajos del primer período tiene que ser realizado por cada trabajador, antes de cualquier trabajo del próximo período esté disponible.

3.5 Complejidad de Rotación Laboral con Enfoque Ergonómico.

El problema de rotación ergonómica de puestos de trabajo posee características NP-Hard. Debido a que en la medida de niveles de riesgos pequeños o moderados, existen escenarios donde el tiempo computacional crece exponencialmente, en la medida que se incrementa el tamaño de elementos a rotar (trabajadores, tareas). Por ejemplo, para casos donde existen más de 15 puestos de trabajo no pueden ser resueltos por medio de software (solver's) de programación entera mixta en un límite reducido de tiempo.

La dificultad del problema de rotación laboral, se incrementa en la medida que se agregan puestos de trabajo y trabajadores dentro del esquema de asignación y secuenciación de tareas durante los periodos laborales. Tomando en cuenta que para la asignación de n trabajadores en n tareas en un periodo t , el número total de agendas es $(n!)^t$, en la Figura 16 se evidencia el aumento del espacio de solución para n trabajos y puestos de trabajo en $t = 4$.

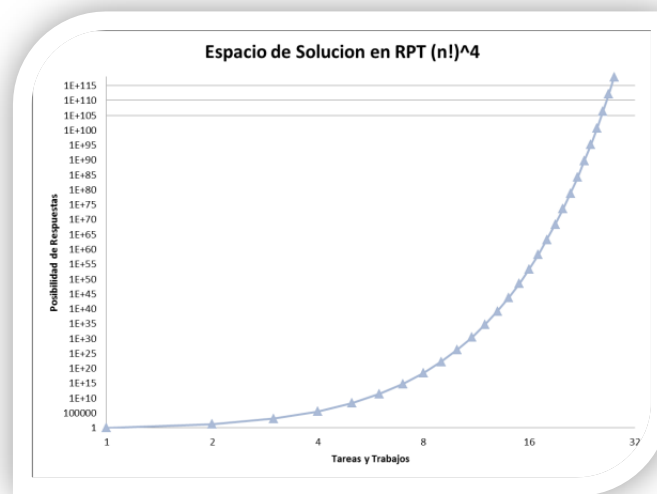


Figura 16. Espacio de Solución para la Rotación de Puestos de Trabajo de n Tareas y Trabajos en 4 Periodos.

La complejidad para el problema de rotación se demuestra con las pruebas desarrolladas por Otto y Scholl (2012), por medio de una reducción del Problema de la 3 Partición (3-PP), el cual es un problema NP completo de acuerdo por Garey y Johnson (1979).

Demostración. La rotación laboral con enfoque ergonómico, hace parte de problemas fuertemente NP-Hard. Dado un nivel máximo de riesgo E , este problema de decisión se pregunta si existen secuencias de T de puestos de trabajo $\{a_{\pi_1(1)}, a_{\pi_1(2)}, \dots, a_{\pi_1(n)}\}, \dots, \{a_{\pi_T(1)}, a_{\pi_T(2)}, \dots, a_{\pi_T(n)}\}$ en donde el

$\max_i \sum_{t=1}^T e_t(a_{\pi_t(i)})$ no excede a E . Este problema demuestra ser un problema fuertemente NP-Hard, si puede ser reducido polinómicamente por el 3-Partition Problem (3-PP).

3-Partition Problem (3-PP) B es un conjunto finito de $3m$ elementos $b_t (t = 1, \dots, 3m)$ $A \in \mathbb{Z}^+$ es limitado y $S(b_t) \in \mathbb{Z}^+$ son los tamaños de los elementos b_t de tal manera que cada uno $S(b_t)$ satisface $\frac{A}{4} < S(b_t) < \frac{A}{2}$ y $\sum_{t=1}^{3m} S(b_t) = m \cdot A$. Comprobando que B puede se particionado en m conjuntos desarticulados B_1, B_2, \dots, B_m de tal manera que $\sum_{b_t \in B_j} S(b_t) = A \forall j = 1, \dots, m$. Este problema es conocido por ser NP completo.

Transformación polinómica de 3PP al Problema de rotación ergonómica de puestos de trabajo. Para la demostración se construye la siguiente transformación de cualquier instancia de 3PP a una instancia del problema general, recordando que las estimaciones de riesgo ergonómico son dinámicas, pero no individual, dado un nivel de riesgo $e_t(a_j) \in \mathbb{Z}^+ (j = 1, \dots, n, t = 1, \dots, T)$. Sea $T = 3m$ periodos y $n = m$ puestos de trabajo. El primer trabajo tiene un nivel de riesgo $e_t(a_1) = S(b_t) + 1$ en todos los periodos $t = 1, \dots, 3m$. Los otros trabajos son "Filtros Técnicos" con niveles ergonómicos similares en cada periodo: $e_t(a_j) = 1 \forall j = 2, \dots, m, \forall t = 1, \dots, T$. Finalmente, $E = A + 3m$.

A continuación se demuestra, por medio del ejemplo de Otto y Scholl (2012), considerando 6 elementos, con limite de 44, y tamaños de 4,24,20,20,16,4. Donde la solución para esta instancia es $\{\{b_1, b_2, b_5\}, \{b_3, b_4, b_6\}\}$. El correspondiente esquema de rotación tiene $T = 6$ Periodos, $m = 2$ trabajos, Los niveles de valoración ergonómica del primer trabajador son 5, 25, 21, 21, 17, 5 del periodo 1 al 6, y los niveles de valoración ergonómica del segundo trabajo son iguales a 1 para todos los periodos, y $E = 44 + 6 = 50$. En Tabla 16 se evidencia los resultados de la demostración donde b_t representa al trabajador 1 y f_t denota el trabajo filtro 2 en los periodos t .

Esquema de Rotación		
Job/ NE		
	Job 1	Job 2
Periodo 1	$b_1/5$	$f_1/1$
Periodo 2	$b_2/25$	$f_2/1$
Periodo 3	$f_3/1$	$b_3/21$
Periodo 4	$f_4/1$	$b_4/21$
Periodo 5	$b_5/17$	$f_5/1$
Periodo 6	$f_6/1$	$b_6/5$
Total Nivel Ergonómico	50	50

Tabla 16. Transformación del Problema de la 3 Partición al Problema de Rotación Laboral Ergonómico. Tomado de Otto y Scholl (2011).

Con las pruebas de complejidad, se concluye que el problema de rotación es NP Completo, ya que los resultados que se obtienen en las instancias evaluadas no se les permite tener valores muy grandes para los datos de entrada (Niveles de Valoración Ergonómica) cuando es transformado en el Problema de la 3 Partición, donde se conoce como un problema NP-Hard.

3.6 Descripción de Modelos de Rotación Laboral

A continuación se plantean los modelos de rotación laboral relacionados con la manipulación de carga, el desarrollo de actividades repetitivas y la adopción de posturas forzadas de forma independiente, y finalmente son acoplados para evidenciar un modelo multiobjetivo que integre la valoración de riesgos ergonómicos propensos en el desarrollo de afecciones musculoesqueléticas aplicados dentro del esquema de rotación de puestos de trabajo.

3.6.1 Modelo Matemático de Rotación Laboral para la Manipulación Manual de Carga

El modelo matemático aplicado al desarrollo de agendas de rotación laboral está aplicado por medio del método de valoración ergonómico NIOSH (Ver Sección 2.5). El método NIOSH permite valorar y cuantificar adecuadamente el nivel de carga percibido por los trabajadores, donde se busca disminuir y balancear el riesgo de padecer afecciones lumbares por la manipulación y el desarrollo de levantamiento de materiales. El objetivo del modelo es minimizar el máximo nivel de riesgo ergonómico por manipulación de materiales dentro del esquema de rotación laboral.

La representación matemática del modelo se plantea así:

Minimizar E_{NIOSH}

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n X_{ijt} = 1, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ijt} = 1, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

$$\max_{H: 1, \dots, h} \{SLI_{ih}\} \leq E_{NIOSH}, \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$X_{ijt} \in (0,1), SLI_{ih} \in \mathfrak{R}; \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}, \\ \forall h \in \{1, \dots, H\}$$

Dónde:

I = Conjunto de Trabajadores, $i: \{1, \dots, n\}$

J = Conjunto de Puestos de Trabajo o Tareas, $j: \{1, \dots, n\}$

T = Conjunto de Rotaciones, $t: \{1, \dots, T\}$

H = Conjunto de Bloques de 4 horas laborales, $h: \{1, \dots, H\}$

$X_{ijt} = 1$ Si el trabajador i realiza la tarea j durante del periodo t ; $X_{ijt} = 0$ En caso contrario.

E_{NIOSH} = Nivel máximo de Riesgo por Manipulación Manual de Carga dentro del Esquema de Rotación Laboral.

El LI (J) índice de levantamiento de la tarea j es:

$$LI(j) = \frac{PC(j)}{RW(j)}$$

Donde: LI es el índice de levantamiento; PC es el peso de la carga de la tarea j; RWL es el Peso Máximo Recomendado en la que se desarrolla las operaciones de la tarea j.

SLI_{ih} = Nivel de Riesgo por Manipulación Manual de Carga Secuencial de las tareas desarrolladas por el trabajador i en bloque de trabajo h . Así:

$$SLI_{ih} = LI(p(i, h))_{ord1} + (LImax(p(i, h))_{ord1} - LI(p(i, h))_{ord1}) \times \frac{\sum_{c=1}^C LImax(p(i, h))_c \cdot TF_c}{LImax(p(i, h))_{ord1}}$$

LI_{ord1} = Es el máximo índice de manipulación de carga (LI) de las tareas c desarrolladas por el trabajador i en bloque de trabajo h .

$LImax_c$ = Es el índice de manipulación de carga (LI) de las tareas c desarrolladas por el trabajador i en bloque de trabajo h , Calculadas a la máxima frecuencia de manipulación.

$LImax_{ord1}$ = Es el máximo índice de manipulación de carga (LI) de las tareas c desarrolladas por el trabajador i en bloque de trabajo h , Calculadas a la máxima frecuencia de manipulación.

TF_c = Es el factor de duración de tareas c desarrolladas por el trabajador i , donde se divide la duración de la tarea entre el bloque h .

$p(i, h)$ = Es la posición asignada al trabajador i en la jornada h , de acuerdo con orden.

Al igual que el modelo matemático general para la rotación laboral (Ver Sección 3.2) las dos primeras restricciones contribuyen a que cada trabajador sea asignado exactamente a un puesto de trabajo en cada periodo, y la restricción final cuantifica el nivel de riesgo ergonómico percibido un trabajador en un bloque de trabajo (SLI) por medio del método NIOSH (LI), de manera que no exceda un nivel de riesgo (E_{NIOSH}).

3.6.2 Modelo Matemático de Rotación Laboral para Actividades Repetitivas

El modelo matemático aplicado al desarrollo de agendas de rotación laboral esta aplicado por medio del método de valoración ergonómico OCRA (Ver Sección 2.7). El método OCRA ayuda a cuantificar adecuadamente el nivel de repetitividad de las tareas desarrolladas por los trabajadores, donde se busca disminuir y balancear el riesgo de padecer afecciones musculo esqueléticas debido al desarrollo de movimientos estereotipados. El objetivo del modelo es minimizar el máximo nivel de riesgo ergonómico por repetitividad de acciones dentro del esquema de rotación laboral.

La representación matemática del modelo se plantea a continuación:

Minimizar E_{OCRA}

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n X_{ijt} = 1, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ijt} = 1, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

$$\{OCRA_i + RVL_i\} \leq E_{OCRA}, \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$X_{ijt} \in (0,1), OCRA_i, RVL_i \in \mathfrak{R}; \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

Dónde:

I = Conjunto de Trabajadores, $i: \{1, \dots, n\}$

J = Conjunto de Puestos de Trabajo o Tareas, $j: \{1, \dots, n\}$

T = Conjunto de Rotaciones, $t: \{1, \dots, T\}$

$X_{ijt} = 1$ Si el trabajador i realiza la tarea j durante del periodo t ; $X_{ijt} = 0$ En caso contrario.

E_{OCRA} = Nivel máximo de Riesgo por Repetitividad de Movimientos dentro del Esquema de Rotación Laboral.

$OCRA_i$ = Nivel de Riesgo por Repetitividad de Movimientos Secuencial de las tareas j desarrolladas por el trabajador i en todo el esquema de rotación.

RVL_i = Nivel de variabilidad de riesgo por Repetitividad de Movimientos Secuencial de las tareas j desarrolladas por el trabajador i en todo el esquema de rotación.

$p(i, t)$ = Es la posición asignada al trabajador i en la rotación t .

Así:

$$OCRA_i = \frac{ATA_i}{RTA_i}$$

$$OCRA_i = \frac{\sum_{t=1}^T f_j(p(i, t)) \times t_{j(t)}}{\sum_{t=1}^T [k_f(F_{Mj}(p(i, t)) \times P_{Mj}(p(i, t)) \times R_{eMj}(p(i, t)) \times A_{Mj}(p(i, t))) \times t_{j(t)}] \times (R_{CM} \times t_M)}$$

$$RVL_i = \sum_{t=1}^{T-1} Var(t, t+1) \cdot \frac{D_t + D_{t+1}}{D} - Dp_{t,t+1}$$

$Var(t, t+1)$ = Nivel de Variación de Riesgo OCRA entre Rotación t y $t+1$.

D = Duración del Turno de Trabajo en el Esquema de Rotación Laboral.

D_t = Duración del periodo de rotación t .

$Dp_{t,t+1}$ = Duración del periodo de descanso entre rotación t y $t+1$.

Las dos primeras restricciones contribuyen a que cada trabajador sea asignado exactamente a un puesto de trabajo en cada periodo, en el mismo sentido en que sucede en el modelo matemático general para la rotación laboral (Ver Sección 3.2), y la restricción final cuantifica el nivel de riesgo ergonómico percibido por un trabajador por medio del método OCRA y la variabilidad de en el nivel de riesgo de las tareas asignadas, de manera que no exceda un nivel de riesgo (E_{OCRA}). La combinación en la cuantificación de riesgos OCRA, con su variabilidad se asume a partir de la función de evaluación propuesta en la investigación de Asensio-Cuesta et al. (2012). Esta estrategia de compactar el nivel de riesgo OCRA y el calculo en la variabilidad permite cuantificar cuando un trabajador pasa de un puesto de trabajo donde existen cambios en la carga laboral.

3.6.3 Modelo Matemático de Rotación Laboral para la Fatiga Postural

El modelo matemático aplicado al desarrollo de agendas de rotación laboral esta aplicado por medio del método de valoración ergonómico RULA (Ver Sección 2.6). El método RULA permite valorar y cuantificar el nivel de fatiga percibido por los trabajadores, donde se busca disminuir y balancear el riesgo por la adopción de posturas estáticas e inadecuadas. El objetivo del modelo es minimizar el máximo nivel de riesgo ergonómico por fatiga postura, considerando la cantidad de veces que es asignado un trabajador sobre el mismo puesto de trabajo dentro del esquema de rotación laboral.

La representación matemática del modelo es:

Minimizar $E_{Rula} + \max_{i=1,\dots,n} \{B_{(i)}\}$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n X_{ijt} = 1, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ijt} = 1, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T e_j \times X_{ijt} = E_i, \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$\{E_i + RVRULA_i\} \leq E_{Rula}, \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$\sum_{t=1}^T X_{ijt} = B_{ij}, \forall i, j \in \{1, \dots, n\}$$

$$B_i = \max_{j:1,\dots,n} \{B_{ij}\}, \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$X_{ijt} \in (0,1), e_j \in \mathfrak{R}, B_{ij} \geq 0, B_i \geq 0; \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}$$

Donde:

I = Conjunto de Trabajadores, $i: \{1, \dots, n\}$

J = Conjunto de Puestos de Trabajo o Tareas, $j: \{1, \dots, n\}$

T = Conjunto de Rotaciones, $t: \{1, \dots, T\}$

$X_{ijt} = 1$ Si el trabajador i realiza la tarea j durante del periodo t ; $X_{ijt} = 0$ En caso contrario.

e_j = Nivel de riesgo postural en escala de valoración del método RULA para la tarea j .

E_i = Nivel de Riesgo Postural del Trabajador dentro de esquema general.

E_{Rula} = Nivel máximo de Riesgo Postural dentro del Esquema de Rotación Laboral.

B_{ij} = Cantidad de tareas j desarrollada por el trabajador i .

B_i = Numero máximo de Tareas $j: \{1, \dots, n\}$ desarrollada por el trabajador i .

$RVRULA_i$ = Factor de Fatiga acumulada dentro de esquema general.

$$RVRULA_i = \sum_{t=1}^{T-1} Fp_{it}$$

Fp_{it} = Factor de Fatiga acumulada de pasar del trabajo i en el periodo t .

$$\text{Calculado así: } Fp_{it} = 1 + \left[\alpha \times \sum_{k:t}^{t+1} \frac{e_j(a_{ik}) \cdot D_k}{d_k} \right]$$

α = Factor de Reducción.

a_{ik} = Puesto asignado al trabajador i en el periodo de rotación k .

$e_j(a_{ik})$ = Nivel de Riesgo en el puesto de trabajo j asignado al trabajador i en el periodo de rotación k .

D_k = Duración del periodo de rotación k .

d_k = Duración de la tarea acumulada en el periodo de rotación k .

Las dos restricciones iniciales permiten que cada trabajador sea asignado exactamente a un puesto de trabajo en cada periodo, en el mismo sentido en que sucede en el modelo matemático general para la rotación laboral (Ver Sección 3.2), y la restricción siguiente contribuye al nivel de riesgo ergonómico percibido por un trabajador por medio del método RULA, tomando en consideración la fatiga acumulada cuando se pasa de un puesto de trabajo a otro (Diego-Mas et al., 2009). Las restricciones finales hacen referencia a la cantidad de veces que un trabajador visita un puesto de trabajo, y así minimizar en los trabajadores el desarrollo de la misma tarea durante una jornada laboral.

3.7 Modelo Matemático Multiobjetivo de Rotación Laboral

3.7.1 Fundamentos de la Optimización Multiobjetivo

Los problemas en el mundo real necesitan que sean satisfechas simultáneamente múltiples criterios de desempeño (objetivos), los cuales a su vez pueden ser sincrónicos o contradictorios. Cuando existe la posibilidad de combinar los objetivos de un esquema o problema de forma adecuada, es posible

considerar un único objetivo para ser optimizado. En esta situación, para obtener la solución del problema basta con encontrarse el mínimo o máximo de una única función que pondere o les asigne una participación a todos los objetivos que se desean optimizar. Por otra parte, lo habitual es que se desconozcan la manera óptima de combinar distintos objetivos, en estas circunstancias que plantea que nos hallamos frente a un Problema de Optimización Multiobjetivo o Multiobjective optimization Problem (MOP) (Goicoechea et al., 1982).

Cuando existe un problema de optimización multiobjetivo, con objetivos contradictorios no siempre se puede hallar una solución única que sea considerada como la mejor, sino existe un conjunto de respuestas que representan los mejores compromisos entre los diferentes objetivos impuestos, este conjunto es conocido como conjunto de Pareto-Óptimo y su imagen en el espacio objetivo es conocido como frente de Pareto.

Por una parte, mientras en la programación monoobjetivo se busca un vector de decisión n-dimensional que optimice una función escalar, en la optimización multiobjetivo se requiere hallar un vector que optimice una función vectorial, cuyos elementos representan las distintas funciones objetivos. Matemáticamente un problema de optimización multiobjetivo se define así (Ehrgott y Gandibleux (2002)):

$$\begin{aligned} \text{Función Objetivo: } y &= F(x) = (f_1(x), \dots, f_k(x)) \\ \text{Sujeto a: } g(x) &= (g_1(x), \dots, g_k(x)) \leq 0 \end{aligned}$$

Dónde: $x = (x_1, \dots, x_n) \in X \subseteq \mathbb{R}^n$, $y = (y_1, \dots, y_k) \in Y \subseteq \mathbb{R}^k$. x es una variable de decisión vectorial n- dimensional, y es un vector objetivo k-dimensional, $X \subseteq \mathbb{R}^n$ demarca el espacio de decisión y $Y \subseteq \mathbb{R}^k$ el espacio objetivo. Mientras las restricciones definen la región factibilidad $X_f \subseteq \mathbb{R}^n$ y cualquier punto $x \in X_f$ es una solución factible.

Dentro de las nociones más aceptadas de “óptimo” para problemas con características multiobjetivo, es considerada como el óptimo de Pareto, si se dice que una respuesta $x \in X_f$ es un Pareto-óptimo respecto a un conjunto $\Omega \subseteq X_f$ si y sólo si $\exists x' \in \Omega$ para la cual $v' = F(x')$ domina a $u = F(x)$.

Dejando claro que la dominancia de Pareto establece: sean $u = (u_1, \dots, u_k)$ y $v = (v_1, \dots, v_k)$. Se dice que u domina a v y se denota como $u \succ v$, si y sólo si $\forall i \in \{1, \dots, k\}$, u_i es mejor o igual que v_i $\wedge \exists i \in \{1, \dots, k\}$ u_i es mejor que v_i . De esta manera u domina a v , si es mejor o igual a v en todos los objetivos y es estrictamente mejor en al menos un objetivo.

Un conjunto de óptimos de Pareto en un problema multiobjetivo dado $F(x)$ se define como:

$$P^* = \{ x \in X_f \mid \exists x' \in X_f F(x') \preceq F(x) \}$$

Y el frente de Pareto como:

$$PF^* = \{ u = F(x) / x \in P^* \}$$

Un ejemplo grafico que representa dos objetivos a maximizar podría ser el siguiente:

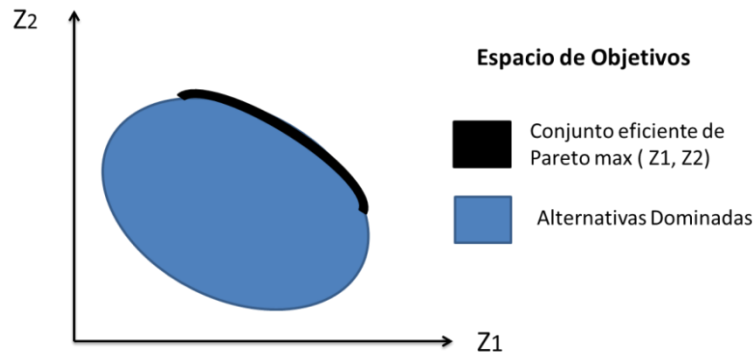


Figura 17. Representación de Conjunto de Pareto para un Problema multiobjetivo.

El concepto de solución habitualmente utilizado es el concepto de Pareto, este concepto está basado en el criterio de optimalidad paretiana, enunciado por Pareto en 1986.

3.7.2 Formulación de Modelo de Optimización Multiobjetivo de Rotación Laboral

Debido a que entre las causas propensas en la generación de trastornos musculo esqueléticos se encuentran los movimientos repetitivos, la manipulación de carga y la adopción de posturas forzadas o incómodas, se procedió a formular un modelo multiobjetivo para la rotación laboral, que permitiera considerar simultáneamente este conjunto de riesgos laborales a los cuales se hallan expuestos los trabajadores y encontrar propuestas de agendas de rotación de trabajadores dentro de estaciones de trabajo con el objetivo infundir variabilidad y diversidad en las tareas desarrolladas y al tiempo minimizar el riesgo máximo. La consolidación del modelo multiobjetivo corresponde a cada uno de los modelos señalados anteriormente (Ver Sección 3.6).

El modelo multiobjetivo de asignación y secuenciación de trabajadores en puestos de trabajo durante una jornada laboral está dado así:

$$\begin{aligned} \text{Min } f_1 &= E_{NIO\text{SH}} \\ \text{Min } f_2 &= E_{OCRA} \\ \text{Min } f_3 &= E_{Rula} + \max_{i=1, \dots, n} \{B_{(i)}\} \end{aligned}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n X_{ijt} &= 1, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\} \\ \sum_{j=1}^n X_{ijt} &= 1, \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\} \\ \max_{h: 1, \dots, h} \{SLI_{ih}\} &\leq E_{NIO\text{SH}}, \forall i \in \{1, \dots, n\} \end{aligned}$$

$$\{OCRA_i + RVL_i\} \leq E_{OCRA}, \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^T e_j \times X_{ijt} = E_i, \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$\{E_i + RVRULA_i\} \leq E_{Rula}, \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$\sum_{t=1}^T X_{ijt} = B_{ij}, \forall i, j \in \{1, \dots, n\}$$

$$B_i = \max_{j:1,\dots,n} \{B_{ij}\}, \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$X_{ijt} \in (0,1), OCRA_i \in \mathfrak{R}, RVL_i \in \mathfrak{R}, SLI_{ih} \in \mathfrak{R}, e_j \in \mathfrak{R}, B_{ij} \geq 0, B_i \geq 0; \\ \forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n\}, \forall t \in \{1, \dots, T\}, \forall h \in \{1, \dots, H\}$$

Donde:

I = Conjunto de Trabajadores, $i: \{1, \dots, n\}$

J = Conjunto de Puestos de Trabajo o Tareas, $j: \{1, \dots, n\}$

T = Conjunto de Rotaciones, $t: \{1, \dots, T\}$

H = Conjunto de Bloques de 4 horas laborales, $h: \{1, \dots, H\}$

$X_{ijt} = 1$ Si el trabajador i realiza la tarea j durante del periodo t ; $X_{ijt} = 0$ En caso contrario.

E_{NIOSH} = Nivel máximo de Riesgo por Manipulación Manual de Carga dentro del Esquema de Rotación Laboral.

E_{OCRA} = Nivel máximo de Riesgo por Repetitividad de Movimientos dentro del Esquema de Rotación Laboral.

E_{Rula} = Nivel máximo de Riesgo Postural dentro del Esquema de Rotación Laboral.

SLI_{ih} = Nivel de Riesgo por Manipulación Manual de Carga Secuencial de las tareas desarrolladas por el trabajador i en bloque de trabajo h .

$OCRA_i$ = Nivel de Riesgo por Repetitividad de Movimientos Secuencial de las tareas j desarrolladas por el trabajador i en todo el esquema de rotación.

RVL_i = Nivel de variabilidad de riesgo por Repetitividad de Movimientos Secuencial de las tareas j desarrolladas por el trabajador i en todo el esquema de rotación.

e_j = Nivel de riesgo postural en escala de valoración del método RULA para la tarea j .

D_t = Duración de periodo de rotación t .

B_{ij} = Cantidad de tareas j desarrollada por el trabajador i .

B_i = Numero máximo de Tareas $j: \{1, \dots, n\}$ desarrollada por el trabajador i .

Fp_{it} = Factor de Fatiga acumulada por el trabajador i en el periodo t .

3.8 Perspectivas y Conclusiones

Luego de ejecutar independientemente cada uno de los modelos de rotación de puestos de trabajo considerando la manipulación de carga, las posturas forzadas y la repetitividad de tareas, finalmente se representó el modelo multiobjetivo que permite afrontar de manera simultánea la rotación laboral con los factores de riesgo antes mencionados. Es importante conocer el nivel de complejidad del modelo integral en rotación laboral como quedó demostrado anteriormente, por tal motivo para el planteamiento y solución del mismo se propone desarrollar un Algoritmo Genético Multiobjetivo donde se aborde este problema de optimización combinatoria, perteneciente a los problemas de horarios y secuenciación de turnos de trabajo.

El diseño del modelo de rotación laboral se desarrolló con el propósito de minimizar el máximo riesgo ergonómico percibido y al tiempo considerar aspectos claves como la variabilidad, fatiga y esfuerzos que se acumulan y afectan la dinámica de las actividades que desarrollan los trabajadores dentro de los sistemas productivos.

Los modelos propuestos de forma independiente para cada uno de los objetivos son programados con el software de optimización GAMS con la finalidad de darle linealidad (Ver Anexo 5) y hacer parte del caso de validación, que contrasta la potencialidad de generar un Algoritmo Genético Multiobjetivo en un problema complejo.

Es importante considerar que los modelos no lineales son muchos más complejos que resolver que sus análogos no lineales, considerando además que en muchos paquetes de programación matemática se hallan soluciones que no son necesariamente la estancia óptima (García y Maheut, 2011/2012). Por ello la implementación de la linealidad es una salida cuando se requiere darle manejo a un tipo de problema, bajo estas condiciones.

La configuración de condiciones no lineales en lineal, se dan por la configuración de variables SOS1 y SOS2. De acuerdo como señala García y Maheut, (2011) es considerado explícitamente por algunos motores de resolución y facilita enormemente el proceso de ramificación y corte, y por tanto reduce el coste computacional.

La estructura de programación lineal entera desarrollada en el Anexo 5, se le da linealidad por medio de la designación de las variables configurada por relaciones lógicas, que se apoya de una variable de activación combinadas (SO1 y SO2).

4. OPTIMIZACION MULTI OBJETIVO EN ROTACIÓN LABORAL CON ALGORITMOS GENETICOS

4.1 Introducción

El problema de rotación laboral es complejo por sí mismo como quedó demostrado (Ver Sección 3.5), ahora si se toma en consideración múltiples objetivos (Fatiga Postural, Manipulación de Carga y Movimientos Repetitivos) el problema aumenta su complejidad para ser resueltos por medio de técnicas tradicionales, es por ello que se hace necesario la implementación de técnicas heurísticas y metaheurísticas (Ver Sección 1.8). Siendo estas un conjunto de pasos para obtener un resultado, las cuales hallan buenas respuestas en bajo tiempo computacional, sin la garantía de obtener optimalidad. Las heurísticas son aplicadas a problemas específicos, en contraste una metaheurísticas es una técnica superior que puede ser aplicada a un conjunto de problemas. En términos generales una metaheurísticas se refiere a un proceso iterativo guiado, que modifica las operaciones una heurística subordinada, combinando de forma inteligente distintos conceptos para explorar y explotar el espacio de búsqueda.

En la familia de metaheurísticas se pueden hallar métodos como: programación lógica, algoritmos genéticos y métodos evolutivos, redes neuronales, recocido simulado, búsqueda tabú, búsqueda voraz, colonias de hormigas, búsqueda local variable, búsqueda dispersa, nube de partículas y sus híbridos. Donde su éxito está dado por su capacidad de resolver en la práctica algunos problemas complejos en bajo tiempo y con eficiencia.

Dentro de las técnicas metaheurísticas implementadas al problema de rotación laboral se hallan los algoritmos genéticos (Carnahan y Redfern, 1998; Carnahan et al., 2000; Kullpattaranirun y Nanthavanij, 2005; Asawarungsaengkul y Nanthavanij, 2008; Diego-Mas et al., 2009; Asensio-Cuesta et al., 2011), el recocido simulado (Seçkiner y Kurt, 2007), y la colonia de hormigas (Seçkiner y Kurt, 2008). Actualmente no se evidencia la implementación de alguna metaheurísticas multiobjetivo dentro del problema de rotación laboral con enfoque ergonómico.

A continuación se detallan aspectos teóricos, principios, fundamentos de los algoritmos evolutivos y más específicamente de los algoritmos genéticos, tomando en cuenta la aplicación de esta metaheurísticas en la solución del modelo de rotación laboral que prevengan los riesgos ergonómicos en actividades repetitivas, manipulación de carga y posturas forzadas.

4.2 Algoritmos Evolutivos

Los algoritmos evolutivos son métodos de optimización fundamentados en modelo computacional de los procesos naturales de evolución. Los algoritmos evolutivos han demostrado en el tiempo su potencialidad por su capacidad de solucionar problemas difíciles desde un contexto matemático, los cuales los hace atractivo en la implementación en esquemas que son no lineales, estocásticos o dinámicos, debido a que se requiere poca información para su implementación. En la ejecución de los algoritmos evolutivos es posible hallar un conjunto de soluciones diversas, pero con una calidad homogénea que está dada por el uso de una población inicial en común.

Los algoritmos evolutivos se constituyen en un método de búsqueda y optimización robusto con capacidad de enfrentarse a variaciones en el tiempo, aleatoriedad, multimodalidad, discontinuidad y ruido que se puede hallar en muchos problemas de optimización afectando y ampliando su complejidad. Los algoritmos evolutivos han sido aplicados a muchas ramas, la clasificación de los algoritmos evolutivos está dada en: programación evolutiva, estrategias evolutivas, algoritmos genéticos, y programación genética.

Dentro de los algoritmos evolutivos todo comienza con una población inicial (soluciones) que es afectada y se transforma para la generación de las siguientes generaciones, donde su posibilidad de adaptación se dan por una función objetivo (fitness), y dar paso en la generación de las siguientes poblaciones, hasta que se encuentre que los individuos se han adaptado para propagar sus genes a las generaciones siguientes.

4.2.1 Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos nacen desde que Holland (1975) plantea la posibilidad de incorporar los procesos naturales de selección y evolución para resolver gran cantidad de problemas de inteligencia artificial, lo cual se potencializó una década después con la implementación de los computadores. Los algoritmos genéticos poseen un lugar preferencial dentro de los algoritmos evolutivos debido a que es capaz de agrupar todos los fundamentos. Dentro de las definiciones de algoritmos genéticos, Pérez (1996) los considera como métodos estocásticos de búsqueda ciega de soluciones cuasi-óptimas. En ellos se mantiene una población que representa un conjunto de posibles soluciones que son sometidas a ciertas transformaciones con las que se trata de obtener nuevos candidatos, y a un proceso de selección sesgado en favor de los mejores candidatos. Los algoritmos genéticos se convierten en un método de búsqueda ciego, codificado, múltiple y estocástico (Goldberg, 1989).

Entre las mayores potencialidades de los algoritmos genéticos se encuentra la posibilidad de intercambiar información estructurada en paralelo, y conocido como el paralelismo implícito. Los algoritmos genéticos operan con un conjunto de soluciones iniciales potenciales a una situación, donde cada individuo que integra una población hace parte de una solución en particular, la cual es representada en forma de código genético. La implementación de una función objetivo (Fitness) de cada individuo expresa que tan buena es la solución del individuo para el problema. En esta medida el fitness enmarca el individuo con las mejores y peores soluciones, y así conocer la capacidad del individuo para transmitir sus genes a las siguientes generaciones (Davis y Mitchell, 1991).

En la Figura 18 se evidencia el comportamiento típico de un algoritmo genético. Donde se instaura una población inicial, luego de ello se evalúa la función objetivo (fitness) de cada uno de los individuos de la población de acuerdo con el problema y luego se evoluciona dando paso a las generaciones por medio de la aplicación de pasos de evaluación (selección, reproducción y mutación). Dentro de la fase de selección se escogen los padres de las próximas generaciones, el fitness establece la capacidad y la aptitud de prevalecer en futuras generaciones. Existen un conjunto de técnicas implementadas en la fase de selección. La población que representa las soluciones evoluciona dentro de las generaciones con el

objetivo de generar mejores respuesta para el problema. Dentro de la evolución se hace uso de operadores genéticos los cuales permiten la combinación de los individuos seleccionados en la población y de esta manera potencializar las soluciones y así determinar la población de las siguientes generaciones.

Luego que se ha seleccionado los individuos, la población de la próxima generación (hijos) se generan por medio de recombinación (cruce-crossover) permitiendo el intercambio de información genética de los individuos para la creación de los hijos. En la fase de mutación se desarrollan cambios intempestivos dentro de la información genética de los individuos con el objetivo de agregar diversidad de las futuras generaciones. Finalmente se remplaza los nuevos individuos dentro de la nueva población, y se reinicia todo el proceso hasta obtener un conjunto de generaciones o un valor deseado.

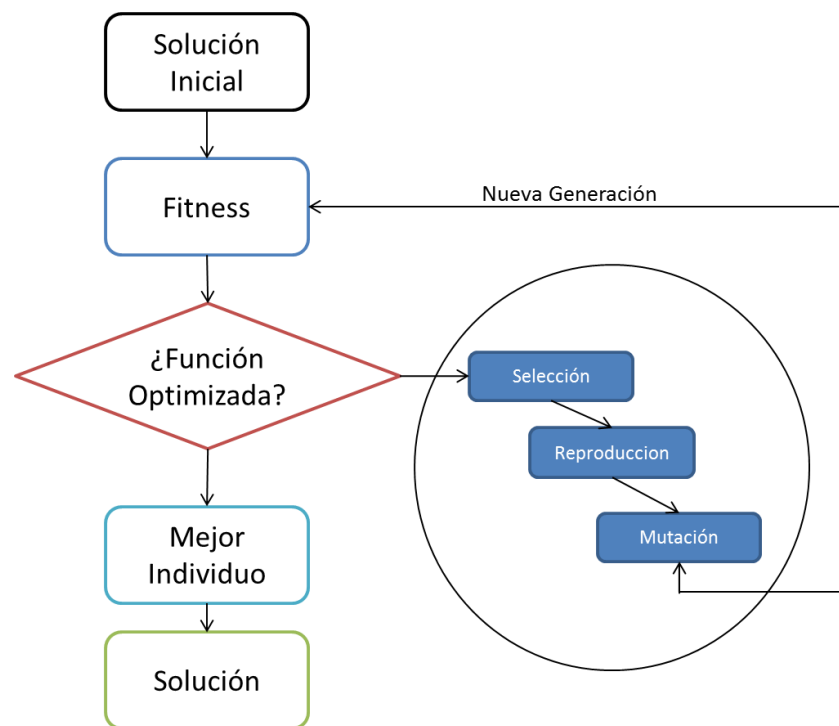


Figura 18. Esquema Básico de Algoritmo Genético

4.2.2 Aspectos Claves de los Algoritmos Genéticos

El método necesario para programar un algoritmo genético requiere definir criterio como: codificación de individuos que lo represente dentro la población (código genético), penalización de individuos no factibles, dado por la naturaleza del problemas, inicialización que define la población y las estancias para operar, criterio de parada, función de evaluación y aptitud, operadores genéticos, criterios de selección, criterios de remplazo y parámetros de funcionamiento. A continuación se indica el flujo de los aspectos claves así:

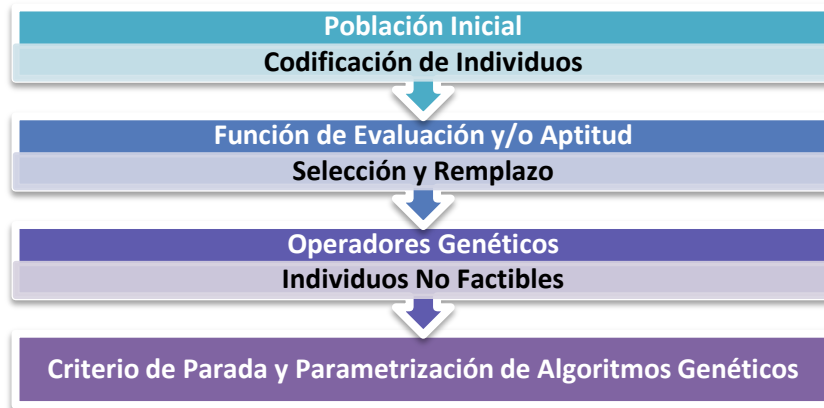


Figura 19. Aspectos Claves de los Algoritmos Genéticos

4.3 Algoritmos Genéticos Multiobjetivo

En muchos problemas de optimización se requiere la evaluación de modo simultaneo de varios objetivos y restricciones, los algoritmos genéticos han tenido la capacidad de afrontarlo de manera efectiva, en algunos casos se trabaja ajustando un valor fitness que los represente, y en otras estrategias se utiliza con técnicas fundamentadas el concepto de soluciones no dominadas u óptimos de Pareto (frente de Pareto- Ver Sección 3.7).

Una búsqueda multiobjetivo, donde se requiere optimizar de manera simultanea varios objetivos, por la naturaleza de los problemas es difícil alinearlos bajo una misma meta en común. Dentro de los primeros intentos por desarrollar algoritmos genéticos multiobjetivo se encuentran la evaluación vectorial (VEGA) desarrollada por Schaffer (1984), la cual evaluaba por separado los objetivos en subconjuntos de individuos de la población, donde la selección se daba de forma interna y los cruces entre las subpoblaciones para luego obtener una combinación de poblaciones y así obtener soluciones. Este método no garantizaba hallar calidad en las respuestas de los problemas en particular.

Los algoritmos genéticos son buenos para hallar un conjunto de soluciones en un problema multiobjetivo, por medio de una ejecución o simulación del proceso (corrida), gracias a que se focaliza en hallar simultáneamente un conjunto de soluciones potenciales y así encontrar varias soluciones del conjunto óptimo de Pareto en una sola corrida. En la implementación de los algoritmos genéticos multiobjetivo para la búsqueda de soluciones potenciales es habitual el uso de procesos de selección y operadores genéticos, en similitud con lo que sucede con los algoritmos genéticos sencillos. Un Algoritmo Multiobjetivo posee diferentes funciones de aptitud, las cuales permiten determinar el nivel de dominio de una respuesta de un individuo de la población frente a los demás.

Un número de variados algoritmos genéticos que consolidan y afrontan problemas de optimización multiobjetivo han sido desarrollados, a continuación se describen algunas de las técnicas más reconocidas:

Los Algoritmos Genéticos Multiobjetivo (MOGA) de Fonseca y Fleming (1993), se fundamentan en los esquemas desarrollados por Goldberg (1989), donde se busca procedimientos de jerarquización basados

en la no dominancia, en el cual la aptitud de un individuo esta relacionada con la cantidad de soluciones que domina. Uno de los inconvenientes de este tipo de asignación se da por su convergencia prematura.

Los Algoritmos Genético por Clasificación no dominado (NSGA) de Srinivas y Deb (1994), se basan en los principios de Goldberg (1989) de una forma más directa, donde se utiliza la jerarquización de Pareto con el objetivo de favorecer las soluciones no dominadas, combinado con un método de nichos que permite mantener la diversidad. NSGA está centrado en la clasificación por capas de los individuos de acuerdo con su aptitud en la no dominancia de las soluciones.

Deb et al. (2002) Propusieron una nueva versión llamada el NSGA-II. El nuevo algoritmo permite la incorporación de elitismo y un operador de compilación o apiñamiento (Crowding) para permitir la diversidad de la población, aunque se pierden espacios de búsqueda dentro del algoritmo por la segmentación de la calidad de los individuos de acuerdo a su densidad dentro del conjunto de respuestas dentro de la población.

Algoritmo Genético por Nichos de Pareto (NPGA) desarrollado por Horn et al. (1994), están basados en la combinación de selección por torneo y el concepto de dominancia de Pareto. El método permite la elección de dos individuos aleatoriamente, para ser comparados con un subconjunto de la población. Si uno de los individuos es dominado y el otro no, el individuo no dominado es el ganador. En caso de empate, el ganador se decide por medio de una función para compartir la aptitud.

Los Algoritmos Evolutivos de Intensidad de Pareto (SPEA) creado por Zitzler y Thiele (1999), permiten mezclar las técnicas de algoritmos multiobjetivo. Esta técnica posee un operador de elitismo que almacena los mejores individuos y les asigna un valor de fortaleza. El nivel de dominancia considera la fortaleza de los mejores individuos.

4.4 Procedimiento Propuesto de Algoritmo Genético Multiobjetivo para el Esquema de Rotación Laboral Ergonómico

Dentro de la propuesta de diseño de un modelo de rotación laboral bajo un enfoque ergonómico se procede a esquematizar la construcción de un Algoritmo Genético Multiobjetivo que integra la manipulación manual de carga, la adopción de postura forzadas y la repetitividad de movimientos. El algoritmo genético opera en función del modelo multiobjetivo desarrollado anteriormente (Ver Sección 3.7) donde se requiere asignar un conjunto de trabajadores, sobre un conjunto de puestos de trabajo en periodos determinados (rotaciones) a fin de minimizar los riesgos ergonómicos.

4.4.1 Definición de Algoritmo Genético Multiobjetivo

El algoritmo genético propuesto conserva los lineamientos básicos de toda técnica evolutiva (Ver Figura 18), agregando a esta una búsqueda multiobjetivo fundamentada por medio de los Algoritmo Genético Multiobjetivo por Clasificación No dominado (NSGA). A continuación se detalla el esquema general del NSGA:

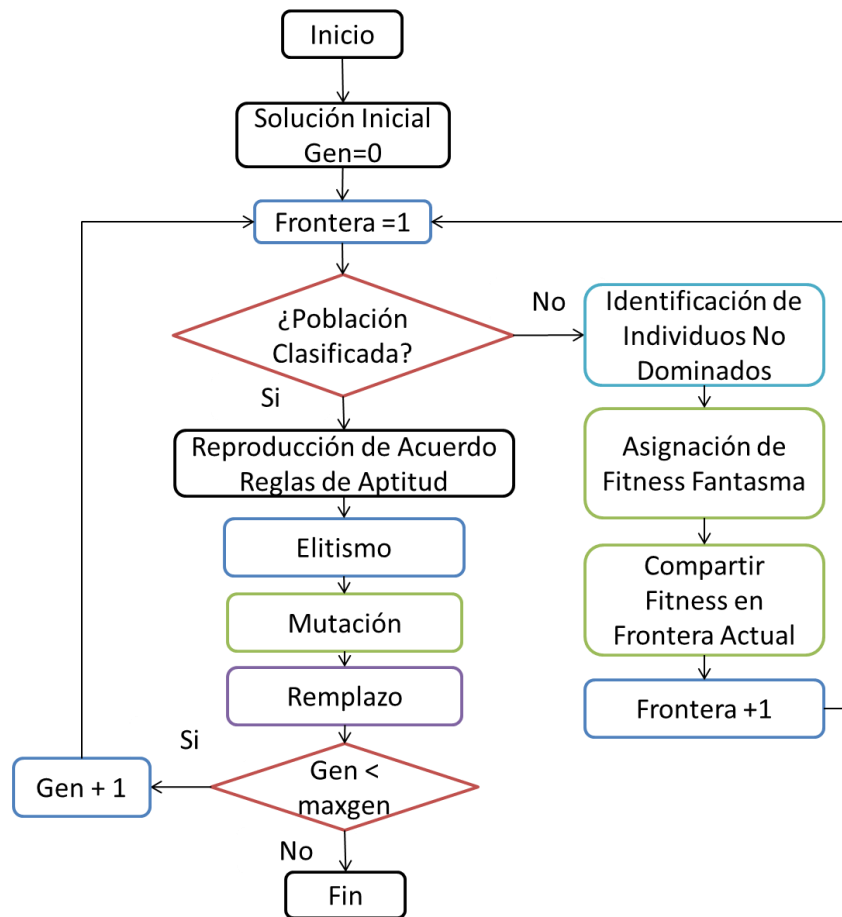


Figura 20. Esquema Básico de Algoritmo Genético multiobjetivo por Clasificación no dominado (NSGA)

Donde el procedimiento inicia con la jerarquización inicial de no dominancia de los individuos, y luego se desarrolla la clasificación por grupos o frentes, segmentando así a la población por nivel de dominancia y al tiempo se asigna un valor de aptitud ficticio en común por cada uno de los grupos de acuerdo al nivel de dominancia, lo que permite mantener la diversidad de la población. El algoritmo propuesto (NSGA) está centrado en clasificar por capas los individuos basados en su aptitud en la dominancia de las soluciones y al tiempo se incluye una estrategia elitista que permite una mejor orientación hacia el frente de Pareto.

4.4.2 Representación del Individuo (Solución)

La Codificación de individuos es la representación de las soluciones que hacen parte de la población, se determina como el código genético, y este se condiciona por las características del problema. Se considera que la representación del individuo es adecuada cuando se respetan principios de completitud, coherencia, uniformidad, sencillez y localidad.

El algoritmo se implementa bajo la inicialización de un conjunto de soluciones, en este caso el esquema de representación esta dado en esquema matricial, donde el tamaño de la matriz se encuentra determinado por la cantidad de trabajadores involucrados en la rotación (J) y la cantidad de intervalos de rotación considerados dentro del esquema general (T).

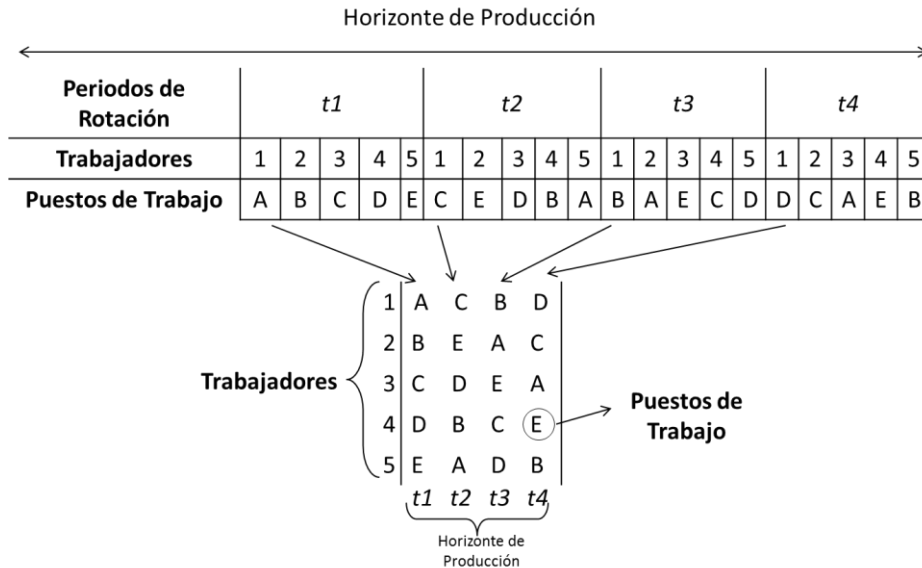


Figura 21. Representación de Solución de Esquema Rotación Laboral.

En la Figura 20 se establece en términos generales la representación de la solución o cromosoma, para 5 puestos de trabajo y 5 trabajadores, con 4 intervalos de rotación. En el esquema el trabajador 1 es asignado al puesto de trabajo A en la primera rotación, en el trabajo C en la segunda, en el trabajo B en la tercera, y finalmente es asignado al puesto de trabajo D.

4.4.3 Configuración de Población Inicial

La población Inicial permite la creación de conjunto de soluciones para el problema de rotación laboral, la cual se puede desarrollar de manera aleatoria o al tiempo se pueden implementar técnicas que agilicen la creación de individuos. La clave de la creación de la población está en la diversidad de los individuos que la conforman y controlando la aparición de individuos no factibles. En la definición del tamaño de la población es indispensable la experimentación tomando en cuenta la convergencia de la población, y de este modo determinar la velocidad del algoritmo en función de este tamaño.

Cada una de las soluciones iniciales se brindan de la mismo modo como se esquematiza el cromosoma o individuo para el problema, previamente explicado de forma matricial de tamaño $J \times T$. El proceso de creación de individuos consiste en definir las asignaciones de puesto de trabajo para cada trabajador, de modo que se distribuyan cada una de las tareas sin permitir la repetición de la misma hasta completar el intervalo de rotación. Esto significa que dentro de la expresión matricial ($J \times T$) nos posible hallar la misma asignación de tareas dentro del de una columna que representa un intervalo de rotación, y así

garantizar la generación de individuos factibles (Ver figura 20). Finalmente el tamaño de la población (**P**) es una condición parametrizable que se determina por el nivel de ajuste y funcionalidad del algoritmo genético de manera global. A continuación se plasma el Pseudocódigo para la creación de individuos factibles, así:

```

Inicio de Creación de Individuos
Tamaño de la población (Tp);
Total de Jornadas-a (T);
Total Trabajadores-i (J);
Secuencia [a][i] (Asignación columna)
Contador P; (Tamaño de población)
Individuos[p][i][a];
Mientras (P< TamanoPoblacion){
  Para (a=0; a<TotalJornadas; a++){
    Para (i=0;i<TotalTrabajadores; i++){
      Secuencia[a][i]=(Math.random()*TotalTrabajadores);
      Para(j=0;j<i ; j++){
        Si (Secuencia[a][i]==Secuencia[a][j]){
          i--;
        }
      }
      Individuos[k][i][a]= Secuencia[a][i];
    }
  }
  P++;
}

```

Figura 22. Pseudocódigo para la Generación de Individuos.

4.4.4 Evaluación de los Individuos dentro de la Población (Fitness)

Función de Evaluación y/o Aptitud (Fitness) es la condición que valora la calidad de solución que los individuos representan sobre la población. De acuerdo con su evaluación se podrá conocer la participación del individuo sobre las técnicas de selección. La función de evaluación se relaciona directamente con el resultado que se desea optimizar, aunque pueden ser implementados funciones de aptitud que permiten cuantificar el rendimiento de los individuos debido a la dificultad de implementarlo. Tomando en consideración la característica multiobjetivo del modelo de rotación laboral se deberán conocer cada una de la funciones de aptitud que complementa el problema. A continuación se explican cada uno de los funciones de aptitud para cada uno de los objetivos fundamentados en los modelos expuestos anteriormente (Ver Sección 3.6).

Función de Aptitud de Manipulación de Carga: Esta función de evaluación busca cuantificar el nivel de carga por manipulación de carga, al cual se encuentra expuestos los trabajadores. Para ello es indispensable contar con parámetros de entrada necesarios para implementar el Método NIOSH (Ver Sección 2.5), Tales como: **LC** (Load Constant), Multiplicador Horizontal (**HM**), Multiplicador Vertical (**VM**), Multiplicador de Distancia (**DM**), Multiplicador de Asimetría (**AM**), Multiplicador de Frecuencia (**FM**), Multiplicador de Frecuencia Máximo (**FMM**) y Multiplicador de Agarre (**CM**), los cuales permiten el calculo

de los índices de levantamiento (LI), así como los índices máximos de los puestos de trabajo (LI_{max}) que serán incluidos dentro del esquema de rotación.

La función de evaluación para cada uno de los trabajadores por postura forzada, se encuentra relacionada con el índice de levantamiento secuencia (SLI), desarrollado en las secciones anteriores (Ver Sección 2.5.2):

$$\text{Fitness-NIOSH-Trabajador}(x) = \max_{h:1,\dots,H} \{SLI_{xh}\}$$

$$SLI_{xh} = LI(p(x, h))_{ord1} + (LI_{max}(p(x, h))_{ord1} - LI(p(x, h))_{ord1}) \times \frac{\sum_{c=1}^c LI_{max}(p(x, h))_c \cdot TF_c}{LI_{max}(p(x, h))_{ord1}}$$

El fitness calculado por medio del Método NIOSH, para un trabajador hace referencia al nivel de riesgo por manipulación manual de carga secuencial de las tareas desarrolladas por el trabajador i en bloque de trabajo h . (Bloque h = sub-conjunto de intervalos de rotación, no excede 4 horas laborales continuas)

Donde:

$p(x, h)$ = Es la posición asignada al trabajador x en la jornada h , de acuerdo con orden.

LI_{ord1} = Es el máximo índice de manipulación de carga (LI) de las tareas c desarrolladas por el trabajador i en bloque de trabajo h .

LI_{max}_c = Es el índice de manipulación de carga (LI) de las tareas c desarrolladas por el trabajador i en bloque de trabajo h , Calculadas a la máxima frecuencia de manipulación.

LI_{max}_{ord1} = Es el máximo índice de manipulación de carga (LI) de las tareas c desarrolladas por el trabajador i en bloque de trabajo h , Calculadas a la máxima frecuencia de manipulación.

TF_c = Es el factor de duración de tareas c desarrolladas por el trabajador i , donde se divide la duración de la tarea entre el bloque h .

La evaluación final que determina el nivel de aptitud de los individuos con respecto a la población es calculada con el nivel máximo de riesgo ergonómico NIOSH, a través de su índice de levantamiento secuencia (SLI), que puede asumir un trabajador cuando ha desarrollado su rotación.

El Fitness Manipulación de Carga Total del Individuo =

$$\max_{x:1,\dots,j} \{\text{Fitness} - \text{NIOSH} - \text{Trabajador}(x)\}$$

Función de Aptitud de Repetividad de Movimientos: Esta función de evaluación permite el cálculo del nivel de riesgos que asume un trabajador involucrado con puestos de trabajo que exigen repetición en el desarrollo de movimientos. En la formulación y desarrollo del nivel de carga es importante tomar en cuenta información inicial que exige el Método OCRA, como herramienta para cuantificar la repetitividad de los trabajadores. Entre de los parámetros se hallan: Número total de acciones periódicas (F), Factor de Fuerza Aplicada (F_{Mj}), Factor de Postura (P_{Mj}), Multiplicador de Repetitividad (R_{eMj}), Factor de

Penalización (A_{Mj}), Factor de Recuperación (R_{cM}), Factor de Duración de Tareas (t_M). Los cuales contribuyen a la formulación del el indicador OCRA por cada uno de los puestos de trabajo.

La función de evaluación para cada uno de los trabajadores por actividades repetitivas se encuentra formulada así:

$$\text{Fitness-OCRA-Trabajador } (x) = OCRA(x) + RVL(x)$$

De esa forma, $OCRA(x)$ se relaciona con el nivel de riesgo por repetitividad de movimientos secuenciales a los cuales se encuentran expuesto un trabajador x luego de rotar, y se calcula de la siguiente manera (Ver Sección 2.7):

$$OCRA_{(x)} = \frac{\sum_{t=1}^T f_j(p(x, t)) \times t_{j(t)}}{\sum_{t=1}^T [k_f(F_{Mj}(p(x, t)) \times P_{Mj}(p(x, t)) \times R_{eMj}(p(x, t)) \times A_{Mj}(p(x, t))) \times t_{j(t)}] \times (R_{cM} \times t_M)}$$

$RVL(x)$, Hace referencia al nivel de variabilidad que existe en la repetitividad de movimientos secuenciales de las tareas j desarrollados por el trabajador x en todo el esquema de rotación, y es calculado así:

$$RVL(x) = \sum_{t=1}^{T-1} Var(t, t + 1) \cdot \frac{D_t + D_{t+1}}{D} - Dp_{t,t+1}$$

Donde:

$p(x, t)$ = Es la posición asignada al trabajador x en la rotación t .

$Var(t, t + 1)$ = Nivel de Variación de Riesgo OCRA entre Rotación t y $t+1$.

D = Duración del Turno de Trabajo en el Esquema de Rotación Laboral.

D_t = Duración del periodo de rotación t .

$Dp_{t,t+1}$ = Duración del periodo de descanso entre rotación t y $t+1$.

En la formulación de nivel de riesgo por repetitividad, además de considerar aspectos claves en el calculo del método OCRA, tomar en cuenta la variabilidad en la asignación de las tareas, como lo desarrollado en estudios por Asensio-Cuesta et al. (2012), ayuda a definir los cambios que perciben los trabajadores cuando pasan de una rotación donde el puesto de trabajo se relaciona con un nivel de riesgo y luego pasan a ocupar otra tarea con diferente nivel. A continuación se señala los valores tomados por $Var(t, t + 1)$ en función del índice OCRA en la Tabla 17.

		Rotación t+1			
		Nivel Index OCRA	Bajo (<2,3)	Medio (>2,3 & <3,5)	Alto (<3,5)
Rotación t	Bajo (<2,3)		0	0	0
	Medio (>2,3 & <3,5)		0	2	3
	Alto (<3,5)		0	2	4

Tabla 17. Valoración de Variabilidad de Riesgo OCRA. Tomado de Asensio-Cuesta et al. (2012).

Finalmente se procede a calcular la aptitud del individuo, el cual es el valor máximo de riesgos que percibido por todos los trabajadores luego de realizar las rotaciones sobre los distintos puestos de trabajo. De esta forma se aborda el fitness de cada uno de los individuos pertenecientes a la población del algoritmo genético.

El Fitness por Repetitividad del Individuo = $\max_{x:1,\dots,j} \{Fitness - OCRA - Trabajador(x)\}$

Función de Aptitud de Posturas Forzadas: Esta función de evaluación consiste en medir el nivel de carga asimilada por los trabajadores por adquirir posturas propias que demandan los puestos de trabajo. Para tal motivo es indispensable conocer previamente el nivel de valoración ergonómica para cada una de las tareas involucradas en la rotación laboral, por medio del método RULA (Ver Sección 2.6). Donde se espera obtener un nivel de riesgo RULA (e_j)-**RULA**, como parámetros iniciales para obtener el fitness por posturas forzada.

La función de evaluación para cada uno de los trabajadores se encuentra constituida de la siguiente forma:

$$\text{Fitness-RULA-Trabajador}(x) = ERula(x) + RVRula(x) + Nrep$$

De esta forma, $ERula(x)$ hace referencia al nivel de riesgo que acumula un trabajador x , establecido por medio de la suma del nivel de riesgo postural en escala de valoración del método RULA para la tarea j que desarrolla el trabajador durante el recorrido en las distintas rotaciones. Su cálculo se establece así:

$$ERula(x) = \sum_{j=1}^{Tj} \sum_{r=1}^T e_j(a_{xr})$$

Donde, $e_j(a_{ir})$ = Nivel de Riesgo en el puesto de trabajo j asignado al trabajador x en el periodo de rotación r .

$RVRula(x)$, Corresponde al factor de fatiga acumulada por el trabajador dentro del esquema general de rotación laboral, el cual se calcula con las suma de factor de fatiga que obtiene el trabajador en cada ciclo de rotación. Su cálculo se establece como:

$$RVRula(x) = \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^{T-1} \left[1 + \left[\alpha \times \sum_{k:r}^{r+1} \frac{e_j(a_{xr}) \cdot D_k}{d_k} \right] \right]$$

Donde:

α = Factor de Reducción (parámetro).

a_{xk} = Puesto asignado al trabajador x en el periodo de rotación k .

$e_j(a_{xk})$ = Nivel de Riesgo postural (RULA) en el puesto de trabajo j asignado al trabajador x en el periodo de rotación k .

D_k = Duración del periodo de rotación k .

d_k = Duración de la tarea acumulada en el periodo de rotación k .

Finalmente, $Nrep$ Consiste en el número máximo de puestos de trabajo que es repetido por un trabajador cuando desarrolla el esquema de rotación, de esta manera el aumento del $Nrep$ disminuye la probabilidad de que este individuo sobreviva en las próximas generaciones, dado que se busca minimizar en el nivel de riesgo asumido por los trabajadores.

Ahora que se ha evaluado la aptitud de cada trabajador se procede a realizar el cálculo del cada uno de los individuos que conforma la población del algoritmo genético. El nivel de aptitud que condiciona la calidad de cada individuo esta dada por el valor máximo de riesgo que asumen los trabajadores, con este fin se permite focalizar en la minimización del nivel máximo de riesgo por carga postural dentro de la jornada laboral.

El Fitness Postura Total del Individuo = $\max_{x:1,\dots,j} \{Fitness - Rula - Trabajador (x)\}$

Función de Evaluación de Fitness Total-(Multiobjetivo)

Luego de conocer cada uno de los fitness por posturas forzadas, manipulación de carga y actividades repetitivas, los individuos con menor valor de aptitud son considerados de mejor calidad frente a toda la población, debido a que el algoritmo genético propuesto busca minimizar el máximo riesgo ergonómico al cual se encuentran expuestos los trabajadores. Por otra parte para definir un valor fitness que represente los mejores compromiso entre los objetivos propuestos se procede a determinar el nivel de dominancia de cada uno de los individuos y así conocer el conjunto de Pareto-Optimo y su imagen en el espacio objetivo conocida como frente de Pareto (Ver Sección 3.7).

El fitness para el individuo i de la población se calcula a partir de la fórmula:

$$Fitness (i) = \frac{n}{N}$$

Donde, n es el número de soluciones que el individuo i domina entre la población, y N es el tamaño de la población.

Como parte del proceso del Algoritmo Genético Multiobjetivo de tipo (NSGA), se procede a desarrollar las capas de los individuos fundamentados en su aptitud en la dominancia de las soluciones, y así plantear las fronteras del problema. En el algoritmo propuesto se determina finalmente la dominancia y se organizan los individuos desde los más dominantes hasta los más dominados, segmentando el

conjunto total de individuos en cada una de las capas. Para el problema de rotación laboral determinamos clasificar en c capas, y las capas se compone de FP_c individuos. Donde FP_c está dado en valor porcentual de la población.

4.4.5 Penalización de los Individuos dentro de la Población

Considerar la posibilidad de obtener la formación de individuos dentro de la población con información o constitución no deseada se da por características propias de los problemas, que van desde su codificación e inclusive restricciones propias del problema que se desea modelar. De los métodos recomendados para evitar este tipo de situación en el algoritmo genético se implementa la penalización de aquellos individuos que no cumplen con criterios propios del problema.

Es importante tomar la rotación laboral como una opción de infundir variabilidad de las tareas que se desarrollan en los sistemas productivos, pero al tiempo es necesario considerar todos los criterios que potencializan la aplicación de una herramienta que permite planear y programar las agendas de rotación de los puestos de trabajo. Dentro las restricciones que se deben considerar se encuentran permitir la inclusión de personas en condiciones de discapacidad, y a la vez en el procedimiento de introducción de trabajadores en rehabilitación dentro de los procesos organizacionales, como lo señala Asensio-Cuesta et al. (2010). Además se deben considerar las habilidades, capacidades, competencias y limitantes que poseen los trabajadores para asumir los retos de cada uno de los puestos de trabajo, tomando en cuenta aspectos claves como la preparación, entrenamiento, experiencia e inclusive factores como la remuneración. Entonces se busca penalizar la asignación de trabajadores en puestos de trabajos determinados desde la planeación en la rotación.

Penalización					
Puesto / Trabajador	1	2	3	4	5
1	X			X	
2		X		X	
3		X			
4		X			
5					

Tabla 18. Ejemplo de Penalización de Trabajadores dentro de Jornada de Rotación.

En la Tabla 18 se señala un ejemplo de penalización de 5 trabajadores y 5 puestos de trabajo, para un esquema de rotación laboral. Se observa que los únicos trabajadores que pueden ser asignados en cualquier esquema de rotación son el trabajador 3 y 5. Por otra parte el trabajador 1 no posee experiencia para ser asignado al primer puesto de trabajo. Mientras que los trabajadores 2 y 4 poseen limitaciones en sus capacidades laborales (Salud, Limitación Física) que les impiden abordar todos los puestos de trabajo.

De igual modo como se representan las asignaciones no pertinentes dentro del esquema de rotación, estas condiciones varían y modifican el nivel de aptitud o fitness de los individuos que violan estas restricciones en la población del algoritmo genético. Para ello se afectan su calidad de respuesta y se evita que sobrevivan y evolucionen a próximas generaciones. La penalización de individuos no

conformes con el esquema son valorados con un nivel de dominancia ante la población de cero (0), por lo cual los deja por fuera de la frontera de Pareto.

4.4.6 Selección de Individuos dentro de la Población

El proceso de selección permite que los individuos que mejor se adapten sobre la población puedan reproducirse y persistir generacionalmente. Este proceso es típicamente conocido como la selección natural, donde individuos menos aptos disminuyen su posibilidad de reproducirse y sobrevivir. En la selección se le da paso a escoger los individuos que se reproducirán para la generación de nuevos individuos, la escogencia de los sobrevivientes, y si se desea la implementación de una estrategia elitista.

Luego que se han evaluado uno a uno los individuos que conforman la población del algoritmo genético, si se ha podido conocer la calidad de respuesta en la solución del problema, es importante determinar quienes pasaran a las próximas generaciones, y de la misma forma conocer los individuos reproductores que darán paso a nuevos individuos.

Dentro de los mecanismos de muestreo de la población de algoritmos genéticos se consideran 3 técnicas así: Muestreo directo, Muestreo aleatorio y Muestreo Estocástico. En la formulación del problema de rotación laboral se tomara un Muestreo Estocástico. Este tipo de muestreo asigna una probabilidad de selección de los individuos de acuerdo con su aptitud (fitness). Dentro de este tipo de muestreo se caracterizan 4 estrategias: Sorteo, Ruleta, Restos y Torneo.

En este caso se hará uso de la técnica de la ruleta como forma de selección, debido a que permite que individuos con mayor capacidad posean mayor probabilidad de sobrevivir, sin negar la posibilidad a individuos de menor aptitud, y así garantizar la diversidad de la población en futuras generaciones. La ruleta se implementa tomando en consideración la probabilidad acumulada en la aptitud de los individuos dentro de la población.

4.4.7 Reemplazo de Individuos

La actividad de reemplazo es la operación de obtener los nuevos individuos que conformaran la próxima generación. Este proceso hace énfasis en la forma como es constituida las próximas generaciones. De acuerdo con las técnicas de reemplazo conocidas (*Inmediato, Llenado e Inclusión*), el algoritmo propuesto hará uso de una técnica por inclusión directa, donde se selecciona la nueva generación entre los progenitores y nuevos descendientes. Cuando los descendientes superan a los progenitores estos reemplazan en su totalidad a los progenitores. En caso contrario se toman los descendientes dentro de la próxima generación, agregando los mejores progenitores (Individuos Sobrevientas e Individuos Elitistas) para completar la población.

4.4.8 Proceso de Reproducción de Individuos

El proceso de reproducción dentro de los algoritmos genéticos es una condición necesaria en la evolución de los individuos sobre la población, de esta manera las próximas generaciones adoptan las características de sus progenitores. En el cruce de los individuos, además de heredar características de sus padres, se diversifican y comparten información que permite la creación de nuevos códigos genéticos.

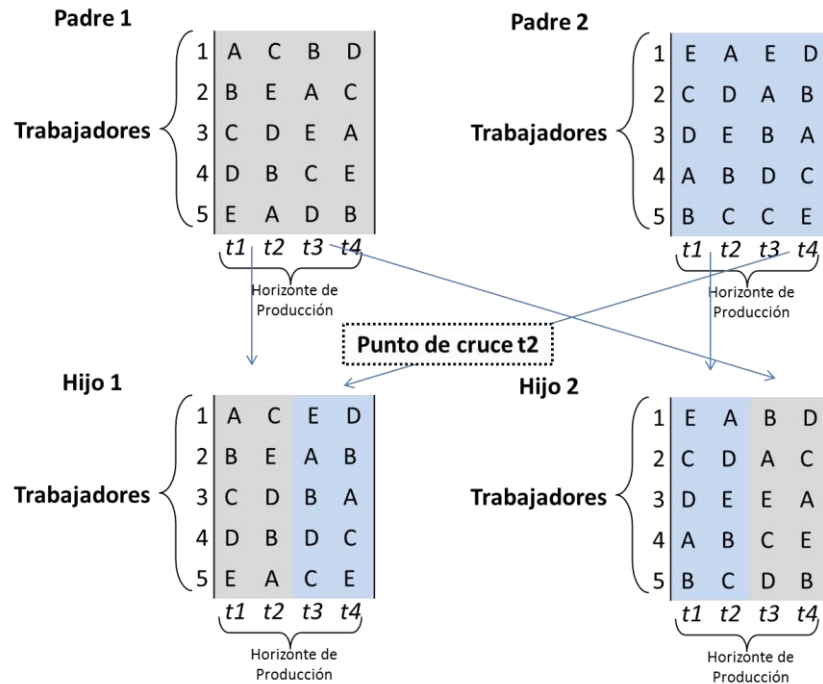


Figura 23. Esquema de Cruce Monopunto para la Rotación Laboral.

El operado de cruce permite que se pueda compartir la información de los individuos que han sido escogidos por medio del proceso de selección de la población. Enriqueciendo la información o el código genético y por ende la aptitud de los mismos. Existen variados mecanismos de cruce, los cuales varían por el tipo de problemas y codificación. Entre ellos: monopunto, bipunto, multipunto, segmentado, uniforme.

La probabilidad en la Tasa de cruce (T_c) determina la cantidad de individuos que serán creados a través de la reproducción. En la Figura 23 se muestra el proceso de cruzamiento bajo un cruce monopunto. La implementación de cruce monopunto permite definir de un punto aleatorio de cruce contenido en el tamaño de las rotaciones, y así compartir información entre dos individuos padres para generar consecuentemente dos descendientes que son totalmente factible con respecto a su código genético.

4.4.9 Proceso de Mutación de Individuos

El proceso de mutación es un operador que le da un toque de variabilidad y diversidad en la formación de individuos dentro de la población. La mutación permite explorar diversos espacios de solución. Habitualmente la mutación se implementa sobre los individuos involucrados dentro del cruce, cambiando o modificando la información que se encuentra contenida dentro del código genético.

El parámetro que define la Tasa de Mutación (Tm) se relaciona con la cantidad de individuos que serán modificados o mutados en su código genético, luego que se han desarrollado los cruces y al tiempo se ha permitido tener individuos sobreviviente y elitistas. La intensidad de mutación (Im) es la cantidad de veces que ocurre una modificación propiamente sobre un individuo que ha sido seleccionado de aleatoriamente dentro de la población.

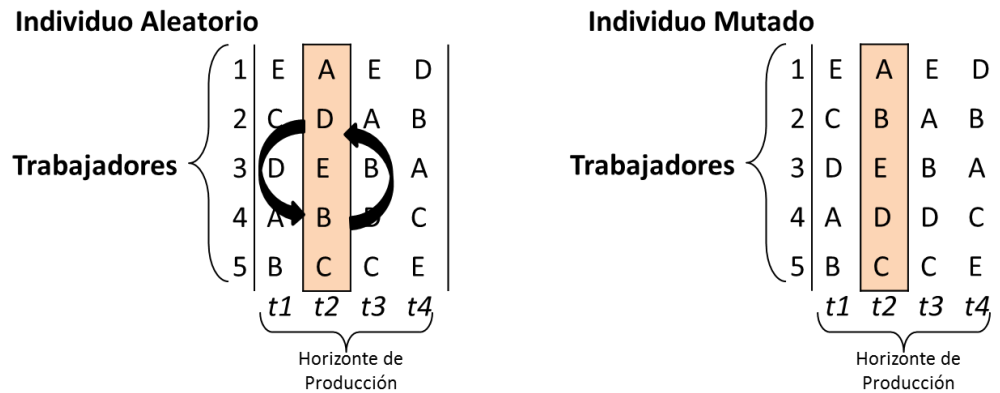


Figura 24. Estrategia de Mutación para la rotación laboral

La Figura 24, demuestra el proceso de mutación donde se selecciona aleatoriamente un individuo, y de la misma forma se selecciona un intervalo en el horizonte de producción, para luego desarrollar un intercambio de las tareas asignadas para dos trabajadores. En este caso el trabajador 2 y el trabajador 4 realizan un intercambio del puesto de trabajo asignado en el periodo de rotación t2 que da paso a un nuevo individuo que contiene nueva información dentro de su código genético y lo reemplaza en la próxima generación. Al igual que el proceso de cruce donde no se permiten la generación de individuos inadecuados, el proceso de mutación garantiza que el contenido genético de los individuos sea factible para el problema de rotación laboral.

4.4.10 Parametrización de Algoritmo Genético

La información que permita la construcción de un algoritmo genético propuesto se considera clave en la forma como se abordan el problema y se obtendrán resultados. El modo de alinear cada uno de los parámetros con los que operara el algoritmo genético no están dados por fundamentación teórica sino por experimentación sobre el problema y su función objetivo a evaluar, la cual respeta principios básicos en la combinación de la información necesaria, como lo es: el tamaño de la población, la tasa de

cruzamiento, mutación y elitismo, el modo o técnica de selección y remplazo, la función de evaluación o fitness a emplear, así como los criterios de parada.

A continuación se recopilan y definen cada uno de los parámetros necesarios para llevar a cabo el Algoritmo Genético Multiobjetivo por Clasificación No dominado (NSGA) y cada uno de los elementos necesarios en su implementación. En la Figura 25 se muestra detalladamente cada uno de los aspectos.

El proceso de construcción del Algoritmo Genético Multiobjetivo propuesto se fundamenta en generar una población inicial, el cual es evaluado de acuerdo con los distintos objetivos planteados y luego de ello se procede a definir la constitución de las próximas generaciones. Los reproductores de las próximas generaciones son tomados con la tasa de cruce (**Tc**), por medio de técnica de selección de la ruleta. En el procedimiento propuesto también se incluye una técnica conocida como elitismo (**Te**). Esta estrategia beneficia a los individuos con mejor actitud, permitiendo la entrada de estos individuos sobre las próximas generaciones. El proceso de selección se complementa con la elección de individuos sobrevivientes (**Ts**) que complementa el tamaño de la población. Todo el procedimiento se completa hasta que se cumpla un mínimo de generaciones, donde la población pueda evolucionar, fijando un número máximo de iteraciones (**maxgen**).

En resumen, los parámetros necesarios para llevar a cabo el algoritmo genético son:

Parámetros Propios de Algoritmo Genético Multiobjetivo.

J: Cantidad de trabajadores y puestos involucrados en la rotación laboral.

T: Cantidad de intervalos de rotación.

P: Tamaño de población.

Tc: Tasa de cruce (Probabilidad de Cruzamiento).

Tm: Tasa de mutación (Probabilidad de Mutar).

Im: Intensidad de mutación.

Te: Individuos elitistas dentro de la población.

maxgen: Número máximo de generaciones.

Pena: Tabla de penalización.

P-ND: Tamaño del conjunto de Individuos no dominados.

FP_c: Porcentaje de la Población en la capa *c*.

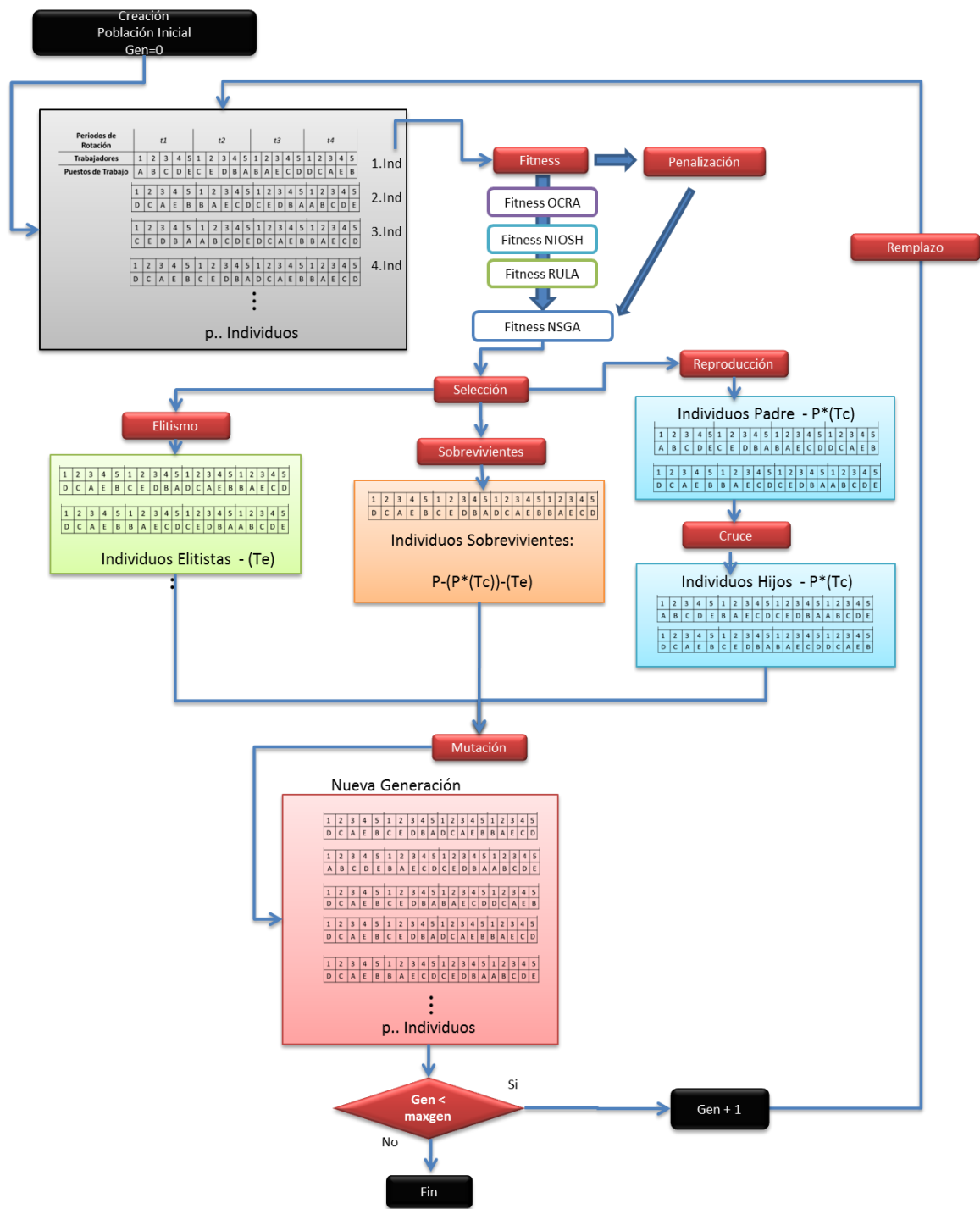


Figura 25. Flujo General de Algoritmo Genético Multiobjetivo Propuesto.

Parámetros de Riesgo Postural (RULA)

(e_j) -**RULA**: nivel de riesgo RULA del puesto j .

α : Factor de Reducción fatiga.

D_k : Duración del periodo de rotación k .

Parámetros de Riesgo por Manipulación de Carga (NIOSH)

LC: Constante de Carga NIOSH.

HM: Multiplicador Horizontal.

VM: Multiplicador Vertical.

DM: Multiplicador de Distancia.

AM: Multiplicador de Asimetría.

FM: Multiplicador de Frecuencia.

FMM: Multiplicador de Frecuencia Máximo.

CM: Multiplicador de Agarre.

Parámetros de Riesgo por Repetitividad (OCRA)

F: Número total de acciones periódicas.

F_{Mj} : Factor de Fuerza Aplicada.

P_{MJ} : Factor de Postura.

R_{eMj} : Multiplicador de Repetitividad.

A_{Mj} : Factor de Penalización.

R_{cM} : Factor de Recuperación.

t_M : Factor de Duración de Tareas.

$Var(t,t+1)$: Nivel de Variación de Riesgo OCRA entre Rotación t y $t+1$.

$Dp(t,t+1)$: Duración del periodo de descanso entre rotación t y $t+1$.

4.5 Perspectivas y Conclusiones

Luego de esquematizar el algoritmo genético multiobjetivo propuesto para modelar la rotación laboral, se procedió a diseñar bajo el lenguaje JAVA en la plataforma Eclipse Java EE IDE for Web Developers - Version Helios Service Release 2. La estructura propuesta en la programación del aplicativo se desarrollo en bloques secuenciales encadenados, los cuales compactan y compilan la información de manera interactiva. Además se hace una conexión de la aplicación en conjunto con una hoja estructurada de datos con la información del problema en MS EXCEL, que a su vez la procesa y arroja los resultados en una nueva hoja de datos. Las instrucciones de aplicación del programa se especifican en el Anexo 6.

5. METODOLOGÍA Y VALIDACIÓN DE ROTACIÓN LABORAL MULTI OBJETIVO CON ENFOQUE ERGONÓMICO

5.1 Introducción

Se presenta un nuevo modelo de rotación laboral con enfoque ergonómico que integra objetivos como la manipulación manual de carga, la adopción de postura forzadas y la repetitividad de movimientos basados en un algoritmo genético multiobjetivo. A continuación se detalla una metodología para abordar de manera congruente y simultánea los riesgos anteriormente señalados, permitiendo afrontar los riesgos laborales bajo la concepción de mejorar los trastornos musculoesqueléticos presentado por los trabajadores, la carga laboral, el estrés, la fatiga, la monotonía, entre otros aspectos, por medio de un esquema de rotación de puestos de trabajo bajo un enfoque ergonómico.

5.2 Modelo de Intervención para la Implementación de Rotación Laboral Multiobjetivo con Enfoque Ergonómico

Existen factores claves para la implementación de un sistema de rotación laboral, como mencionan Wells (2004), Vezina (2004), y Filus y Partel (2012), por tal motivo a continuación se estructura *Modelo de Intervención para la Implementación de Rotación Laboral Multiobjetivo con Enfoque Ergonómico*, tomando en cuenta las condiciones y pautas para ser llevadas a cabo, así:



Figura 26. Modelo de Intervención para la Implementación de Rotación Laboral Multiobjetivo.

- Generación de Ambiente de Cambio en Esquema de Rotación Laboral: En esta fase se busca estudiar el contexto de implementar y garantizar la pertinencia de llevar a cabo esquemas de rotación de puestos de trabajo, en la cual se requiere la participación total de la organización, para

afrontar los cambios en la programación y secuenciación de los turnos de los trabajadores. Un adecuado análisis del ambiente se detalla la conveniencia de influir variabilidad y diversidad de roles que pueden asumir los trabajadores, sin incurrir en lesiones o afecciones en la estabilidad y salud laboral de los mismos. Además se deben dar garantías en el ambiente de rotación por parte de la dirección de la organización, donde se establezcan índices de compensación equitativos, niveles de formación y capacitación que facilite y mejore la gestión del cambio.

- Determinación de la Demanda Laboral, el Nivel de Exposición, Duración y Frecuencia de Riesgos Ocupacionales: Establecer el nivel de riesgo al que se encuentran expuestos los trabajadores dentro de las estaciones de trabajo, tomando en cuenta las acciones a medir, las estrategias y herramientas a implementar, así como los índices y parámetros que señalan del nivel, exposición, duración y frecuencia de riesgos a considerar. En caso de afrontar la presencia de trastornos musculoesqueléticos, es importante valorar como se ejercen la fuerza (manipulación de materiales), las acciones y movimientos (repetitividad), y las posiciones que se adoptan (posturas inadecuadas). Cuando no se pueda afrontar la disminución de los riesgos laborales en su exposición, duración o frecuencia, el puesto de trabajo no debe ser propenso a ser incluido dentro de un esquema de rotación, sino por el contrario debe ser excluido e intervenido prioritariamente con herramientas ergonómicas.
- El Número de Puestos de Trabajo y Trabajadores a Rotar: La definición de los trabajadores y las estaciones de trabajo es un factor clave que determina el alcance en el diseño de los esquemas de rotación laboral. Se estudia la pertinencia de las estaciones de trabajo y los trabajadores de acuerdo con los aspectos a considerar en la disminución de riesgos laborales. Se contarán con los trabajadores y puestos de trabajo donde es factible imprimir diversidad y variabilidad en la asignación de las tareas y estaciones, y así balancear la carga de trabajo, y permitir periodos de recuperación del sistema musculoesquelético entre todos los trabajadores. Obtener un número muy bajo de puestos de trabajo y trabajadores influye en una falta de variabilidad, mientras un elevado número de estaciones de trabajo y trabajadores puede entorpecer la dinámica de asignación y orden en la gestión interna de las organizaciones. Es por ello que las decisiones se deben dar bajo estudio de la situación laboral y el sistema productivo.
- Valoración Ergonómica: La valoración de riesgos puede ser apoyada con métodos ergonómicos. Un análisis ergonómico siempre será la entrada para evaluar la pertinencia de mejorar las condiciones de un puesto de trabajo y por ende ser incluido en un sistema de rotación laboral. La identificación de estaciones de trabajo con baja demanda o carga de trabajo, pero periodos con picos en esfuerzos son puestos críticos donde se debe considerar la necesidad de implementar la rotación laboral, debido a que esos micro-periodos son suficientes para causar dolencias y afecciones a los trabajadores, los cuales no beneficia a un esquema de rotación, sino todo lo contrario. Los métodos de valoración ergonómica son fundamentales para la obtención de información relevante que

constate las condiciones laborales y a la vez de paso a la planeación y programación en la rotación de puestos de trabajo.

- Duración de Jornada Laboral y Numero de Periodos de Rotación Laboral (Intervalos): Definir en la planeación los intervalos de rotación y su duración se acoplan en el diseño para encontrar el mejor esquema para el cumplimiento y la minimización de riesgos ergonómicos, donde se establece cada cuanto periodos cambiar de asignación y/o puesto de trabajo. Si en un sistema de rotación laboral se hallan diversidad en riesgos en la asignación de los puestos de trabajo, la manera como se desarrollan los intervalos de rotación permitirá que los trabajadores cambien su estatus en nivel de riesgo y complejidad de las tareas. Por ello el intervalo de rotación es un aspecto clave que influencia en la variabilidad de los riesgos que perciben los trabajadores sobre todo el esquema de rotación laboral, dado que se cambia de acciones, número de posturas, repetición de tareas e inclusive en la manipulación de materiales.
- Perfil de Trabajadores y Puestos de Trabajo (Restricciones y Preferencias): Es importante señalar el nivel de competencia, capacidades y la aptitud de cada uno de los trabajadores involucrados dentro de la rotación laboral. La definición de las restricciones en la asignación (limitaciones), así como las preferencias de los trabajadores dentro de los esquemas de la rotación, donde se posibilita involucrar estratégicamente a cada uno de los trabajadores en su nuevo rol. En las restricciones se pueden señalar limitaciones médicas, falta de competencias laborales, desniveles de compensación salarial entre otros aspectos que señalan la coherencia en la asignación de las habilidades requeridas del puesto de trabajo en contraste con las habilidades y competencias contenidas por el trabajador.
- Modelo para la Rotación Laboral por medio de Algoritmos Genéticos: Luego de abordar la rotación laboral dentro de la gestión organizacional y definir aspectos como la cantidad de trabajadores y puestos de trabajo, el perfil de los trabajadores, la duración y la frecuencias de rotación, así como el estudio de los riesgos laborales que inciden, se procede a configurar el Algoritmo Genético Multiobjetivo (NSGA) como herramienta que colecta toda la información y permite la planeación y programación de la rotación de puestos de trabajo bajo un esquema ergonómico (Ver Sección 4.4). El Algoritmo Genético posee un conjunto de información totalmente parametrizable en relación con su configuración e información del ambiente laboral para la generación de un plan de rotación laboral, considerando aspectos ergonómicos (repetitividad, manipulación de carga y posturas forzadas). El plan de rotación define los mejores esquemas de asignación donde se minimicen los riesgos de sufrir afecciones de trastornos musculoesqueléticos. Los resultados serán obtenidos por medio de herramienta computacional que entregara una oferta de soluciones con calidad y eficiencia, para su depuración, análisis e interpretación bajo las condiciones reales de las organizaciones.

- **Implementación:** Finalmente el esquema de rotación laboral deberá ser validado y puesto en marcha, donde se evidencien ajustes, además de oportunidades de mejora en razón con la interacción de trabajadores, puestos de trabajo e intervalos de rotación, coordinación, logística de seguimiento y adaptación. En el proceso de implementación es fundamental el seguimiento con datos y cifras de riesgos ergonómicos a fin de evaluar la continuidad del plan de rotación. El diseño de Implementación de sistema de rotación requiere una adecuada coordinación en el intercambio de las estaciones de trabajo, donde no se afecten criterios de producción, y además pueda tener un instrumento de acompañamiento y seguimiento por parte de un intendente o supervisor de la operación, como garantía de la adecuada coordinación necesaria. En el desarrollo de la implementación es importante recopilar información de las secuencias de rotación que son asignadas, registrar cumplimiento e incumplimientos, y todo el conjunto de información que permita retro alimentar un sistema de rotación en pro del bienestar de los trabajadores.

5.3 Supuestos de Metodología Propuesta

Luego de conocer el modelo de intervención, el modelo plantea un conjunto de supuestos o condiciones para ser llevado a cabo, que son importantes resaltar.

- El modelo actúa en esquemas de rotación balanceados, donde se poseen igual cantidad de puestos de trabajo a rotar y la misma cifra de trabajadores, aunque es posible trabajar con esquemas no balanceados asignando puestos de trabajo sin carga laboral o bajos niveles de riesgo, que permitan puestos o trabajadores inactivos durante la jornada total de rotación laboral.
- Los trabajadores reciben un nivel de capacitación o poseen un nivel inicial de habilidades para los trabajadores adecuado para ejecutar las actividades dentro de los puestos de trabajo con seguridad y sin perjuicio en la integridad de los empleados.
- Cada estación o puesto de trabajo se encuentra dedicada a una operación en particular, la cual es conocida y claramente identificable dentro de la organización.
- Los datos recabados por medio de los métodos de valoración ergonómica pertenecen a una muestra del trabajo, que es representativo y que cubre todos los aspectos del puesto de trabajo dentro del sistema productivo.
- El esquema de rotación laboral solo será implementado, cuando se conoce con certeza su impacto en la variabilidad y diversidad en la demanda laboral que podrán asumir los trabajadores dentro de los puestos de trabajo en la organización.
- La rotación laboral propuesta se fundamenta en un esquema netamente ergonómico, en caso que el sistema productivo involucre riesgo ponderado tales como: Riesgos físicos, eléctricos, químicos, térmicos, ambientales entre otros; se deberá considerar su impacto y depurar los trabajadores que podrán participar en las agendas de rotación. (ejemplo: Trabajadores en temperaturas elevadas vs Trabajadores con Temperaturas bajas).
- La implementación de esquema de rotación deberá ser realizado de forma coordinada y supervisada de manera que no se afecten el sistema productivo.

5.4 Determinación Experimental de Parámetros del Algoritmo Genético Multiobjetivo

Para definir y establecer los parámetros del Algoritmo Genético Multiobjetivo, relacionados con: el tamaño de la población (P), el número de generaciones ($maxgen$), la probabilidad de cruce (Tc), la probabilidad de mutación (Tm), la intensidad de la mutación (Im) y elitismo (Te), se ejercieron pruebas experimentales, dado que la determinación óptima de parámetros del Algoritmo Genético es considerado un problema complejo de programación no lineal que se ajusta a las condiciones de su caso de aplicación, de esta forma se desarrollaron experimentos por condición empírica, donde se evalúa por etapas el ajuste paramétrico de las condiciones del algoritmo como se indica en la Tabla 19. Las pruebas experimentales se fundamentaron sobre un esquema de rotación preliminar construido para 14 puestos y 14 trabajadores, donde se permiten 4 intervalos de rotación de 2 horas y una jornada de descanso de 1 hora entre la rotación 2 y 3. El caso experimental se encuentra construido a base del estudio de Asensio-Cuesta et al. (2012) y al tiempo enriquecido con las investigaciones de Diego-Mas et al. (2009), y Carnahan et al. (1999). El caso de experimental y todos los detalles se evidencian en el Anexo 1.

Parámetros de AGOMO	Nomenclatura	Valores
Numero de Generaciones	$maxgen$	15000,5000
Tamaño de la Población Inicial	P	100,250,400
Probabilidad de Cruce	Tc	0.3, 0.6, 0.9
Probabilidad de Mutación	Tm	0.1, 0.3, 0.5
Intensidad de Mutaciones	Im	1, 2, 4
Elitismo	Te_1	On, Off
Intensidad de Elitismo	Te_2	1

Tabla 19. Valores experimentales de los parámetros del Algoritmo Genético Multiobjetivo.

Del análisis de los resultados obtenidos, se asumieron los siguientes valores para los parámetros del AG:

- Número de individuos que constituyen la población o tamaño de la población, 100.
- Número de generaciones o iteraciones con el algoritmo, 5000.
- Tipo de selección por Ruleta.
- Tipo de recombinación de un punto.
- Probabilidad de recombinación o crossover del i -ésimo individuo en la población, 60%.
- Probabilidad de que un gen de los individuos de la población sea seleccionado para mutar, 30%.
- Intensidad de Mutaciones de 2.
- Elitismo activo e intensidad de 1.

Los parámetros establecidos se consideraron como adecuados, para la obtención de buenos resultados, en tiempos computacionales razonables.

5.5 Caso de Estudio de Rotación Laboral Sobre Sistema Productivo.

La metodología propuesta fue implementada sobre el sistema de fabricación de producto plásticos debido a su alta variabilidad en la dinámica de actividades y tareas desarrolladas por los trabajadores

sobre los puestos de trabajo, las cuales permiten visualizar la implementación de un modelo de rotación laboral que involucra riesgos ergonómicos generados por la manipulación de carga, la repetitividad de acciones y la adopción de posturas inadecuadas.

Para la recolección y validación de un modelo innovador en rotación laboral considerando de manera simultánea riesgos ergonómicos generadores de trastornos musculo esqueléticos, se abordara la metodología señalada anteriormente, como el conjunto de pasos claves que garantice la adecuada planeación de agendas de rotación sobre el sistema productivo que es caso de estudio.

Generación de Ambiente de Cambio en Esquema de Rotación Laboral: Fundamentar los estudios sobre una planta productora de plásticos, es una ventaja debido a que el ambiente cuenta con una diversidad de puestos de trabajo que compilan un conjunto de operaciones y tareas. Una planta de producción plástica brinda una adecuada interacción de los trabajadores, donde se garantiza que por medio de un sistema de rotación se puede infundir variabilidad y diversidad de los roles que desarrollan los trabajadores. Las personas dentro de la planta cuentan con un nivel de capacitación y formación que les permite interactuar sobre todo los puestos de trabajo, además de contar con un sistema de compensación que contribuye en la adopción de un modelo de rotación laboral. La dinámica de operaciones y actividades desarrolladas se condicionan por las propiedades de la maquinaria, la tecnológica y características de los productos de la planta de producción, donde los ajustes que contribuyan a mejorar el bienestar de los trabajadores son mínimos, es por ello que optar por un sistema de rotación es una alternativa que beneficia las condiciones del trabajo. En el Anexo 2, se esquematiza aspectos claves del sistema de producción.

Determinación de la Demanda Laboral, el Nivel de Exposición, Duración y Frecuencia de Riesgos Ocupacionales: Luego de identificar los puestos de trabajo involucrados con el sistema productivo (Ver Anexo 2), se procede a determinar las condiciones del puesto de trabajo en función de conocer el nivel, exposición, duración y frecuencia de riesgos laborales.

Preliminarmente se identifican los riesgos ocupacionales, que repercuten en factores ergonómicos, por ello se clasifica la fuerza (manipulación de materiales), las acciones y movimientos (repetitividad), y la posiciones que se adoptan (posturas inadecuadas) de acuerdo al nivel de exposición, duración y frecuencia de las tareas. Para el nivel de exposición se clasifica en alto, medio y bajo. En la duración se tipifica en prolongada, extensa y corta. La frecuencia se estima como recurrente, alterna e intermitente.

PERFIL PUESTO DE TRABAJO	Repetitividad			Manipulación de Carga			Postura Forzada		
	Exposición	Duración	Frecuencia	Exposición	Duración	Frecuencia	Exposición	Duración	Frecuencia
Extrusión Principal Polietileno	Bajo	Corto	Intermitente	Bajo	Corto	Intermitente	Bajo	Corto	Alterna
Mezclas de Extrusión Polietileno	Medio	Extenso	Recurrente	Alto	Corto	Recurrente	Alto	Corto	Intermitente
Seguimiento de Extrusión Polietileno	Alto	Corto	Recurrente	Bajo	Corto	Alterna	Medio	Extenso	Intermitente

PERFIL PUESTO DE TRABAJO	Repetitividad			Manipulación de Carga			Postura Forzada		
	Exposición	Duración	Frecuencia	Exposición	Duración	Frecuencia	Exposición	Duración	Frecuencia
Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polietileno	Medio	Extenso	Recurrente	Alto	Prolongado	Recurrente	Bajo	Corto	Intermitente
Conversión Principal Polietileno	Bajo	Corto	Intermitente	Medio	Corto	Intermitente	Bajo	Corto	Alterna
Conversión 1	Alto	Prolongado	Recurrente	Medio	Corto	Alterna	Alto	Prolongado	Intermitente
Conversión 2	Alto	Prolongado	Recurrente	Medio	Corto	Alterna	Alto	Prolongado	Intermitente
Conversión 3	Alto	Prolongado	Recurrente	Medio	Corto	Intermitente	Medio	Extenso	Recurrente
Conversión 4	Alto	Prolongado	Recurrente	Medio	Corto	Intermitente	Medio	Extenso	Recurrente
Conversión 5	Alto	Extenso	Recurrente	Medio	Corto	Alterna	Bajo	Corto	Alterna
Conversión 6	Alto	Extenso	Recurrente	Alto	Corto	Intermitente	Medio	Corto	Intermitente
Auxiliar de Perforación	Medio	Corto	Alterna	Bajo	Corto	Alterna	Medio	Corto	Recurrente
Empaque de conversión 4	Alto	Prolongado	Recurrente	Medio	Corto	Recurrente	Alto	Extenso	Recurrente
Empaque de conversión 6	Alto	Extenso	Recurrente	Alto	Extenso	Recurrente	Medio	Corto	Intermitente
Empaque de conversión 3	Alto	Prolongado	Recurrente	Medio	Extenso	Recurrente	Medio	Extenso	Recurrente
Apoyo de conversión 2	Medio	Extenso	Recurrente	Medio	Prolongado	Recurrente	Alto	Prolongado	Intermitente
Aglutinadora	Alto	Prolongado	Recurrente	Alto	Extenso	Recurrente	Alto	Prolongado	Recurrente
Apoyo de Aglutinadora	Alto	Prolongado	Recurrente	Alto	Extenso	Recurrente	Alto	Corto	Intermitente
Impresión	Alto	Corto	Recurrente	Alto	Corto	Recurrente	Alto	Prolongado	Recurrente
Apoyo de Impresión	Alto	Corto	Recurrente	Alto	Corto	Recurrente	Alto	Corto	Intermitente
Extrusión Principal Polipropileno	Bajo	Corto	Intermitente	Bajo	Corto	Intermitente	Bajo	Corto	Alterna
Mezclas de Extrusión Polipropileno	Medio	Extenso	Recurrente	Alto	Corto	Recurrente	Alto	Corto	Intermitente
Twister de Extrusión Polipropileno	Medio	Corto	Recurrente	Medio	Corto	Recurrente	Medio	Corto	Recurrente
Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polipropileno	Medio	Extenso	Recurrente	Alto	Prolongado	Recurrente	Medio	Corto	Intermitente
Apoyo de Extrusión Polipropileno	Medio	Corto	Recurrente	Alto	Corto	Alterna	Medio	Corto	Alterna
Extrusión Polipropileno Zuncho	Medio	Corto	Recurrente	Medio	Corto	Alterna	Bajo	Corto	Recurrente

Tabla 20. Demanda Laboral del Sistema Productivo.

Del conjunto total de puestos de trabajo del piso de planta se toma la decisión de excluir 4 puestos de trabajo relacionados así: Operador de Aglutinadora, Operador de Apoyo de Aglutinadora, Operador de Impresión y Operador de Apoyo de Impresión.

La exclusión de los operadores de aglutinado corresponde por ser una tarea de un alto riesgo laboral en el cual se necesita un trabajador con un nivel de habilidad y destreza propia de la actividad, a fin de no

poner en riesgo a los demás trabajadores. El operador principal de aglutinado alterna sus actividades con el operador de apoyo, y así lograr disminuir la fatiga y complejidad de este puesto de trabajo. En la evaluación preliminar se observa que ambos puestos poseen para la repetitividad, manipulación de carga y posturas forzadas un nivel alto de riesgo, por ello no es pertinente incluirlos en la planeación de las agendas de rotación.

La exclusión de operador de impresión se relaciona con el alto nivel de especialidad requerida en la actividad, donde este trabajadores es inamovible dada su experiencia y experticia en la impresión de productos plásticos. El operador principal de impresión alterna sus tareas con el operador de apoyo a fin de sobrellevar la carga del área de trabajo. También se evidencia un nivel alto en los riesgos ergonómicos por repetitividad, manipulación de carga y posturas inadecuadas, por ello estas estaciones de trabajo serán omitidas en la planeación de las agendas de rotación.

El Número de Puestos de Trabajo y Trabajadores a Rotar: Luego de identificar aspectos del sistema de producción, tales como puestos de trabajo, estaciones de trabajo, dinámica de producción entre otros, se procede a definir los trabajadores y las estaciones que se ligaran con el diseño de esquema de rotación laboral. De acuerdo con las zonas de producción de la organización, se definen los perfiles de los puestos de trabajo que serán involucrados dentro del modelo de rotación laboral. En el Anexo 2, se especificaron las estaciones de trabajo contenidas en un sistema de producción plástica y al tiempo se señalan la interacción con los perfiles de los puestos de trabajo involucrados en la planta.

Dentro del diseño de esquema de rotación laboral se seleccionaran los siguientes puestos de trabajo:

CANTIDAD	ETIQUETA	PERFIL PUESTO DE TRABAJO
1	A	Operador Extrusión Principal Polietileno
1	B	Operador Mezclas de Extrusión Polietileno
2	C (1C,2C)	Operador de Seguimiento de Extrusión Polietileno
2	D (1D,2D)	Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polietileno
1	E	Operador Conversión Principal Polietileno
2	F (1F,2F)	Operador de Conversión 1
2	G (1G,2G)	Operador de Conversión 2
1	H	Operador de Conversión 3
4	I(1I,2I,3I,4I)	Operador de Conversión 4
2	J (1J,2J)	Operador de Conversión 5
3	K (1K,2K,3K)	Operador de Conversión 6
1	L	Operador Auxiliar de Perforación
1	M	Operador de Empaque de conversión 4
1	N	Operador de Empaque de conversión 6
1	O	Operador de Empaque de conversión 3
1	P	Operador de Apoyo de conversión 2
1	Q	Operador Extrusión Principal Polipropileno
1	R	Operador Mezclas de Extrusión Polipropileno
1	S	Operador de Twister de Extrusión Polipropileno
1	T	Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polipropileno
1	U	Operador de Apoyo de Extrusión Polipropileno
1	V	Operador de Extrusión Polipropileno Zuncho

Tabla 21. Selección de Trabajadores y Puestos de Trabajo a Rotar.

El conjunto de puestos seleccionados para ser inmersos en un sistema de rotación laboral abarcan un total de 32 trabajadores, los cuales representan 22 perfiles de puestos de trabajo. Las estaciones de trabajo seleccionadas en el plan de rotación son aquellos donde se puede infundir variedad en el conjunto de tareas necesarias en la dinámica de la producción, como se señala en la sección anterior.

Dentro de las experiencias de producción los 32 trabajadores se encuentran en la capacidad de cumplir todas las tareas de la planta de producción, debido a que anteriormente han rotado gradualmente con el fin de afianzar sus destrezas y habilidades en cada una de las estaciones de trabajo. La selección garantiza que no se involucren puestos de trabajo con sobreesfuerzos que impidan la adecuada rotación de puestos de trabajo.

Valoración Ergonómica: Los métodos de valoración ergonómica son fundamentales para obtener información de las condiciones laborales, se implementaron los métodos NIOSH, RULA y OCRA (Ver Sección 2.5), como estrategia para evaluar las condiciones de los 32 puestos de trabajo, correspondiente a 22 perfiles laborales. En la determinación de la valoración ergonómica se definieron inspecciones donde se observaron las tareas y operaciones dentro de los puestos de trabajo en ciclos representativos de la gestión organizacional de la planta de producción de plásticos. En la Tabla 22, Tabla 23, y Tabla 24 se evidencian los resultados de implementar las técnicas de valoración ergonómicas.

Ca	ETI	PERFIL PUESTO DE TRABAJO	LC	HM	VM	DM	AM	FM	CM	FM M	PC	RWL	IL
1	A	Operador Extrusión Principal Polietileno	25	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	25,00	0,0
1	B	Operador Mezclas de Extrusión Polietileno	25	1	0,87	0,88	0,86	0,60	1,00	0,35	25	9,73	2,6
2	C	Operador de Seguimiento de Extrusión Polietileno	25	1	0,99	0,87	0,86	0,88	1,00	0,75	25	16,05	1,6
2	D	Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polietileno	25	1	0,90	0,93	1,00	0,92	1,00	0,81	50	19,20	2,6
1	E	Operador Conversión Principal Polietileno	25	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	25,00	0,0
2	F	Operador de Conversión 1	25	1	0,96	0,93	0,86	0,95	0,95	0,85	50	17,20	2,9
2	G	Operador de Conversión 2	25	1	0,96	0,93	0,86	0,95	1,00	0,85	50	18,10	2,8
1	H	Operador de Conversión 3	25	1	0,93	0,91	1,00	0,95	0,90	0,85	50	17,99	2,8
4	I	Operador de Conversión 4	25	1	0,96	1,05	0,86	0,95	0,95	0,85	50	19,27	2,6
2	J	Operador de Conversión 5	25	1	0,87	0,91	0,86	0,95	0,90	0,85	50	14,40	3,5
3	K	Operador de Conversión 6	25	1	0,99	1,05	0,86	0,95	0,90	0,85	50	18,83	2,7
1	L	Operador Auxiliar de Perforación	25	1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	25,00	0,0
1	M	Operador de Empaque de conversión 4	25	1	0,99	0,88	0,86	0,75	0,90	0,75	20	12,58	1,6
1	N	Operador de Empaque de conversión 6	25	1	0,99	0,88	0,86	0,75	0,90	0,75	30	12,58	2,4
1	O	Operador de Empaque de conversión 3	25	1	0,99	0,88	0,86	0,75	0,90	0,75	15	12,58	1,2

Ca	ETI	PERFIL PUESTO DE TRABAJO	LC	HM	VM	DM	AM	FM	CM	FM M	PC	RWL	IL
1	P	Operador de Apoyo de conversión 2	25	1	0,96	0,88	0,86	0,95	1,00	0,85	50	17,17	2,9
1	Q	Operador Extrusión Principal Polipropileno	25	1	0,93	0,91	0,86	0,95	0,90	0,85	50	15,40	3,2
1	R	Operador Mezclas de Extrusión Polipropileno	25	1	0,93	0,91	0,86	0,60	1,00	0,35	25	10,81	2,3
1	S	Operador de Twister de Extrusión Polipropileno	25	1	0,96	0,87	0,86	0,95	0,90	0,85	5,00	15,11	0,3
1	T	Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polipropileno	25	1	0,93	0,87	0,86	0,75	0,90	0,75	20	11,56	1,7
1	U	Operador de Apoyo de Extrusión Polipropileno	25	1	0,93	0,91	0,86	0,95	0,90	0,85	40	15,40	2,6
1	V	Operador de Extrusión Polipropileno Zuncho	25	1	0,93	0,91	0,86	0,85	0,90	0,85	30	13,78	2,2

Tabla 22. Resultados de Método de Valoración Ergonómico NIOSH.

Ca	ETI	PERFIL PUESTO DE TRABAJO	A						B					CALCULO				
			BRAZO	ANTEBRAZO	MUÑECA	GIRO M	ACTIVIDAD	FUERZA	CUELLO	TRONCO	PIERNAS	ACTIVIDAD	FUERZA	Pre C	C	Pre D	D	TOTAL
1	A	Operador Extrusión Principal Polietileno	2	2	2	1	0	1	3	2	1	0	1	3	4	3	4	4
1	B	Operador Mezclas de Extrusión Polietileno	2	2	3	2	0	3	3	3	1	0	1	4	7	4	5	7
2	C	Operador de Seguimiento de Extrusión Polietileno	4	2	3	1	0	0	1	2	1	0	0	4	4	2	2	3
2	D	Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polietileno	3	2	3	2	0	3	3	3	1	0	3	4	7	4	7	7
1	E	Operador Conversión Principal Polietileno	1	1	3	1	0	1	3	1	1	0	0	2	3	3	3	3
2	F	Operador de Conversión 1	2	2	3	1	0	2	3	3	1	0	0	3	5	4	4	5
2	G	Operador de Conversión 2	2	2	3	1	0	2	2	3	1	0	0	3	5	4	4	5
1	H	Operador de Conversión 3	3	2	3	1	0	2	3	3	1	0	3	4	6	4	7	7
4	I	Operador de Conversión 4	3	2	3	2	0	1	3	2	1	0	1	4	5	3	4	5
2	J	Operador de Conversión 5	2	2	3	2	0	1	3	3	1	0	1	4	5	4	5	6
3	K	Operador de Conversión 6	2	1	3	1	0	1	3	4	2	0	1	3	4	6	7	6
1	L	Operador Auxiliar de Perforación	3	2	3	2	0	2	3	3	2	0	2	4	6	5	7	7
1	M	Operador de Empaque de conversión 4	2	2	3	2	0	1	3	4	2	0	1	4	5	7	8	7
1	N	Operador de Empaque de conversión 6	2	1	3	2	0	1	3	4	2	0	1	4	5	7	8	7
1	O	Operador de Empaque de conversión 3	3	1	3	2	0	2	3	3	1	0	3	3	5	4	7	7
1	P	Operador de Apoyo de conversión 2	2	2	3	1	0	2	2	3	1	0	3	3	5	4	7	7

Ca	ETI	PERFIL PUESTO DE TRABAJO	A					B					CALCULO					
			BRAZO	ANTEBRAZO	MUÑECA	GIRO M	ACTIVIDAD	FUERZA	CUELLO	TRONCO	PIERNAS	ACTIVIDAD	FUERZA	Pre C	C	Pre D	D	TOTAL
1	Q	Operador Extrusión Principal Polipropileno	2	2	3	1	0	2	3	3	1	0	0	3	5	4	4	5
1	R	Operador Mezclas de Extrusión Polipropileno	2	2	3	2	0	3	3	3	1	0	3	4	7	4	7	7
1	S	Operador de Twister de Extrusión Polipropileno	2	1	3	1	0	1	3	3	1	0	0	4	5	4	4	5
1	T	Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polipropileno	2	1	3	2	0	2	3	4	2	0	2	4	6	7	9	7
1	U	Operador de Apoyo de Extrusión Polipropileno	2	2	3	1	0	2	3	3	1	0	0	3	5	4	4	5
1	V	Operador de Extrusión Polipropileno Zuncho	2	2	3	1	0	1	3	3	1	0	0	3	4	4	4	4

Tabla 23. Resultados de Método de Valoración Ergonómico RULA.

Ca	ETI	PERFIL PUESTO DE TRABAJO	KJ	FF	FM	PM	RM	AM	TM	RC	M	Nat a	RT A	OCRA
1	A	Operador Extrusión Principal Polietileno	30	10	1	1	1	0,95	1	0,6		80	136,8	0,58
1	B	Operador Mezclas de Extrusión Polietileno	30	20	0,85	0,6	0,7	0,9	1	0,6		160	46,3	3,46
2	C	Operador de Seguimiento de Extrusión Polietileno	30	40	1	0,7	1	0,9	1	0,6		320	90,7	3,53
2	D	Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polietileno	30	15	0,85	0,5	0,7	0,8	1	0,6		120	34,3	3,50
1	E	Operador Conversión Principal Polietileno	30	10	1	0,7	1	0,95	1	0,6		80	95,8	0,84
2	F	Operador de Conversión 1	30	35	1	1	0,7	0,8	1	0,6		280	80,6	3,47
2	G	Operador de Conversión 2	30	35	1	1	0,7	0,8	1	0,6		280	80,6	3,47
1	H	Operador de Conversión 3	30	35	1	0,7	0,7	0,9	1	0,6		280	63,5	4,41
4	I	Operador de Conversión 4	30	35	1	1	0,7	0,8	1	0,6		280	80,6	3,47
2	J	Operador de Conversión 5	30	25	1	0,7	0,7	0,8	1	0,6		200	56,4	3,54
3	K	Operador de Conversión 6	30	35	1	0,7	0,7	0,9	1	0,6		280	63,5	4,41
1	L	Operador Auxiliar de Perforación	30	30	1	0,6	1	0,8	1	0,6		240	69,1	3,47
1	M	Operador de Empaque de conversión 4	30	20	0,85	0,6	0,7	0,9	1	0,6		160	46,3	3,46
1	N	Operador de Empaque de conversión 6	30	20	0,85	0,6	0,7	0,9	1	0,6		160	46,3	3,46
1	O	Operador de Empaque de conversión 3	30	20	0,85	0,6	0,7	0,9	1	0,6		160	46,3	3,46
1	P	Operador de Apoyo de conversión 2	30	35	1	1	0,7	0,8	1	0,6		280	80,6	3,47

Ca	ETI	PERFIL PUESTO DE TRABAJO	KJ	FF	FM	PM	RM	AM	TM	RC	M	Nat ^a	RT	A	OCRA
1	Q	Operador Extrusión Principal Polipropileno	30	10	0,65	0,7	0,7	0,8	1	0,6		80	36,7		2,18
1	R	Operador Mezclas de Extrusión Polipropileno	30	20	1	0,6	1	0,8	1	0,6		160	69,1		2,31
1	S	Operador de Twister de Extrusión Polipropileno	30	18	0,85	0,6	0,7	0,8	1	0,6		144	41,1		3,50
1	T	Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polipropileno	30	20	0,85	0,6	0,7	0,8	1	0,6		160	41,1		3,89
1	U	Operador de Apoyo de Extrusión Polipropileno	30	10	0,65	0,7	0,7	0,8	1	0,6		80	36,7		2,18
1	V	Operador de Extrusión Polipropileno Zuncho	30	35	0,85	1	1	0,9	1	0,6		280	110,2		2,54

Tabla 24. Resultados de Método de Valoración Ergonómico OCRA

Al normalizar la valoración de cada una de los riesgos ergonómicos por manipulación de carga, repetitividad de actividades y posturas forzadas, evaluadas por medio de los métodos NIOSH, RULA y OCRA respectivamente, se puede observar el comportamiento que poseen cada uno de los perfiles de los puestos de trabajo así:

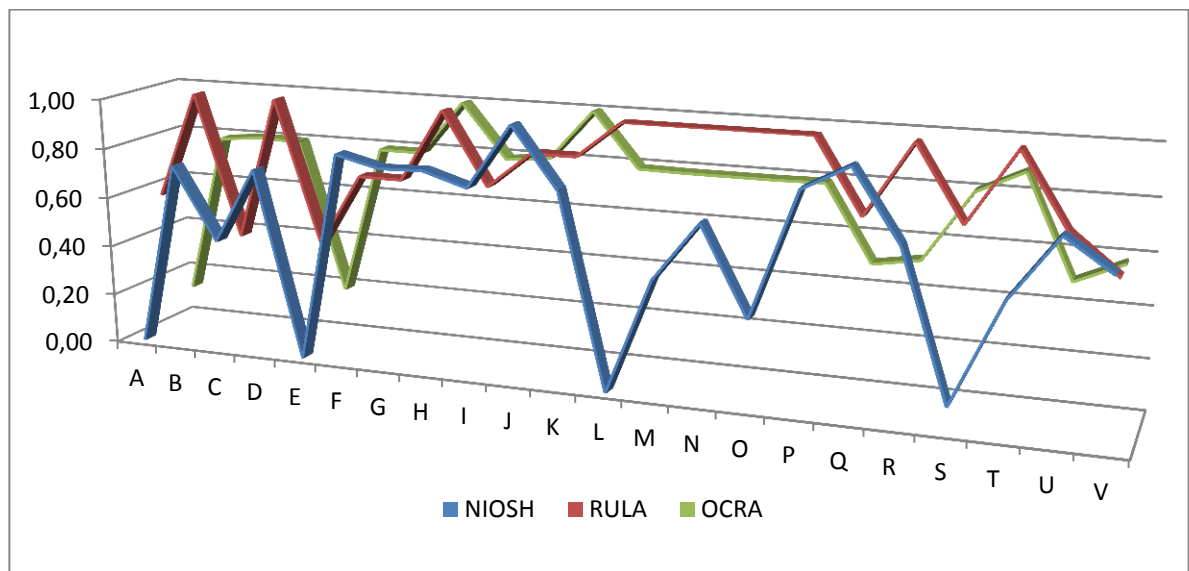


Figura 27. Valoración de Riesgos Ergonómicos por Manipulación de Carga, Repetitividad y Posturas Forzadas.

Las valoraciones ergonómicas son la información clave para considerar la planeación del sistema de rotación laboral, los resultado constataron el diagnostico preliminar adelantado, donde es clara la existencia de una diversidad y variedad de puestos de trabajo. Los resultado de la valoración dan la entrada a los parámetros propios del sistema productivo a fin de modelar el comportamiento en la rotación de puestos de trabajos con el método propuesto que integra simultáneamente riesgos ergonómicos generadores de trastornos musculo esqueléticos como son la manipulación de carga, la repetitividad de tarea y las posturas forzadas e inadecuadas.

Duración de Jornada Laboral y Numero de Periodos de Rotación Laboral (Intervalos): La definición del número de los periodos de rotación y su designación dentro de la jornada laboral es un parámetro que se ajusta al diseño del sistema de rotación laboral y que debe ir de la mano de la gestión organizacional que se evidencia en la planta de producción.

Partiendo de identificar un sistema de producción con variados riesgos ocupacionales (físico, químico, ambiental, ergonómicos entre otros) y las actividades del piso de planta se desarrollan en una jornada continua de 8 horas, donde los trabajadores son los encargados de generar la familia de productos que son requeridos. Se asumió desarrollar los intervalos de rotación cada 2 horas, como periodo estratégico que infunde diversidad y el cual se han constatado en los estudios de Tharmmaphornphilas y Norman (2004) , Jorgensen et al. (2005) y Diego-Mas et al. (2009), además de ser un intervalo propicio en la disminución de la fatiga muscular (Filus y Okimorto, 2012).

Finalmente se decide que los intervalos de rotación se den en periodos de 2 horas para un turno laboral de 8 horas, y así obtener 4 periodos de rotación, donde el segundo intervalo de rotación corresponde a tiempo prolongado de una hora para alimentación, merienda o hidratación.

Perfil de Trabajadores y Puestos de Trabajo (Restricciones y Preferencias): Luego de conocer el perfil laboral de cada uno de los trabajadores (Ver Anexo 2). Se señalan algunas restricciones de la planta de producción para los 22 perfiles laborales y los 32 puestos de trabajos inmersos.

Como caso práctico de una situación muy recurrente en el sistema productivo, se considerara restringir dos trabajadores que fueron incapacidades por obtener un número elevado en pruebas toxicológicas causas por laborar dentro de la Zona de Extrusión, de este modo los trabadores solo podrán laborar en el área de conversión y extrusión de polipropileno. Además, un trabajador está relacionado con una restricción en el exceso de manipulación de carga por recomendación médica, de esta manera solo se asigna en puestos de trabajo donde la valoración NIOSH lo beneficie (<3,5). También se cuenta con un trabajador novato el cual se restringe su acceso en trabajos de mucha pericia como lo es la extrusión de polipropileno y la operación principal en cada una de las zonas y el operador de perforación. En la Tabla 25 se esquema la penalización señaladas anteriormente.

		Penalización																												
Trabajador / Puesto	A	B	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	3	4	1	2	1	2	3	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
29	X	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O	X	X	X	X	X
30	O	X	O	O	X	O	O	X	X	O	O	O	O	O	O	X	X	O	O	O	O	O	O	X	X	X	O	O	O	O
31	X	X	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
32	X	X	X	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

Tabla 25. Relación de Puestos de Trabajo y Posiciones Vetadas.

Modelo para la Rotación Laboral por medio de Algoritmos Genéticos: Luego de recopilar toda la información correspondiente con el sistema productivo, teniendo en cuenta duración de la jornada laboral, los intervalos de rotación, los datos de valoración ergonómica relacionados con la manipulación

de carga, repetitividad de tareas y posturas inadecuadas, las restricciones o limitaciones de los trabajadores.

En resume, la información que configura el Modelo de Rotación Laboral es:

- Parámetros del Algoritmo Genético Multiobjetivo (Ver Sección 5.4)
- Parámetros de Problema en Particular Caso de Aplicación:

Parámetros del Problema	Nomenclatura	Valores
Cantidad de trabajadores y puestos de trabajo	J	32
Cantidad de intervalos de rotación.	T	4
Duración del periodo de rotación k . ($k:4$)	D_k	(2,2,2,2) horas
Duración del periodo de descanso entre rotación t y $t+1$. ($t:2$)	$Dp(t,t+1)$	1 hora
Tamaño del conjunto de individuos no dominados.	$P-ND$	100
Porcentaje de la población en la capa c . ($c:5$)	FP_c	(0.2)
Factor de reducción fatiga RULA.	α	0.33
Nivel de variación de riesgo OCRA entre rotación t y $t+1$.	$Var(t,t+1)$	Tabla 17

Tabla 26. Parámetros de AG, para Rotación Laboral.

- Parámetros de los Método de Valoración:
Información NIOSH (Ver Tabla 22).
Información RULA (Ver Tabla 23).
Información OCRA (Ver Tabla 24).
- Parámetros de las Restricciones y Penalizaciones (Ver Tabla 25).

El Algoritmo Genético Multiobjetivo se configuro y evaluó sobre un equipo Intel Core i5-2430M de 2.40 GHz y 4 GB RAM. Se procede a esquematizar un conjunto de corridas (15 corridas), con el objetivo de darle mayor cobertura a los resultados generados. En la Tabla 27 se representan los resultados obtenidos en las 15 corridas, en relación con los objetivos por manipulación de carga (NIOSH), Repetitividad (OCRA) y Posturas Forzadas (RULA).

No Corrida	Tiempo (Seg)	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA	Domina
1	239	31,6925	3,675989	5,986243	2
2	232	32,6375	3,520054	5,708401	8
3	235	32,9125	3,675989	5,669894	0
4	234	32,9125	3,675837	5,661671	1
5	231	32,6375	3,675989	5,97367	4
6	232	32,6375	3,675837	5,708401	6
7	233	32,4175	3,675989	5,986243	1
8	266	32,6375	3,675989	5,984912	2
9	284	32,6375	3,675989	5,97367	4
10	252	32,6375	3,533623	5,97367	5
11	237	32,6375	3,675837	5,971756	5

No Corrida	Tiempo (Seg)	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA	Domina
12	238	32,6375	3,675989	5,707274	5
13	234	32,6375	3,675989	5,986243	0
14	239	32,6375	3,675989	5,984912	2
15	240	32,4175	3,675989	5,984912	4
Max	284	32,9125	3,675989	5,986243	8
Min	231	31,6925	3,520054	5,661671	0
Promedio	241,733333	32,5818333	3,65607187	5,8841248	3,26666667

Tabla 27. Resultado de Corridas de Algoritmo Genético Multiobjetivo Propuesto.

Los resultados evidenciaron un nivel de homogeneidad dado por una varianza baja en las respuestas de los distintos objetivos. En la ejecución total del escenario de validación fueron necesarios 60,4 minutos aproximadamente, donde cada corrida requirió en promedio 4,02 minutos. Con la finalidad de obtener una corrida representativa se asumió determinar el nivel de dominancia de las respuestas obtenidas, bajo estas condiciones la corrida 2 demostró tener mejor rendimiento dentro de la frontera de Pareto del problema.

5.5.1 Análisis de los Resultados Generados por Algoritmo Genético Multiobjetivo

Se tomarán los resultados generados en la corrida 2 para desencadenar un conjunto de análisis, en la Figura 28 se observa el comportamiento que toma el algoritmo genético en la generación evolutiva de mejores resultados. La gráfica representa los objetivos por manipulación de carga (NIOSH), repetitividad (OCRA) y posturas forzadas de forma normalizada, a fin de evidenciar comparativamente el decrecimiento en los riesgos compartidos en el diseño de un esquema de rotación laboral. Cabe resaltar que el Algoritmo Genético Multiobjetivo posee una estrategia elitista que garantiza la orientación de los objetivos de manera simultánea.

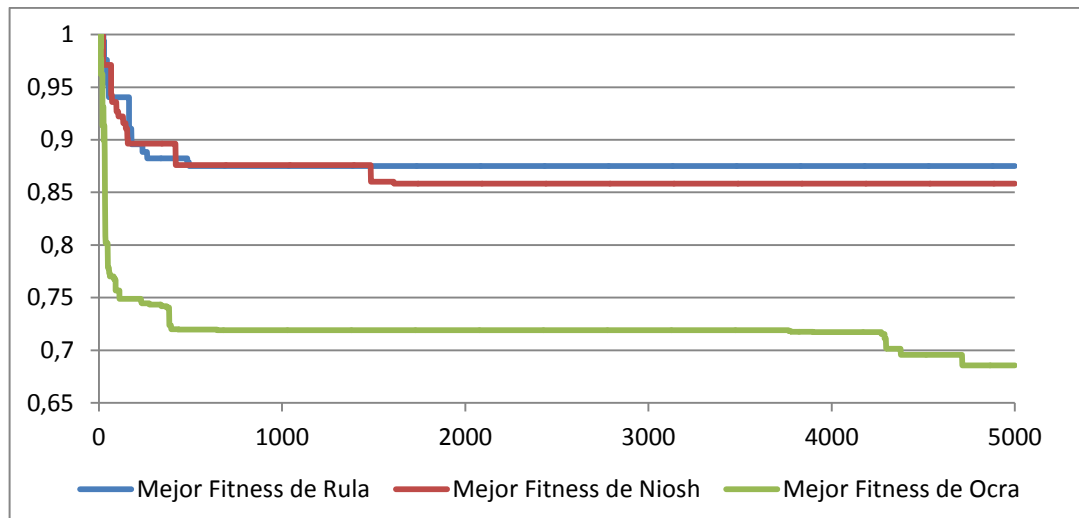


Figura 28. Evolución de los objetivos del Modelo de Rotación Laboral.

En el Algoritmo Genético propuesto se obtienen más de 69 mejoras de aptitud de los objetivos propuestos en el transcurso de su evolución, por tal motivo se encuentra en capacidad de hallar calidad de respuestas en tiempo computacional reducido A continuación se representa el esquema de rotación generado por medio del Algoritmo Genético Multiobjetivo:

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Fitness de Man. Carga	Fitness de Repetividad	Fitness de Postura F.
1	B	4I	1G	2F	3,49	5,47	30,47
2	U	H	2I	S	3,10	5,03	30,47
3	1G	2I	V	2D	2,92	5,64	28,76
4	2K	U	2J	1J	2,95	4,57	31,45
5	2J	1J	Q	O	3,50	4,27	32,64
6	L	A	S	3K	2,82	3,40	30,23
7	S	2F	M	2I	3,10	5,47	30,25
8	N	2K	E	L	2,92	3,27	31,53
9	H	1K	U	1F	3,23	4,77	31,80
10	M	E	H	1K	3,10	3,97	31,34
11	3I	Q	1J	2J	3,44	4,30	30,12
12	P	3I	1F	N	3,20	5,47	32,64
13	E	1D	2D	4I	2,78	4,45	30,25
14	T	2C	2K	A	2,80	5,53	27,95
15	R	M	1C	1G	3,47	5,71	30,69
16	2F	O	R	2C	3,52	5,71	30,75
17	1K	1C	L	U	2,89	5,54	28,92
18	2D	3K	A	2K	2,96	3,55	31,67
19	4I	B	3I	P	3,49	5,47	32,64
20	2C	T	O	Q	3,50	5,35	30,25
21	2G	V	P	T	3,18	5,70	31,09
22	1C	N	B	3I	3,49	5,49	30,25
23	Q	S	1K	1I	3,46	5,53	29,03
24	1F	L	4I	M	3,08	5,47	32,64
25	1J	2J	1D	E	2,78	5,47	30,75
26	1I	P	T	V	3,08	5,70	31,83
27	A	2D	3K	H	3,10	5,55	32,53
28	V	1F	N	1C	3,19	5,67	26,76
29	1D	2G	2C	R	3,52	5,70	30,20
30	O	1G	1I	B	3,49	5,47	32,64
31	2I	R	2G	1D	3,14	5,67	32,64
32	3K	1I	2F	2G	3,24	5,67	29,14
Máximo Aptitud					3,52	5,71	32,64
Mínima Aptitud					2,78	3,27	26,76
Promedio					3,18	5,13	30,76
Desviación					0,25	0,74	1,48

Tabla 28. Esquema y Resultados del Modelo de Rotación Laboral.

El esquema representado hace referencia al puesto de trabajo donde deberá el trabajador alternar sus tareas y operaciones. Los resultados demuestran la capacidad del Algoritmo Genético Multiobjetivo de respetar y acondicionarse a los requerimientos del sistema productivo (restricciones y limitaciones), cumpliendo con las condiciones planteadas. La agenda de rotación no posee ninguna repetición por parte de los trabajadores en la misma estación de trabajo durante la jornada laboral, solo en los casos donde existen puestos que representan el mismo perfil laboral, pero que son desarrollados en diferentes estaciones.

En el anexo 8 se incluye la relación de las agendas de rotación con cada una de las etiquetas que relacionan el perfil del puesto de trabajo. De acuerdo como se señaló en los supuestos del problema, el ambiente de rotación laboral requiere que se generen un entorno de supervisión e inspección que contribuya a la adecuada implementación de la agenda de rotación, es por ello que se recomienda establecer una propuesta de comunicación al inicio de la jornada laboral que permita que cada trabajador conozca su asignación en cada una de las rotaciones.

En la planeación del algoritmo genético, las funciones de evaluación de cada uno de los objetivos fueron manejadas por medio de técnicas puntuales de valoración ergonómicas, las cuales se complementaron con cálculos de variabilidad o varianza en la secuencia de las tareas de la rotación laboral, de esta forma los cálculos de fitness de las tareas asignadas a los trabajadores son estimuladas o reflejan por las rotaciones que las anteceden o preceden.

La Tabla 29 muestra el comportamiento en el nivel de riesgo de los trabajadores para las asignaciones de los trabajadores en cada uno de los objetivos. Los resultados demuestran que los trabajadores pueden obtener variabilidad y diversidad en el desarrollo de las jornadas laborales, donde ningún trabajador estará expuesto de modo simultáneo a riesgos elevados. Solo 3 trabajadores se encuentran en un nivel moderado alto por manipulación de carga, 5 trabajadores están en nivel medio alto por repetitividad, mientras que el riesgo postural es medio para todo los trabajadores. En cada uno de los objetivos siempre que se presentan riesgos elevados en los esquemas de rotación, van acompañados por una rotación donde el riesgo disminuye. Dentro del esquema de rotación laboral se evidencia que ningún trabajador es expuesto de manera simultánea en los umbrales elevados de riesgo ergonómicos.

TRABAJADOR	Manipulación de Carga					Repetitividad					Postura Forzada				
	R1	R2	R3	R4	SLI	R1	R2	R3	R4	OCRA	R1	R2	R3	R4	PRO
1	2,6	2,6	2,8	2,9	3,49	3,46	3,47	3,47	3,47	3,47	7	5	5	5	5,50
2	2,6	2,8	2,6	0,3	3,10	2,18	4,41	3,47	3,50	3,53	5	7	5	5	5,50
3	2,8	2,6	2,2	2,6	2,92	3,47	3,47	2,54	3,50	3,14	5	5	4	7	5,25
4	2,7	2,6	3,5	3,5	2,95	4,41	2,18	3,54	3,54	3,57	6	5	6	6	5,75
5	3,5	3,5	3,2	1,2	3,50	3,54	3,54	2,18	3,46	3,27	6	6	5	7	6,00
6	0,0	0,0	0,3	2,7	2,82	3,47	0,58	3,50	4,41	2,40	7	4	5	6	5,50
7	0,3	2,9	1,6	2,6	3,10	3,50	3,47	3,46	3,47	3,47	5	5	7	5	5,50
8	2,4	2,7	0,0	0,0	2,92	3,46	4,41	0,84	3,47	2,77	7	6	3	7	5,75
9	2,8	2,7	2,6	2,9	3,23	4,41	4,41	2,18	3,47	3,77	7	6	5	5	5,75

TRABAJADOR	Manipulación de Carga					Repetitividad					Postura Forzada				
	R1	R2	R3	R4	SLI	R1	R2	R3	R4	OCRA	R1	R2	R3	R4	PRO
10	1,6	0,0	2,8	2,7	3,10	3,46	0,84	4,41	4,41	2,97	7	3	7	6	5,75
11	2,6	3,2	3,5	3,5	3,44	3,47	2,18	3,54	3,54	3,30	5	5	6	6	5,50
12	2,9	2,6	2,9	2,4	3,20	3,47	3,47	3,47	3,46	3,47	7	5	5	7	6,00
13	0,0	2,6	2,6	2,6	2,78	0,84	3,50	3,50	3,47	2,45	3	7	7	5	5,50
14	1,7	1,6	2,7	0,0	2,80	3,89	3,53	4,41	0,58	2,53	7	3	6	4	5,00
15	2,3	1,6	1,6	2,8	3,47	2,31	3,46	3,53	3,47	3,21	7	7	3	5	5,50
16	2,9	1,2	2,3	1,6	3,52	3,47	3,46	2,31	3,53	3,21	5	7	7	3	5,50
17	2,7	1,6	0,0	2,6	2,89	4,41	3,53	3,47	2,18	3,54	6	3	7	5	5,25
18	2,6	2,7	0,0	2,7	2,96	3,50	4,41	0,58	4,41	2,55	7	6	4	6	5,75
19	2,6	2,6	2,6	2,9	3,49	3,47	3,46	3,47	3,47	3,47	5	7	5	7	6,00
20	1,6	1,7	1,2	3,2	3,50	3,53	3,89	3,46	2,18	3,35	3	7	7	5	5,50
21	2,8	2,2	2,9	1,7	3,18	3,47	2,54	3,47	3,89	3,20	5	4	7	7	5,75
22	1,6	2,4	2,6	2,6	3,49	3,53	3,46	3,46	3,47	3,49	3	7	7	5	5,50
23	3,2	0,3	2,7	2,6	3,46	2,18	3,50	4,41	3,47	3,53	5	5	6	5	5,25
24	2,9	0,0	2,6	1,6	3,08	3,47	3,47	3,47	3,46	3,47	5	7	5	7	6,00
25	3,5	3,5	2,6	0,0	2,78	3,54	3,54	3,50	0,84	2,47	6	6	7	3	5,50
26	2,6	2,9	1,7	2,2	3,08	3,47	3,47	3,89	2,54	3,20	5	7	7	4	5,75
27	0,0	2,6	2,7	2,8	3,10	0,58	3,50	4,41	4,41	2,55	4	7	6	7	6,00
28	2,2	2,9	2,4	1,6	3,19	2,54	3,47	3,46	3,53	3,17	4	5	7	3	4,75
29	2,6	2,8	1,6	2,3	3,52	3,50	3,47	3,53	2,31	3,20	7	5	3	7	5,50
30	1,2	2,8	2,6	2,6	3,49	3,46	3,47	3,47	3,46	3,47	7	5	5	7	6,00
31	2,6	2,3	2,8	2,6	3,14	3,47	2,31	3,47	3,50	3,17	5	7	5	7	6,00
32	2,7	2,6	2,9	2,8	3,24	4,41	3,47	3,47	3,47	3,67	6	5	5	5	5,25

Tabla 29. Resultados Discriminado por Objetivos del Modelo de Rotación.

Es importante resaltar que cuando se estipula un nivel de riesgo NIOSH por medio de cálculo secuencial de tareas (SLI), el nivel de riesgo no guarda las mismas proporciones que el indicador IL, es por ello que se asume un nivel de riesgo de 3,5 como moderado alto (Waters et al., 2007). Por otra parte, el método OCRA un índice de 3,5 se asume como un riesgo medio alto. Finalmente, el método RULA con un índice de 7 señala un riesgo elevado.

De acuerdo con los resultados generados desde el diagnóstico del sistema productivo, se puede inferir que el ambiente de planta y su dinámica posee una demanda elevada en los riesgos ergonómicos que se han considerado generadores de trastornos musculo esqueléticos, de esa misma manera la agendas de rotación laboral generadas en función de la información recolectada, mejorando las condiciones del 69% de los trabajadores.

En la Figura 29, Figura 30 y Figura 31, se observa el contraste de implementar un modelo de rotación laboral que considere simultáneamente los riesgos ergonómicos y el esquema actual del sistema de

producción. En el Anexo 7 se complementa la información resultante de la validación del Sistema de Rotación laboral, donde se esquematizan los datos arrojados por la herramienta programática que soporta el diseño de modelo multiobjetivo donde se revelan que aproximadamente se exploraron el 0.0001% de posibilidades de programación de agendas de rotación que posee el problema.

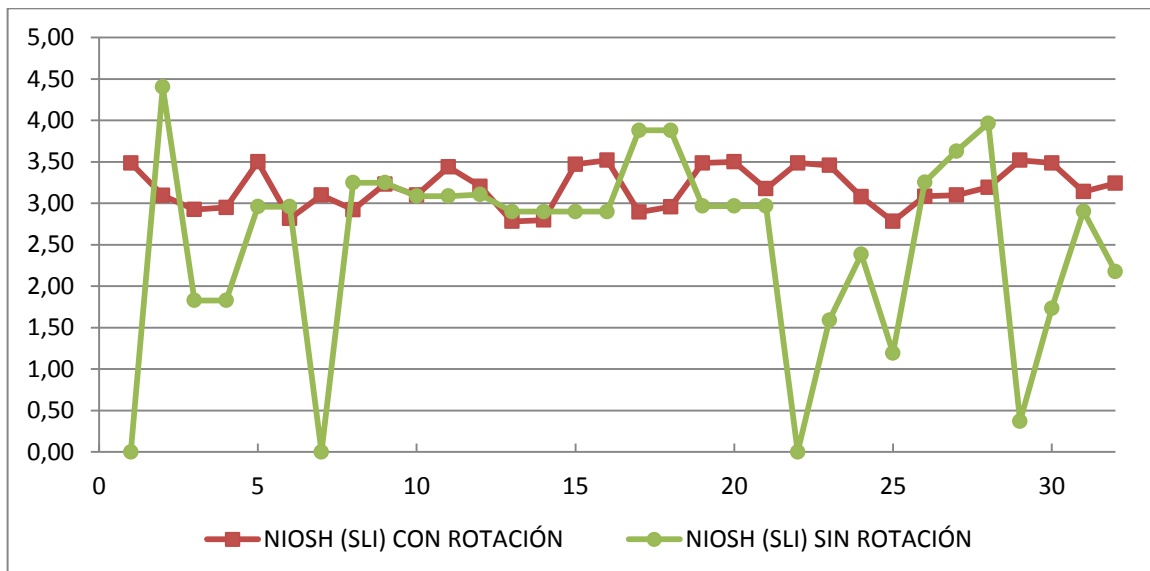


Figura 29. Contraste de Riesgo por Manipulación de Carga, con y sin Rotación Laboral.

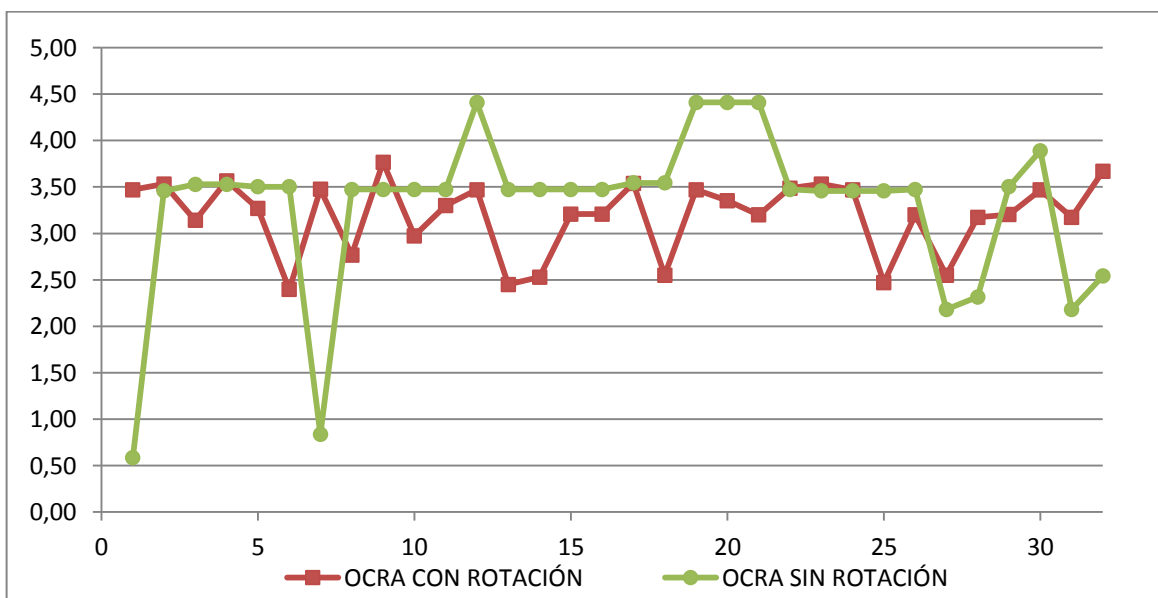


Figura 30. Contraste de Riesgo por Repetividad de Operaciones, con y sin Rotación Laboral.

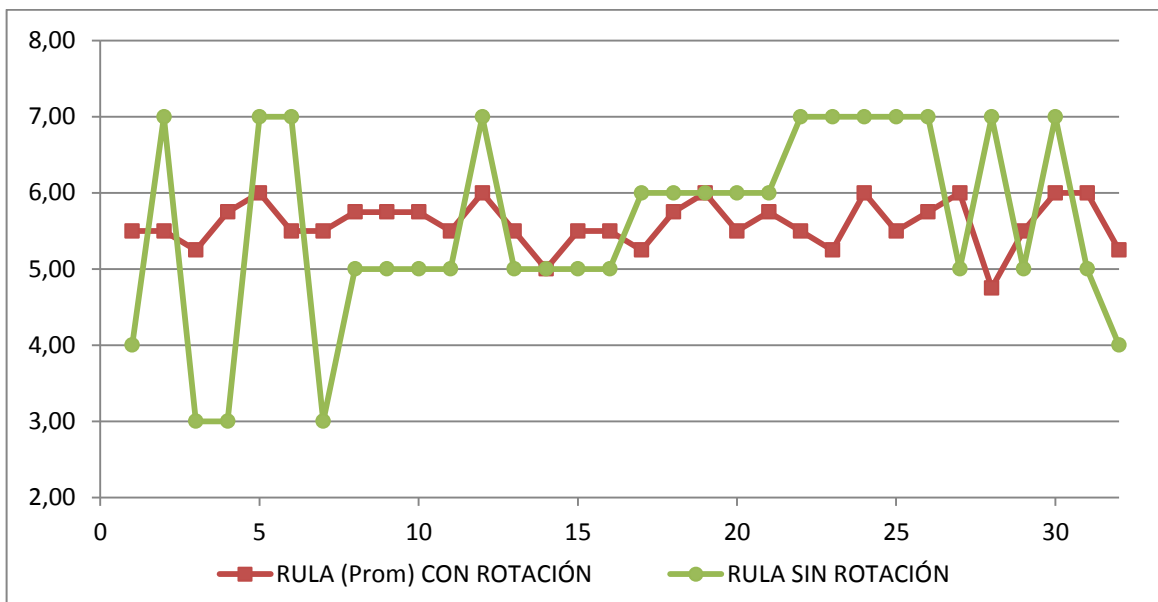


Figura 31. Contraste de Riesgo por Posturas Forzadas, con y sin Rotación Laboral.

Las comparaciones del sistema actual y los cambios que se presentan al introducir un sistema de rotación indican que la rotación nivela la carga de trabajo de los empleados, permitiendo que no existan estaciones o puestos de trabajos con pico o valles que beneficie o perjudique a distintos trabajadores, sino por el contrario los trabajadores puedan realizar diversas tareas en un margen de riesgo controlado, donde se evita la monotonía, se desarrollan habilidades y se minimiza el máximo riesgo percibido, lo que garantiza la optimización del bienestar de los trabajadores.

El algoritmo genético demostró su virtud de considerar restricciones o limitaciones propias de los sistemas productivos, además de ser una opción a la hora de configurar un sistema de rotación que beneficie las preferencias y limitaciones propias de los trabajadores. Considerar información de restricciones en la asignación de las estaciones de trabajo no se constituyó en una limitante u obstrucción del modelo de rotación multiobjetivo. Se desarrollaron 10 corridas experimentales del Algoritmo Genético Multiobjetivo donde se censuraron las restricciones de asignación, y los resultados demostraron que considerar las limitantes del sistema productivo no impactan en la calidad de respuestas que se puedan generar. Inclusive los resultados son significativamente equivalentes (Ver Anexo 4).

Finalmente, se considera que el desarrollo del Algoritmo Genético Multiobjetivo es un recurso propicio para la planeación de un sistema de rotación laboral que toma en consideración riesgos ergonómicos generadores de trastornos musculo esqueléticos. Su implementación permite la obtención de respuestas favorables dentro del sistema productivo en bajo tiempo computacional, balanceando la carga laboral de cada uno de los trabajadores a su paso por las estaciones de trabajo y respetando las restricciones propias del problema. En el diseño del esquema de rotación laboral se minimiza el máximo riesgo percibido por manipulación de carga, repetitividad y posturas forzadas de manera simultánea.

5.5.2 Análisis de los Resultados Comparativos

Debido al carácter innovador de realizar un modelo de rotación laboral multiobjetivo implementado a través de algoritmo genético bajo un contexto ergonómico, se procedió a contrastar los resultados obtenidos cuando se optimiza simultáneamente los objetivos de manipulación de carga, repetitividad y posturas forzadas, y cuando se optimizan cada uno de los objetivos individualmente, haciendo uso de algoritmos genéticos y modelos de programación lineal entera.

En la implementación de resultados para cada uno de los objetivos individuales se produjeron algoritmos genéticos que guardan los mismos patrones y parámetros del Algoritmo Genético Multiobjetivo desarrollado. Los resultados de las corridas (10) del algoritmo genético ejecutados de forma mono-objetivo se encuentran en el Anexo 3.

Para la programación lineal entera se construyeron los modelos que representan cada uno de los objetivos que se generaron en previamente (Ver Sección 3.6), y así darles linealidad para su ejecución. La programación lineal entera se ejecuto por medio del software de optimización GAMS, bajo un con equipo Intel Core i5-2430M de 2.40 GHz y 4 GB RAM. La estructura de los modelos en GAMS se halla en el Anexo 5.

En la Tabla 30 se representan los resultados de cada uno de los experimentos, donde el experimento 1 pertenece al modelo multiobjetivo propuesto, los experimentos 2, 3 y 4 corresponde al algoritmo genéticos mono-objetivos, y los experimentos 5, 6 y 7 pertenecen a los modelos mono-objetivo por medio de programación lineal entera.

Experimento	Objetivo	Solución	Tiempo (Seg)	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA	Riesgo RULA
1	Multiobjetivo	AGOMO	232	3,52	5,708	32,638
2	NIOSH	AG	242	3,487	7,716	39,738
3	OCRA	AG	230	4,312	5,724	37,298
4	RULA	AG	231	4,242	8,968	32,418
5	NIOSH	PE	996,55	3,818	9,409	36,655
6	OCRA	PE	996,38	4,103	8,08	35,078
7	RULA	PE	996,46	4,295	7,73	37,738

Tabla 30. Resultado de Experimentos de Validación de Efectividad de Modelos de Rotación Laboral.

Los resultados de los experimentos evidenciaron una desventaja en calidad de respuesta y tiempo computacional de los modelos de programación lineal entera, donde se hallan una cota mínimas después de 16 minutos aproximadamente de procesamiento. Los resultados no superan los datos obtenidos al implementar los algoritmos genéticos mono-objetivos. Las respuesta obtenidas de los objetivos de manera independiente son buenas si solo se deseara optimizar este, pero al contrastar su impacto en los demás índices ergonómicos, se podría concluir que se mejora un riesgo despreciando su impacto en los demás. Los resultados obtenidos por medio de la metodología propuesta demuestran que se pueden mejorar los objetivos de simultáneamente y al tiempo ser significativamente similares a optimizar los objetivos independientemente. En la Figura 32 se representa el nivel de impacto del esquema

multiobjetivo frente a optimizar de forma independiente los riesgos ergonómicos, con los datos normalizados.

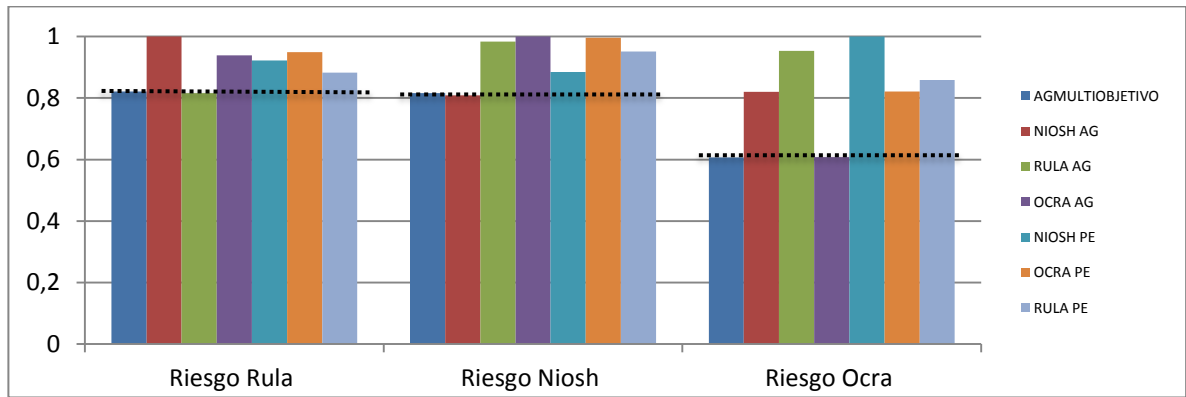


Figura 32. Contraste de Experimentos de Validación de Modelos de Rotación Laboral.

En los Anexos 3 se esquematizan los resultados puntuales de optimizar independientemente los riesgo por manipulación de carga, repetitividad y posturas forzadas, con su cuantificación con cada una los métodos ergonómicos NIOSH, OCRA, y RULA, y los resultados demuestran que al mejorar uno de los objetivos se entra en conflicto automáticamente con el nivel de riesgo percibido por los trabajadores en los demás riesgos.

A continuación se relacionan los resultados de optimizar los objetivos de manera independiente desarrollados con el algoritmo genético (Ver Tabla 31), como técnica que arroja mejores resultados que las implementadas por la programación lineal entera.

Experimento	Objetivo	Solución	Trabajadores Involucrados		
			Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA	Riesgo RULA
1	Multiobjetivo	AGOMO	4	6	0
2	NIOSH	AG	0	14	1
3	OCRA	AG	12	6	0
4	RULA	AG	12	10	0

Tabla 31. Comparación de Trabajadores con Alto Nivel de Riesgos Ergonómicos.

Cuando se optimiza la manipulación de carga con el uso del método NIOSH, todos los trabajadores en el esquema son beneficiados encontrándose en rangos tolerables que no los ponen en riesgo, mientras que en la cuantificación de los riesgos por repetitividad de operaciones se perjudica a 14 trabajadores, y por parte de los riesgos posturales se involucran a 1 trabajador en umbrales de riesgos alto. Al optimizar la repetitividad de operaciones se beneficia a 26 trabajadores donde el umbral máximo es 3,72, mientras que por parte de los riesgos por manipulación de carga se perjudica a 12 trabajadores y por riesgos posturales no se impactan trabajadores. Finalmente, al optimizar independiente los riesgos posturales todos los trabajadores se benefician en un umbral admisible, mientras que los riesgos por manipulación de carga impactan a 12 trabajadores y en los riesgos por repetitividad de operaciones se perjudica a 10 trabajadores.

CONCLUSIONES

El diseño del modelo que integra aspectos ergonómicos como la manipulación de carga, la repetitividad de tareas y las posturas forzadas, es una innovación en esquemas para la planeación y programación de la rotación laboral desde un enfoque multiobjetivo que evitan la generación de trastornos musculo esqueléticos.

Un análisis detallado del estado del arte del problema permitió identificar que la aplicación de Algoritmos Genéticos en la solución del problema de rotación de puestos de trabajo ha sido estudiados para problemas con un solo factor de riesgo laboral, pero aun no es aplicado para un problema multiobjetivo donde es necesario valorar varios factores de riesgo laborales (ergonómicos) simultáneamente y así minimizar el riesgo de padecer dolencias o afecciones musculo esqueléticas. Dentro de la propuesta se especifican los aspectos, pasos claves y metodológicos que contribuyen a la correcta planeación e implementación del modelo de rotación laboral en las organizaciones.

Una adecuada estudio y depuración de los métodos de valoración ergonómicos relacionados con el problema permitieron estructurar adecuadamente el modelo de rotación laboral propuesto, en función de las necesidades de minimizar los riesgos laborales, y al tiempo conocer los parámetros del sistema productivo que permitían su identificación. Las técnicas de valoración como NIOSH, OCRA y RULA son coherentes en la cuantificación de los niveles de riesgos, reflejando las condiciones reales que experimentan los trabajadores.

El modelo de rotación laboral se diseño de forma independiente en cada uno de los objetivos relacionados con el problema, donde se minimizar el máximo riesgo percibido, y además se considero la acumulación de fatiga y sobreesfuerzos, así como las variaciones en los niveles de riesgo a las cuales son expuestos los trabajadores en las rotaciones. De esta manera, en el diseño del sistema de rotación se consideran la trazabilidad de las estaciones de trabajo donde el trabajador será asignado. El modelo multiobjetivo construido se enriquece de cada uno de los modelos de forma independiente y es fundamental para la creación del algoritmo genético multiobjetivo propuesto.

El Algoritmo Genético propuesto se proyecto inicialmente como un algoritmo multiobjetivo evolutivo estándar, donde se regía por la generación iterativa del conjunto de soluciones dominantes, hasta llegar al diseño de un algoritmo genético de segunda generación de tipo NSGA (Algoritmos Genético por Clasificación no dominados- (Srinivas y Deb, 1994)) enriquecido por aspectos del NSGAI (Deb et al., 2002), donde se evitaba la convergencia prematura de la frontera de Pareto en respuestas de baja calidad, al tiempo que se orientaba el algoritmo bajo la estrategia elitista y operadores cerrados que evitaban la creación de individuos infactibles, sin caer en errores por la segmentación de la calidad de los individuos de acuerdo a su densidad dentro del conjunto de respuestas dentro de la población. Lo cual demostró que el Algoritmo Genético multiobjetivo desarrollado responde a las necesidades de un problema nuevo de forma integral.

Desde la perspectiva del Algoritmo Genético creado en el problema de rotación laboral bajo una concepción multiobjetivo, se evidencio la potencialidad de la metaheurísticas de generar un conjunto de respuesta con calidad (Frontera de Pareto), en un problema de optimización de una alta complejidad como quedo demostrado, en tiempo computacional eficiente. Un aspecto importante del Algoritmo Genético desarrollado, esta dado por la robustez que presento en la fase experimental dentro de los parámetros propios de configuración, lo cual demuestra su fácil aplicación y orientación en la obtención de las mejores respuestas para el problema.

La herramienta applicativa sobre la cual se implemento el diseño del modelo de rotación laboral es totalmente parametrizable a las necesidades de los sistemas productivos, donde se puede variar la información de acuerdo a las características propias de los procesos y las actividades dentro del piso de la planta. Además la herramienta permite la creación de un conjunto de respuestas para el problema y evidencia los planes de rotación factibles para el sistema productivo estudiado. Los resultados obtenidos en el caso de estudio permiten resaltar la capacidad de la metodología propuesta en la creación de planes de rotación laboral, integrando aspectos como los trabajadores y puestos de trabajo, las valoraciones ergonómicas de los puestos de trabajo, la planificación de los intervalos de rotación y las jornadas laborarles.

Dentro del caso de validación propuesto, se logra obtener soluciones que infunde diversidad y variabilidad en las actividades que desarrollan los trabajadores, de esta forma se evita las exposiciones prolongadas en riesgos ergonómicos generadores de trastornos musculo esqueléticas. Es importan resaltar que los umbrales de riesgo máximos percibidos dependerán del sistema productivo, donde se requiere información veras y representativa de los procesos evaluados, y así poder influir significativamente sobre el bienestar de los trabajadores. De otra manera, un mal diseño y planeación en la asignación y secuenciación, puede traer en cambio de beneficios, perjuicios sobre la salud de los empleados inmersos en el sistema de rotación laboral.

La implementación de rotación de laboral bajo un esquema multiobjetivo permite considerar aspectos restrictivos dentro del sistema productivo por parte de los trabajadores tales como limitaciones, preferencias, e inclusive falta de competencias, como quedo demostrado en caso de estudio, el cual no representa una perdida en la calidad de respuestas para el diseño de la agenda de rotación laboral.

En las organizaciones siempre existirán cambios, como lo pueden ser variaciones en los niveles de producción, los cuales impactan y generan modificaciones en la fuerza y carga laboral. Debido a que la metodología propuesta es flexible y practica en su aplicación, es posible asumir cargas de trabajo y riesgos deterministas que representen significativamente la demanda máxima a los cuales son expuestos los trabajadores en cada puesto de trabajo. De esta forma se podrá reprogramar el sistema de rotación propuesto cada vez que se modifiquen las actividades de producción, buscando la minimización del máximo riesgo percibido y no la búsqueda de niveles de riesgos promedios.

Tomando en cuenta el carácter innovador de la propuesta de rotación laboral multiobjetivo involucrando riesgos ergonómicos, se validó la optimización de cada uno de los objetivos de manera independiente, para ello se diseñaron algoritmos genéticos para cada uno de los casos y al tiempo se contrataron con los modelos de programación entera planteados, los resultados demostraron la capacidad del Algoritmo Genético Multiobjetivo Propuesto para optimizar de forma simultánea los riesgos por manipulación de carga, repetitividad de tareas y posturas forzadas.

La rotación de puestos de trabajo ofrece mejoras en la parte motivacional de los trabajadores, ya que lo enfrenta a nuevos retos, disminuyendo la monotonía, el estrés y el aburrimiento dentro de los puestos de trabajo. Por otra parte, se presenta como una estrategia de aprendizaje, que permite ampliar las habilidades y destreza de los trabajadores en las estaciones de trabajo a los que se ven enfrentados, y ayuda a mejorar el ambiente organizacional. Si es practicada correctamente la rotación de tareas, traerá consigo mayor productividad, mayor calidad, menor absentismo y menor riesgo de contraer enfermedades laborales relacionadas con trastornos musculo esqueléticos generados por sobrecarga de trabajo en una sola área del cuerpo. La efectividad de implementar la rotación laboral está dada en el mediano y largo plazo, por medio de cifras como el nivel de absentismo, lesiones, accidentes e incidentes, enfermedades laborales, niveles de productividad entre otros aspectos.

Finalmente, se ha cumplido el objetivo principal de esta investigación, donde el diseño de un modelo de rotación laboral contribuye a para afrontar de forma simultánea riesgos ergonómicos generadores de trastornos musculo esquelético, ayudando a que las actividades laborales estén condicionadas a las habilidades, capacidades físicas y mentales del ser humano, de modo que el hombre sea el eje central y vital de cualquier sistema productivo.

TRABAJOS FUTUROS

La metodología propuesta fue validada en un caso de un sistema productivo, donde permitió la adecuada planeación del sistema de rotación en los riesgos ergonómicos estudiados. Pero se hace necesario un estudio continuo sobre el tiempo que garantice la contribución del diseño del modelo de rotación, en aspectos como la salud, la productividad y otros aspectos motivacionales de los trabajadores.

De acuerdo con el algoritmo genético diseñado, se podrá explorar en materia la implementación de estrategias multiobjetivo como lo son Algoritmo Genético por Nichos de Pareto (NPGA) o Los Algoritmos Evolutivos de Intensidad de Pareto (SPEA).

Para la rotación laboral se considerara el uso de otras metaheurísticas, como el recocido simulado, el cual ha evidenciado un buen rendimiento en este tipo de problemas.

Dentro de la metodología propuesta se puede incluir el uso de diferentes métodos de valoración ergonómica, e inclusive integrarlos en conjunto con otros tipos de riesgos laborales (riesgos físicos).

En la planeación de agendas de rotación de puestos de trabajo, se podrá trabajar en la clusterización de información, tipo Redes Neuronales para la predicción de puestos de trabajo sin la necesidad de ejecutar la aplicación de los algoritmos genéticos.

Desarrollar simulaciones en entornos dinámicos que representen la realidad de los sistemas productivos, y así replicar la efectividad de las agendas de rotación laboral.

Finalizar la implementación del Método E-Restrictor respaldado por la programación entera propuesta, con el objetivo de contrastar la generación de agendas a través de una nueva estrategia, la cual no ha sido estudiada.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

- Allwood, J. M. y W. L. Lee (2004). "The impact of job rotation on problem solving skills." International Journal of Production Research **42**(5): 865-881.
- Aptel, M., A. Aublet-Cuvelier, et al. (2002). "Work-related musculoskeletal disorders of the upper limb." Joint Bone Spine **69**(6): 546-555.
- Aptel, M., F. Cail, et al. (2008). "Proposal of parameters to implement a workstation rotation system to protect against MSDs." International Journal of Industrial Ergonomics **38**(11-12): 900-909.
- Arya, A. (2004). "Using Job Rotation to Extract Employee Information." Journal of Law, Economics, and Organization **20**(2): 400-414.
- Aryanezhad, M., A. Kheirkhah, et al. (2009). "Designing safe job rotation schedules based upon workers' skills." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **41**(1): 193-199.
- Asawarungsaengkul, K. y S. Nanthavanij (2008). "Heuristic Genetic algoritms for workforce scheduling with minimum total worker." International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice **15**(4): 373-385.
- Asawarungsaengkul, K. y S. Nanthavanij (2008). "Optimization approach to hazard prevention budgeting problem." International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice **15**(4): 330-340.
- Asensio-Cuesta, S., J. Diego-Mas, et al. (2011). "A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology: 1-14.
- Asensio-Cuesta, S., J. Diego-Mas, et al. (2010). "La rotación de puestos de trabajo como medio para la integración de trabajadores con discapacidad." DYNA Ingeniería e Industria **86**(3): 350-360.
- Asensio-Cuesta, S., J. A. Diego-Mas, et al. (2012). "A method to design job rotation schedules to prevent work-related musculoskeletal disorders in repetitive work." International Journal of Production Research: 1-12.
- Ayough, A., M. Zandieh, et al. (2012). "GA and ICA approaches to job rotation scheduling problem: considering employee's boredom." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **60**(5): 651-666.
- Azizi, N., S. Zolfaghari, et al. (2010). "Modeling job rotation in manufacturing systems: The study of employee's boredom and skill variations." International Journal of Production Economics **123**(1): 69-85.
- Bernard, B. (1997). "Musculoskeletal disorders and workplace factors: A critical review of epidemiological evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back." Cincinnati, Ohio. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH).
- Bhadury, J. y Z. Radovilsky (2006). "Job rotation using the multi-period assignment model." International Journal of Production Research **44**(20): 4431-4444.
- Brunold, J. y S. Durst (2012). "Intellectual capital risks and job rotation." Journal of Intellectual Capital **13**(2): 178-195.
- Burdorf, A. y A. van der Beek (1999). "Exposure assessment strategies for work-related risk factors for musculoskeletal disorders." Scandinavian journal of work, environment & health **24**(4): 25-30.
- Bureau_of_Labor_Statistics (2011, November 9). "Nonfatal occupational injuries and illnesses requiring days away from work, 2010. ." Bureau of Labor Statistics.
- Campion, M. A., L. Cheraskin, et al. (1994). "Career-Related Antecedents and Outcomes of Job Rotation." Academy of Management Journal **37**: 1518-1542.
- Carnahan, B. J. y M. S. Redfern (1998). "Application of genetic algorithms to the design of lifting tasks." International Journal of Industrial Ergonomics **21**(2): 145-158.

- Carnahan, B. J., M. S. Redfern, et al. (2000). "Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search." Ergonomics **43**(4): 543-560.
- Carnahan, B. J., M. S. Redfern, et al. (1999). A genetic algorithm for designing job rotation schedules considering ergonomic constraints. Evolutionary Computation, 1999. CEC 99. Proceedings of the 1999 Congress on.
- Colombini, D., E. Occhipinti, et al. (2002). 12. A check-list model for the quick evaluation of risk exposure (ocra index). Elsevier Ergonomics Book Series. E. O. Daniela Colombini y G. Antonio, Elsevier. **Volume 2**: 111-117.
- Cosgel, M. y T. Miceli (1999). "Job Rotation: Cost, Benefits, and Stylized Facts." Journal of Institutional and Theoretical Economics **155**(2): 301-320.
- Costa, A. M. y C. Miralles (2009). "Job rotation in assembly lines employing disabled workers." International Journal of Production Economics **120**(2): 625-632.
- Council_of_Medicine (2001). "Musculoskeletal disorders and the workplace: Low back and upper extremities - Executive Summary." Theoretical Issues in Ergonomics Science **2**(2): 142-152.
- Chiasson, M.-È., D. Imbeau, et al. (2012). "Comparing the results of eight methods used to evaluate risk factors associated with musculoskeletal disorders." International Journal of Industrial Ergonomics **42**(5): 478-488.
- David, G. C. (2005). "Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders." Occup Med (Lond) **55**(3): 190-199.
- Davis, K., M. Jorgensen, et al. (2005). "Ergonomics-Pros and cons of job rotation as a means of reducing injury costs." Journal of Occupational and Environmental Hygiene **2**(1): D1-D3.
- Davis, L. D. y M. Mitchell (1991). "Handbook of Genetic Algorithms." Van Nostrand Reinhold.
- Deb, K., A. Pratap, et al. (2002). "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II." Evolutionary Computation, IEEE Transactions on **6**(2): 182-197.
- Dempsey, P. G., R. W. McGorry, et al. (2005). "A survey of tools and methods used by certified professional ergonomists." Applied Ergonomics **36**(4): 489-503.
- Diego-Mas, J. A., S. Asensio-Cuesta, et al. (2009). "A multi-criteria genetic algorithm for the generation of job rotation schedules." International Journal of Industrial Ergonomics **39**(1): 23-33.
- Ehrgott, M. y X. Gandibleux (2002). Multiple criteria optimization: state of the art annotated bibliographic surveys.
- Ellis, T. (1999). "Implementing job rotation." Occupational Health and Safety **68**: 82-84.
- Eriksson, T. y J. Ortega (2006). "The adoption of job rotation: Testing the theories." Industrial & Labor Relations Review **59**(4): 653-666.
- FASECOLDA. (2000-2011, June, 2012). "Indicadores Técnicos." Retrieved June, 2012, from http://www.fasecolda.com/fasecolda/BancoConocimiento/R/riesgos_profesionales_-_estadisticas_del_ramofinal_-_indicadores_tecnicos/riesgos_profesionales_-_estadisticas_del_ramofinal_-_indicadores_tecnicos.asp.
- Faucett, J. (2005). "Integrating 'psychosocial' factors into a theoretical model for work-related musculoskeletal disorders." Theoretical Issues in Ergonomics Science **6**(6): 531-550.
- Filus, R. y M. L. Okimorto (2012). "The effect of job rotation intervals on muscle fatigue – lactic acid." Work **41**: 1572-1581.
- Filus, R. y L. Partel (2012). "Managing ergonomics in the development of rotation between workstations in the automotive industry. A balance between health and traceability of tasks." Work **41 Suppl 1**: 4402-4408.
- Fonseca, C. M. y P. J. Fleming (1993). "Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization." Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms: 416-423.
- Frazer, M., R. Norman, et al. (2003). "The effects of job rotation on the risk of reporting low back pain." Ergonomics **46**(9): 904-919.

- Garey, M. R. y D. S. Johnson (1979). "Computers and Intractability; A Guide to the Theory of NP-Completeness. ." 96-105 y 224.
- Gittleman, M., M. Horrigan, et al. (1998). "Flexible' workplace practices: evidence from a nationally representative survey." Industrial & Labor Relations Review **52**(1): 99-115.
- Goicoechea, A., D. R. Hansen, et al. (1982). Multiobjective decision analysis with engineering and business applications, Wiley.
- Goldberg, D. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Professional.
- Grant, K. A., D. J. Habes, et al. (1997). "Lifting hazards at a cabinet manufacturing company: evaluation and recommended controls." Applied Occupational and Environmental Hygiene **12**: 253-258.
- Hazzard, L. y J. Mautz (1992). "Job rotation cuts cumulative trauma cases." Personnel Journal **47**(10): 29-32.
- Henderson, C. J. y S. Kumar (1992). "Ergonomic Job Rotation in Poultry Processing." Advances in Industrial Ergonomics and Safety **IV**: 443-450.
- Ho, W. H., C. S. Chang, et al. (2009). "Effects of job rotation and role stress among nurses on job satisfaction and organizational commitment." BMC Health Serv Res **9**: 8.
- Holland, J. H. (1975). Adaptation in natural and artificial systems.
- Horn, J., N. Nafpliotis, et al. (1994). A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. Evolutionary Computation, 1994. IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the First IEEE Conference on.
- Hsieh, A.-T. y H.-Y. Chao (2004). "A reassessment of the relationship between job specialization, job rotation and job burnout: example of Taiwan's high-technology industry." The International Journal of Human Resource Management **15**(6): 1108-1123.
- Huang, H. J. (1999). "Job Rotation from the Employees' Point of View." Research and Practice in Human Resource Management Science **7**(1): 75-85.
- ISO_1228-3 (2007). "Ergonomics ,Manual handling." Part 3: Handling of low loads at high frequency.
- Jaturanonda, C., S. Nanthavanij, et al. (2006). "A survey study on weights of decision criteria for job rotation in Thailand: comparison between public and private sectors." The International Journal of Human Resource Management **17**(10): 1834-1851.
- Jonsson, B. (1988). "Electromyographic studies of job rotation", Scandinavian Journal of Work, Environment and Health **14**: 108-109.
- Jorgensen, M., K. Davis, et al. (2005). "Characteristics of job rotation in the Midwest US manufacturing sector." Ergonomics **48**(15): 1721-1733.
- Karhu, O., P. Kansil, et al. (1977). "Correcting working postures in industry: A practical method for analysis." Applied Ergonomics **8**: 199-201.
- Karsh, B.-T., F. B. P. Moro, et al. (2001). "The efficacy of workplace ergonomic interventions to control musculoskeletal disorders: A critical analysis of the peer-reviewed literature." Theoretical Issues in Ergonomics Science **2**(1): 23-96.
- Karwowski, W. y W. S. Marras (1999). The occupational ergonomics handbook, CRC Press/ Llc.
- Kogi, K., T. Kawakami, et al. (2003). "Low-cost work improvements that can reduce the risk of musculoskeletal disorders." International Journal of Industrial Ergonomics **31**(3): 179-184.
- Kotaro, O. (2012). "Decision Support for Management of Agents' Knowledge and Skills with Job Rotation in Service-Oriented Organization." 45th Hawaii International Conference on System Sciences: 1492-1501.
- Kuijer, P. P., A. J. van der Beek, et al. (2005). "Effect of job rotation on need for recovery, musculoskeletal complaints, and sick leave due to musculoskeletal complaints: A prospective study among refuse collectors." American Journal of Industrial Medicine **47**(5): 394-402.
- Kuijer, P. P., B. Visser, et al. (1999). "Job rotation as a factor in reducing physical workload at a refuse collecting department." Ergonomics **42**(9): 1167-1178.

- Kullpattaranirun, T. y S. Nanthavanij (2005). "A heuristic genetic algorithm for solving complex safety-based work assignment problems." International Journal of Industrial Engineering – Theory Applications and Practice **12**(1): 45–57.
- Lodree, E. J., C. D. Geiger, et al. (2009). "Taxonomy for integrating scheduling theory and human factors: Review and research opportunities." International Journal of Industrial Ergonomics **39**(1): 39-51.
- Malinski, R. (2002). "Job Rotation in an Academic Library: Damned if You Do and Damned if You Don't." LIBRARY TRENDS **50**(4): 673-680.
- Mathiassen, S. E. (2006). "Diversity and variation in biomechanical exposure: what is it, and why would we like to know?" Appl Ergon **37**(4): 419-427.
- McAtamney, L. y E. Nigel Corlett (1993). "RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders." Appl Ergon **24**(2): 91-99.
- McDonald, T., K. P. Ellis, et al. (2009). "Development and application of a worker assignment model to evaluate a lean manufacturing cell." International Journal of Production Research **47**(9): 2427-2447.
- Michalos, G., S. Makris, et al. (2013). "The effect of job rotation during assembly on the quality of final product." CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology(0).
- Michalos, G., S. Makris, et al. (2011). "A web based tool for dynamic job rotation scheduling using multiple criteria." CIRP Annals - Manufacturing Technology **60**(1): 453-456.
- Michalos, G., S. Makris, et al. (2010). "Dynamic job rotation for workload balancing in human based assembly systems." CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology **2**(3): 153-160.
- Mondelo, P. R., E. Gregori, et al. (2001). Ergonomía 1: Fundamentos. E. UPC.
- Moore, J. S. y A. Garg (1995). "The Strain Index: A proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders." American Industrial Hygiene Association Journal **56**: 443-458.
- Moreira, M. C. O. y A. M. Costa (2013). "Hybrid heuristics for planning job rotation schedules in assembly lines with heterogeneous workers." International Journal of Production Economics **141**(2): 552-560.
- OIT (1996). Introducción al Estudio del Trabajo. Ginebra, Oficina Internacional del Trabajo.
- Ortega, J. (2001). "Job Rotation as a Learning Mechanism." Management Science **47**(10): 1361-1370.
- OSHA (2012). "Printing Industry Ergonomics: Glossary."
- Osterman, P. (1994). "How common is workplace transformation and who adopts it?" Industrial and Labor Relations Review **47**(2): 173-188.
- Othman, M., G. J. Gouw, et al. (2012). "Workforce scheduling: A new model incorporating human factors." Journal of Industrial Engineering and Management **5**(2).
- Otto, A. y A. Scholl (2011). "Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing." European Journal of Operational Research **212**(2): 277-286.
- Otto, A. y A. Scholl (2012). "Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling." OR Spectrum.
- Pérez, A. (1996) "Una introducción a la computación evolutiva."
- Pinedo, M. (1995). Scheduling: Theory, Algorithms and Systems, Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ.
- Punnett, L. y D. Wegman (2004). "Work-related musculoskeletal disorders the epidemiologic evidence." Journal of Electromyography and Kinesiology **14**: 13–23.
- Putz-Anderson, V. (1988). Cumulative Trauma Disorders: A Manual for Musculoskeletal Diseases of the Upper Limbs, Taylor & Francis.
- Radwin, R. G., W. S. Marras, et al. (2001). "Biomechanical aspects of work-related musculoskeletal disorders." Theoretical Issues in Ergonomics Science **2**(2): 153-217.
- Rissén, D., B. Melin, et al. (2002). "Psychophysiological stress reactions, trapezius muscle activity, and neck and shoulder pain among female cashiers before and after introduction of job rotation." Work & Stress **16**(2): 127-137.
- Sato Tde, O. y H. J. Coury (2009). "Evaluation of musculoskeletal health outcomes in the context of job rotation and multifunctional jobs." Appl Ergon **40**(4): 707-712.
- Schaffer, J. D. (1984). Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms., Vanderbilt University, Nashville, TN.

- Seçkiner, S. U. y M. Kurt (2007). "A simulated annealing approach to the solution of job rotation scheduling problems." Applied Mathematics and Computation **188**(1): 31-45.
- Seçkiner, S. U. y M. Kurt (2008). "Ant colony optimization for the job rotation scheduling problem." Applied Mathematics and Computation **201**(1-2): 149-160.
- Silverstein, B. y R. Clark (2004). "Interventions to reduce work-related musculoskeletal disorders." Journal of Electromyography and Kinesiology **14**: 135-152.
- Snook, S. H. y V. M. Ciriello (1991). "The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces." Ergonomics **34**(9): 1197-1213.
- Srinivas, N. y K. Deb (1994). "Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms." Evolutionary Computation **2**: 221-248.
- Thammaphornphilas, W., B. Green, et al. (2003). "Applying mathematical modeling to create job rotation schedules for minimizing occupational noise exposure." AIHA Journal **64**(3): 401-405.
- Thammaphornphilas, W. y B. Norman (2004). "A quantitative method for determining proper job rotation intervals." Annals of Operations Research **128**: 251-266.
- Thammaphornphilas, W. y B. Norman (2007). "A methodology to create robust job rotation schedules." Annals of Operations Research **155**(1): 339-360.
- Triggs, D. D. y P. M. King (2000). "Job rotation: an administrative strategy for hazard control." Professional Safety **45**: 32-34.
- Uusitalo, T. y M. Jarvi (2004). "Job rotation in nursing a study of job rotation among nursing personnel from the literature and via a questionnaire." Journal of Nursing Management **12**(1): 337-347.
- Vezina, N. (2004). "Rotation implantation: what is at stake? What are the markers." WorkShop Principles and Practices of Job Rotation (CRE-MSD, Centre of Research Expertise for the Prevention of Musculoskeletal Disorders): : 1- 22.
- Waters, T. R., M.-L. Lu, et al. (2007). "New procedure for assessing sequential manual lifting jobs using the revised NIOSH lifting equation." Ergonomics **50**(11): 1761-1770.
- Waters, T. R., V. Putz-Anderson, et al. (1993). "Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks." Ergonomics **36**(7): 749-776.
- Wells, R. (2004). Job rotation. Is it a solution? introductory remarks. WorkShop Principles and Practices of Job Rotation (CRE-MSD, Centre of Research Expertise for the Prevention of Muculoskeletal Disorders).
- Wells, R., K. McFall, et al. (2010). "Task selection for increased mechanical exposure variation: relevance to job rotation." Ergonomics **53**(3): 314-323.
- Yaoyuenyong, S. y S. Nanthavanij (2006). "Hybrid procedure to determine optimal workforce without noise hazard exposure." Computers and Industrial Engineering **51**(4): 743-764.
- Yaoyuenyong, S. y S. Nanthavanij (2008). "Heuristic Job Rotation Procedures for Reducing Daily Exposure to Occupational Hazards." International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE) **14**(2): 195-206.
- Zitzler, E. y L. Thiele (1999). "Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach." Evolutionary Computation, IEEE Transactions on **3**(4): 257-271.
- Zülch, G., S. Rottinger, et al. (2004). "A simulation approach for planning and re-assigning of personnel in manufacturing." International Journal of Production Economics **90**(2): 265-277.

ANEXOS

ANEXOS 1 - Determinación Experimental de Parámetros del Algoritmo Genético Multiobjetivo - Caso Académico

La definición adecuada de los parámetros es indispensable para garantizar que el algoritmo genético es orientado y permite alcanzar respuestas de calidad y eficiencia computacional. Por tal motivo se busca la mejor configuración de los elementos propios de la metaheurísticas.

En la siguiente tabla se resumen los parámetros propios del problema, que hacen parte del caso académico constituido por condiciones laborales de un sistema de ensamble con información de demanda laboral con índices elevados, a fin de llevar al límite la minimización del máximo riesgo que pueden asumir los trabajadores.

La constitución del caso de aplicación se fundamentó en tomar información de la validación de riesgos por repetitividad de las investigaciones desarrolladas por Asensio-Cuesta et al. (2012), en la cual se toma la asignación de la puntuación dadas en el OCRA (Lado Derecho), además la información relevante del ambiente por manipulación de carga se toman la validación de Carnahan et al. (1999), en la cual se revela la ponderación por cada uno de los factores del método NIOSH en diferentes trabajadores, y finalmente las investigaciones de Diego-Mas et al. (2009) reflejan puntuaciones para las posturas que son llevadas por los trabajadores en un método de valoración por puntuación, el cual es correlacionado con RULA para su estudio. De esta forma la unión de los diferentes ambiente contribuyo a la creación de un ambiente dinámico que considera los riesgos ergonómicos que son motivo de estudio. Es importante resaltar que la unión de diversos ambientes, buscaba enriquecer el caso de estudio, debido a la característica innovadora del problema.

Parámetros del Problema	Nomenclatura	Valores
Cantidad de trabajadores y puestos de trabajo	J	14
Cantidad de intervalos de rotación.	T	4
Duración del periodo de rotación k . ($k:4$)	D_k	(2,2,2,2) horas
Duración del periodo de descanso entre rotación t y $t+1$. ($t:2$)	$Dp(t,t+1)$	1 hora
Tamaño del conjunto de individuos no dominados.	$P-ND$	100
Porcentaje de la población en la capa c . ($c:5$)	FP_c	(0.2)
Factor de reducción fatiga RULA.	α	0.33
Nivel de variación de riesgo OCRA entre rotación t y $t+1$.	$Var(t,t+1)$	Tabla 17

Información RULA

(e_j) -RULA: nivel de riesgo RULA del puesto j .

Valoración RULA														
Puesto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ER - e_j	5	5	3	4	7	9	5	3	7	7	3	8	6	4

Información NIOSH

- **LC (Constante de Carga NIOSH): 25 Kilos.**

Valoración NIOSH														
Puesto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
HM	0.83	1	0.7	0.7	0.5	0.5	0.8	0.5	1	1	0.6	0.7	0.5	1
VM	0.78	0.93	0.7	0.8	0.7	1	0.8	1	0.8	0.9	0.9	0.9	0.7	0.9
DM	0.88	0.93	1	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8
AM	0.8	0.88	1	0.8	0.7	0.9	0.7	0.7	0.9	0.7	0.8	0.9	1	0.9
FM	0.35	0.84	0.35	0.42	0.26	0.35	0.26	0.6	0.42	0.26	0.84	0.35	0.72	0.5
FMM	0.18	0.65	0.18	0.22	0.13	0.18	0.13	0.35	0.22	0.13	0.65	0.18	0.45	0.27
CM	0.9	0.9	0.9	0.9	1	0.9	1	0.9	0.9	0.9	1	0.9	1	1
PC	10	15	11	32	31	30	24	11	17	11	20	13	13	11

Información OCRA

Valoración OCRA														
Puesto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
FF	40	40	53	60	30	45	50	35	30	20	40	40	30	35
FM	1	1	1	1	1	1	1	1	0.85	1	0.85	1	1	1
PM	0.6	0.6	1	1	0.6	1	1	1	1	1	1	0.7	1	1
RM	1	1	0.7	1	1	0.7	1	1	0.7	0.7	1	1	1	0.7
AM	0.9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.9	0.9	1	1

Tabla de Penalización

Trabajador / Puesto	Penalización													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A continuación se procede a esquematizar un conjunto de experimentos que permitirán combinar los parámetros y por medio de una variedad de corridas (10 corridas) darle mayor confiabilidad a los

resultados generados. La construcción de los experimentos radica en la combinación de la información de los parámetros a probar de la Tabla 19. En resumen las pruebas se constituyeron de acuerdo a los siguientes escenarios.

Escenarios	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	E11
Numero de Generaciones	15000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
Tamaño de la Población Inicial	250	250	100	400	100	100	100	100	100	100	100
Probabilidad de Cruce	60%	60%	60%	60%	30%	90%	60%	60%	60%	60%	60%
Probabilidad de Mutación	30%	30%	30%	30%	30%	30%	10%	50%	30%	30%	30%
Intensidad de Mutaciones	1	1	1	1	1	1	1	1	2	4	2
Elitismo	on	on	on	on	on	on	on	on	on	on	off
Intensidad de Elitismo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	na

La planeación de cada uno de los escenarios se dan en función de encontrar parámetros adecuados que garanticen la orientación del algoritmo genético hacia los resultados requeridos.

El escenario 1: Se planteó en función de determinar la cantidad de generaciones necesarias para obtener respuestas adecuadas, sin importar el tiempo computacional requerido. Un elevado número de interacciones (15000) permite identificar la fase donde se estabiliza la calidad de las soluciones generadas, despreciando el tiempo computacional.

Para definir el número adecuado de generaciones, se procedió a registrar las generaciones donde aparecieron los mejores resultados:

Corridas	Generaciones		
	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
1	14678	1120	1005
2	2271	99	1005
3	1934	99	2002
4	9974	8504	144
5	14811	107	9522
6	11682	199	11032
7	8180	231	671
8	14922	123	528
9	11813	153	237
10	670	42	154
Promedio	9093,5	1067,7	2630
Promedio General		4263,73333	

El número de generaciones promedio donde se hallan los mejores resultados es de 4263,73, así se determino aproximar a 5000 generaciones el valor promedio para obtener soluciones adecuadas en el siguiente escenario.

El escenario 2: Se implementó el número de generaciones en 5000. Confirmado que la disminución del número de generaciones no desmejora la calidad de resultados. Se evidenció que la respuesta promedio no varía de significativamente con respecto a los resultados obtenidos previamente.

	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
Promedio Escenario 2	31,72475	33,0633935	4,87816483
Promedio Escenario 1	31,288	33,1217587	4,87163447
Variación	0,43675	0,05836523	0,00653036

Los tiempos computacionales demostraron una mejora significativa en las corridas, en promedio el escenario 1 necesito de 811 segundos (13,53 minutos) mientras el escenario 2 se requieren de 309 segundos (5,14 minutos) en un equipo Intel Core i5-2430M de 2.40 GHz y 4 GB RAM. Además se contabilizó la cantidad de veces en que mejoran las respuestas donde el escenario 1 cuenta con 452 cambios, mientras el escenario 2 tiene una mejora significativa con 497 cambios. Por tal motivo la asignación de 5000 generaciones es oportuna y adecuada en el algoritmo genético en calidad de respuestas, además de sus bondades en tiempo computacional.

El escenario 3: Se determinó el número de generaciones en 5000. Se procedió a experimentar con el tamaño de la población. Pasando de un tamaño de 250 individuos a 100 individuos. La disminución en la cantidad de individuos puede representar una pérdida en la diversidad dentro del algoritmo genético, pero en este caso no se evidenció de manera significativa.

	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
Promedio Escenario 2	31,72475	33,0633935	4,87816483
Promedio Escenario 3	31,724	33,135902	4,84292538
Variación	0,00075	0,07250849	0,03523944

El escenario 4: Se determinó el número de generaciones en 5000. Se procedió a experimentar con el tamaño de la población. Pasando de un tamaño de 250 individuos a 400 individuos.

	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
Promedio Escenario 2	31,72475	33,0633935	4,87816483
Promedio Escenario 4	30,92375	33,0775368	5,02822474
Variación	0,801	0,01414326	0,15005991

Para los escenarios 3 y 4 se evidenció que la disminución del número de individuos dentro de la población no afecta de manera significativa, tomando como referencia el escenario 2. Por tal motivo se decidió tomar el tamaño de población de 100 individuos. El tiempo computacional requerido en promedio en el escenario 2, 3, y 4 son 309 segundos, 82,4 segundos y 435 segundos respectivamente. Por tal motivo el escenario 3 demostró una ventaja significativa con respecto a los demás escenarios, siendo representativo y presentando ahorros relevantes en el tiempo computacional de procesamiento.

El escenario 5: Se fijó el número de individuos en 100 individuos, y se procedió a evaluar la variación en la probabilidad de cruce de la población. Se planteó una disminución del 30% en la probabilidad de cruzamiento.

	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
Promedio Escenario 5	31,465	33,1187359	5,00579622
Promedio Escenario 3	31,724	33,135902	4,84292538
Variación	0,259	0,01716605	0,16287084

El escenario 6: Se fijó el número de individuos en 100 individuos, y se procedió a evaluar la variación en la probabilidad de cruce de la población. Se planteó un aumento del 90% en la probabilidad de cruzamiento.

	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
Promedio Escenario 6	31,633	33,0664163	5,03962119
Promedio Escenario 3	31,724	33,135902	4,84292538
Variación	0,091	0,0694857	0,1966958

Los escenarios 5 y 6 representan cambios en la probabilidad de cruce de los individuos, evidenciando que un aumento o disminución en el cruzamiento de los individuos no demuestran cambios significativos, e inclusive desmejoran en algunos objetivos la calidad de respuesta, tomando como referencia el escenario 3. Por tal motivo se definió la probabilidad de cruce de 30% como la tasa mas indicada.

El escenario 7: Se determinó la tasa de cruce en 30%. Se experimentó la disminución de la probabilidad de mutación a un 10%.

	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
Promedio Escenario 7	31,65875	33,2349315	5,05303146
Promedio Escenario 3	31,724	33,135902	4,84292538
Variación	0,06525	0,09902949	0,21010608

Los resultados evidenciaron que la disminución en la mutación no mejoraba significativamente el nivel de riesgo de forma uniforme, en contraste con el escenario 3 con una tasa de mutación del 30%.

El escenario 8: Se determinó la tasa de cruce en 30%. Se experimentó la disminución de la probabilidad de mutación a un 50%.

	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
Promedio Escenario 8	31,64125	33,0402565	4,88526482
Promedio Escenario 3	31,724	33,135902	4,84292538
Variación	0,08275	0,09564553	0,04233943

Los resultados evidenciaron que un aumento en la mutación mejoraba el nivel de riesgo, en contraste con el escenario 3 con una tasa de mutación del 30%, pero se analizó que una tasa de mutación tan alta destruye la generación de individuos que evolucionan, obteniendo calidad de respuesta causado por la aleatoriedad que se presta con tasas de mutación elevadas, lo cual no es adecuado en la creación de algoritmos genéticos.

El escenario 9: Se fijo la tasa de mutación al 30% como una probabilidad pertinente para la evolución de los individuos, y del mismo modo infundir diversidad. Se probó la intensidad de las mutaciones, pasando de 1 a 2.

	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
Promedio Escenario 9	31,32375	33,13892	4,85016
Promedio Escenario 3	31,72400	33,13590	4,84293
Variación	0,400	0,003	0,007

El escenario 10: Se fijo la tasa de mutación al 30%. Se probó un aumento relevante en la intensidad de las mutaciones en 4.

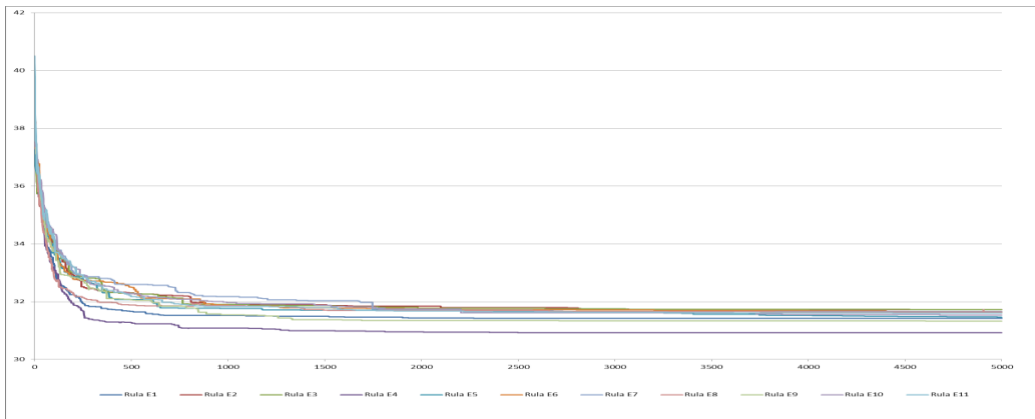
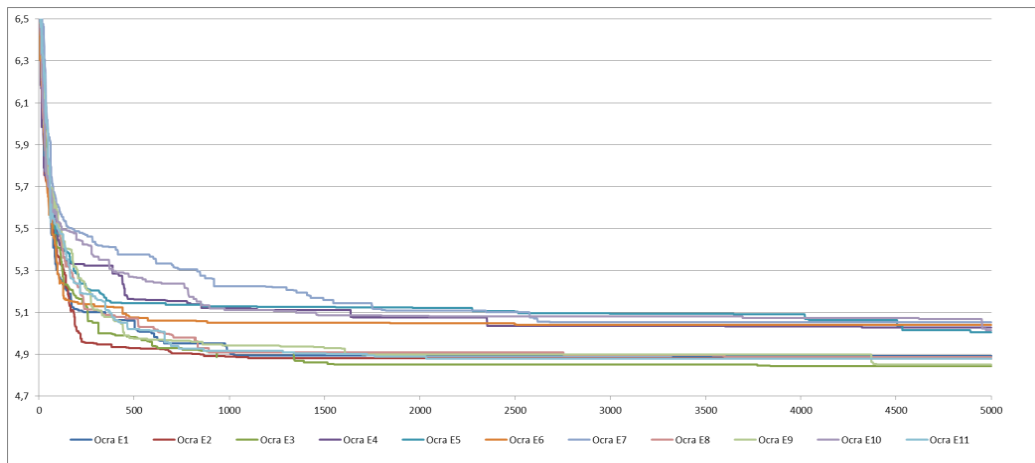
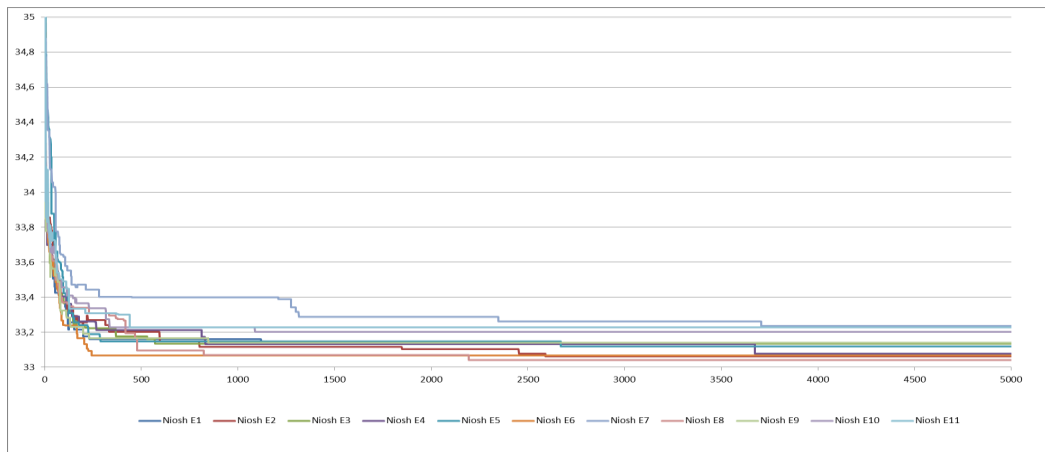
	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
Promedio Escenario 10	31,52925	33,203261	5,01569997
Promedio Escenario 3	31,724	33,135902	4,84292538
Variación	0,19475	0,067359	0,17277459

Los escenarios 9 y 10 permitieron corroborar la intensidad con la cual se desarrollaron las mutaciones, presentado resultados mas ajustados cuando la intensidad se da en dos instancias, es por ello que se consideró pertinente dentro de los parámetros. Además la relación de la tasa de mutación, junto con la intensidad permite explotar con mayor diversidad los individuos dentro de la población.

El escenario 11: Se experimentó la desactivación del elitismo, a fin de conocer la convergencia u orientación de los algoritmos genéticos, los resultados demostraron que no era pertinente, debido a que la preservación de los mejores individuos orienta adecuadamente el algoritmo.

	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
Promedio Escenario 9	31,32375	33,13892	4,85016
Promedio Escenario 11	31,60175	33,22852	4,87754
Variación	0,278	0,090	0,027

La comparación de los promedios de los escenarios 9 y 11 demostró que no existen cambios significativos cuando se excluye el elitismo. En resumen se compila el comportamiento de cada uno de los escenarios experimentados para cada uno de los riesgos, así:



A continuación, se compiló la información de los experimentos previamente presentados, tomando en cuenta el valor promedio de las corridas para cada uno de los riesgos, el tiempo promedio y el nivel de dominancia.

RESUMEN DATOS		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Riesgo RULA	Max	32,83	32,72	32,87	31,83	32,69	32,75	32,97	32,75	32,64	32,97	32,86
Riesgo NIOSH	Max	33,33	33,33	33,48	33,48	33,33	33,33	33,83	33,33	33,48	33,33	33,48
Riesgo OCRA	Max	4,97	4,99	4,99	5,49	5,39	5,47	5,60	5,06	4,97	5,49	5,36
Riesgo RULA	Min	30,70	30,69	30,69	30,50	30,61	30,50	30,75	30,50	30,69	30,75	30,39
Riesgo NIOSH	Min	32,78	32,78	32,78	32,78	32,78	32,78	32,78	32,78	33,07	33,07	32,78
Riesgo OCRA	Min	4,78	4,78	4,78	4,78	4,81	4,78	4,78	4,78	4,78	4,78	4,78
Riesgo RULA	Prom	31,29	31,72	31,72	30,92	31,47	31,63	31,66	31,64	31,32	31,53	31,60
Riesgo NIOSH	Prom	33,12	33,06	33,14	33,08	33,12	33,07	33,23	33,04	33,14	33,20	33,23
Riesgo OCRA	Prom	4,87	4,88	4,84	5,03	5,01	5,04	5,05	4,89	4,85	5,02	4,88
Tiempo Promedio(min)		13,53	5,15	1,37	7,25	1,40	1,43	1,73	1,40	1,44	1,42	1,39
Domina		3	0	0	1	2	1	0	1	3	1	1

Finalmente, la experimentación permitió hallar una parametrización pertinente para orientar el desarrollo del algoritmo genético multiobjetivo hacia un conjunto de respuestas con calidad y tiempo computacional eficiente. El escenario 9 es considerado como el adecuado, además su aptitud en el nivel de dominio con respecto a los resultados de riesgos promedio es el mejor al igual que el escenario 1, con la diferencia del tiempo computacional requerido. Por ello se consideran los parámetros del escenario 9 como los indicados para implementar sobre el modelo de rotación laboral. Las figuras que muestran la evolución promedio de cada uno de los escenarios para los riesgos ergonómicos evidenciaron que los resultados son bastante compactos a la hora de experimentar con diferentes parámetros. Es importante resaltar que la definición de los parámetros no es una determinación óptima, sino que se ajusta a las condiciones del problema para darle orientación y poder garantizar el direccionamiento del algoritmo genético hacia la creación de soluciones con calidad y eficiencia en el tiempo computacional.

ANEXOS 2 - Sistema Productivo de Fabricación de Productos Plásticos

La planta de producción de plásticos cuenta con la capacidad de 5000 toneladas/año en la transformación de películas de polietileno, 3000 toneladas/año en la producción de productos de polipropileno, con una distribución con más de 5000 metros cuadrados de área. El sistema de producción es de característica intermitente donde se desarrollan los productos por pedido y existe una familia de productos.

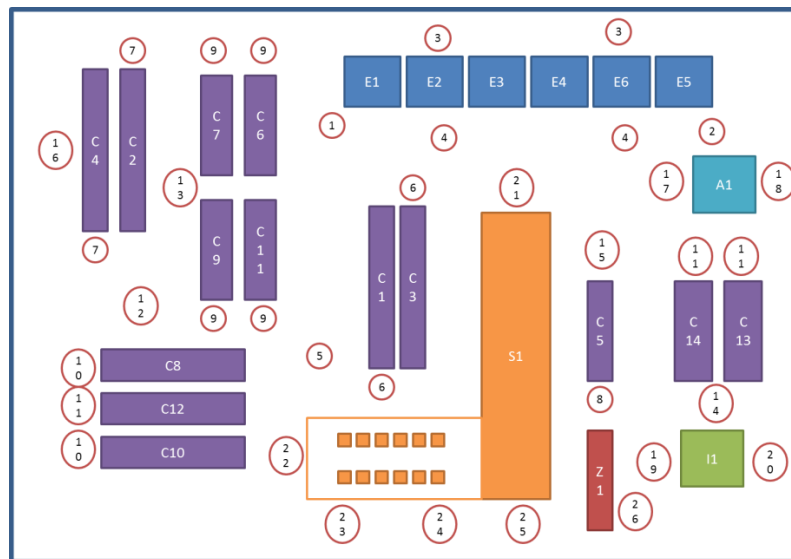
La planta se compone de 3 etapas de producción, Extrusión, Conversión e Impresión.

Zona 1: el área de extrusión es la encargada de transformar la resina plástica sólida en granos, donde el material fluye por medio de temperatura, presión y soplado constante para realizar una película continua de plástico con características propias en el calibre, tamaño, color entre otros. Se encuentra conformado por 6 máquinas extrusoras polietileno (E1, E2, E3, E4, E5, E6), 1 maquina extrusora de polipropileno (S1), y 1 maquina extrusora de cinta plástica (Z1).

Zona 2: el área de conversión toma los productos extruidos que requieren características o presentaciones especiales, donde se permiten el sellado, precorte, perforado, devanando, doblado, empackado, rotulado, embobinado entre otros aspectos. Se encuentra conformada por 14 convertidores (C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C14), y una aglutinadora (A1).

Zona 3: el área de impresión agrega características en las películas plásticas propias de cada uno de los clientes de la compañía, tales como marca, señales, logos e indicaciones. Se encuentra conformada por una impresora (I1).

A continuación se plantea el esquema de producción, con cada uno de los perfiles de puesto de los trabajadores en el sistema productivo:



Finalmente se relaciona la interacción de máquinas, zonas, cantidad de trabajadores requeridos y el perfil de puesto de trabajo relacionados.

MAQUINAS	ZONA	Cant	No	PERFIL PUESTO DE TRABAJO
E1,E2,E3,E4,E5,E6	1	1	1	Operador Extrusión Principal Polietileno
E1,E2,E3,E4,E5,E6	1	1	2	Operador Mezclas de Extrusión Polietileno
(E1,E2,E3)(E4,E5,E6)	1	2	3	Operador de Seguimiento de Extrusión Polietileno
(E1,E2,E3)(E4,E5,E6)	1	2	4	Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polietileno
C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C14	2	1	5	Operador Conversión Principal Polietileno
(C1) (C3)	2	2	6	Operador de Conversión 1
(C2) (C4)	2	2	7	Operador de Conversión 2
C5	2	1	8	Operador de Conversión 3
(C6) (C7)(C9)(C11)	2	4	9	Operador de Conversión 4
(C8) (C10)	2	2	10	Operador de Conversión 5
(C12) (C13)(C14)	2	3	11	Operador de Conversión 6
C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12, C13, C14	2	1	12	Operador Auxiliar de Perforación
(C6) (C7)(C9)(C11)	2	1	13	Operador de Empaque de conversión 4
(C12) (C13)(C14)	2	1	14	Operador de Empaque de conversión 6
C5	2	1	15	Operador de Empaque de conversión 3
(C2) (C4)	2	1	16	Operador de Apoyo de conversión 2
A1	1	1	17	Operador de Aglutinadora
A1	1	1	18	Operador de Apoyo de Aglutinadora
I1	3	1	19	Operador de Impresión
I1	3	1	20	Operador de Apoyo de Impresión
S1 (12 sub S1)	1	1	21	Operador Extrusión Principal Polipropileno
S1 (12 sub S1)	1	1	22	Operador Mezclas de Extrusión Polipropileno
S1 (12 sub S1)	1	1	23	Operador de Twister de Extrusión Polipropileno
S1 (12 sub S1)	1	1	24	Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polipropileno
S1 (12 sub S1)	1	1	25	Operador de Apoyo de Extrusión Polipropileno
Z1	1	1	26	Operador de Extrusión Polipropileno Zuncho

A continuación se especifica las funciones desarrolladas en cada uno de los perfiles de los trabajadores inmersos dentro del sistema productivo:

- Operador Extrusión Principal Polietileno: Es el encargado de las decisiones en función del control y ajuste del proceso, abarcando actividades de arranque, programación y configuración, coordinación de operadores de apoyo, recolección de información de producción para el control y reporte de la sección.
- Operador Mezclas de Extrusión Polietileno: Es el encargado de los insumos y materias primas requeridos en la extrusión de productos de polietileno, garantizando las proporciones, porcentajes y referencias necesarias para ser incluidas en la producción.

- Operador de Seguimiento de Extrusión Polietileno: Es el encargado de verificar que las configuraciones asignadas a las maquinas de extrusión sean las adecuadas y se mantengan de acuerdo con los requerimientos de producción. Dentro de las tareas se encuentra el control de temperaturas, sistemas de control, presión, aire y comportamiento de la película plástica (dimensiones, entre otros aspectos).
- Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polietileno: Es el encargado de manipular las películas plásticas que se han generado en el procesos de extrusión, la tarea consiste en bajarlo de las maquinas, trasportarlo hacia el almacenamiento con el fin de etiquetarlo, pesarlo y estibarlo.
- Operador Conversión Principal Polietileno: Es el encargado del precalentado, programación y arranque de líneas de conversión, tomando decisiones sobre el control y ajuste de los procesos, además de ser responsable de la coordinación de los operadores de la sección.
- Operador de Conversión 1: Es el encargado de ejecutar actividades sobre las maquinas de conversión para el selle, corte y perforación de películas plásticas de polietileno.
- Operador de Conversión 2: Es el encargado de ejecutar actividades sobre las maquinas de conversión para el Precorte y perforación de películas plásticas de polietileno.
- Operador de Conversión 3: Es el encargado de ejecutar actividades sobre las maquinas de conversión para el corte longitudinal, cizallamiento de cinta plástica.
- Operador de Conversión 4: Es el encargado de ejecutar actividades sobre las maquinas de conversión para el desarrollo de minirollos, doblando las películas plásticas en varias partes.
- Operador de Conversión 5: Es el encargado de ejecutar actividades sobre las maquinas de conversión para el sellado de fondo, precortado y perforado adicional de las películas plásticas.
- Operador de Conversión 6: Es el encargado de ejecutar actividades sobre las maquinas de conversión para el sellado lateral, perforado y productos impresos especiales en películas plásticas.
- Operador Auxiliar de Perforación: Es el encargado de configurar los adaptes perforables en cada uno de las maquinas correspondientes a la zona de perforación.
- Operador de Empaque de conversión 4: Es el encargado de realizar el empaque y embalaje de las convertidoras que desarrollan los rollitos, permitiendo el traslado del producto en cajas, etiquetado y estibando el producto terminado.
- Operador de Empaque de conversión 6: Es el encargado de realizar el empaque y embalaje de las convertidoras que desarrollan productos de sellado lateral, perforado e impresos, permitiendo el traslado del producto en cajas, etiquetado y estibando el producto terminado.
- Operador de Empaque de conversión 3: Es el encargado de realizar el empaque y embalaje de las convertidoras que desarrollan cinta plástica permitiendo el traslado del producto etiquetado y estibando el producto terminado en bolsas.
- Operador de Apoyo de conversión 2: Es el encargado de realizar apoyo sobre las maquinas de conversión para el Precorte y perforación de películas plásticas de polietileno.
- Operador de Aglutinadora: Es el encargado de alimentar y operar la maquina aglutinadora.

- Operador de Apoyo de Aglutinadora: Es el encargado de clasificar los desperdicios para alimentar y descargar el equipo una vez terminado el proceso de aglutinado.
- Operador de Impresión: Es el encargado de operar la maquina de impresión flexografica.
- Operador de Apoyo de Impresión: Es el encargado de clasificar los insumos y descargar el material luego que sea realizado la impresión.
- Operador Extrusión Principal Polipropileno: Es el encargado de las decisiones en función del control y ajuste del proceso, abarcando actividades de arranque, programación y configuración, coordinación de operadores de apoyo, recolección de información de producción para el control y reporte de la sección.
- Operador Mezclas de Extrusión Polipropileno: Es el encargado de los insumos y materias primas requeridos en la extrusión de productos de polietileno, garantizando las proporciones, porcentajes y referencias necesarias para ser incluidas en la producción.
- Operador de Twister de Extrusión Polipropileno: Es el encargado de verificar que las configuraciones asignadas a las maquinas twister de acuerdo con los requerimientos de producción. Dentro de las tareas se encuentra el control de temperaturas, sistemas de control, presión, aire y comportamiento de la película plástica (dimensiones, entre otros aspectos).
- Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polipropileno: Es el encargado de manipular las películas plásticas que se han generado en el procesos de extrusión, la tarea consiste en bajarlo de las maquinas, trasportarlo hacia el almacenamiento con el fin de etiquetarlo, pesarlo y estibarlo.
- Operador de Apoyo de Extrusión Polipropileno: Es el encargado de apoyar todas las actividades desarrolladas en toda el área de extrusión de polipropileno.
- Operador de Extrusión Polipropileno Zuncho: Es el encargado de apoyar todas las actividades desarrolladas la extrusión de cinta plástica con material de polipropileno.

ANEXO 3 - Corridas de Algoritmo Genético de Forma Independiente para Riesgos por Manipulación de Carga, Repetitividad de Tareas y Posturas Forzadas

• **CORRIDA NIOSH AG**

CORRIDA	Tiempo(Seg)	Tiempo(Min)	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
1	249	4,15	39,4075	3,67598922	9,409171
2	242	4,03333333	39,7375	3,486837	7,715594
3	244	4,06666667	38,4075	3,675989	8,30767
4	246	4,1	41,7375	3,486837	8,926677
5	241	4,01666667	38,4075	3,675989	8,821611
6	254	4,23333333	37,435	3,486837	8,019706
7	247	4,11666667	39,5725	3,675989	9,409171
8	240	4	39,7375	3,675989	8,69417
9	239	3,98333333	38,5175	3,675989	8,743636
10	251	4,18333333	38,4075	3,675989	8,468254
Max	254	4,23333333	41,7375	3,67598922	9,409171
Min	239	3,98333333	37,435	3,486837	7,715594
Promedio	245,3	4,08833333	39,13675	3,61924342	8,651566

TRABAJADOR	Manipulación de Carga					Repetitividad					Postura Forzada				
	R1	R2	R3	R4	NIOSH (SLI)	R1	R2	R3	R4	OCRA	R1	R2	R3	R4	RULA
1	0,3	2,6	1,2	2,8	2,99	3,50	3,47	3,46	3,47	3,47	5	5	7	5	5,50
2	1,6	2,6	3,5	3,5	1,69	3,53	3,47	3,54	3,54	3,52	3	5	6	6	5,00
3	2,8	2,6	0,3	2,9	3,10	4,41	2,18	3,50	3,47	3,53	7	5	5	7	6,00
4	2,9	2,6	2,9	2,6	3,08	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	5	5	7	5	5,50
5	3,5	3,5	2,6	2,9	3,23	3,54	3,54	3,50	3,47	3,51	6	6	7	5	6,00
6	1,6	2,9	2,8	1,6	3,17	3,53	3,47	3,47	3,46	3,49	3	5	5	7	5,00
7	3,2	0,0	2,8	1,7	3,44	2,18	3,47	3,47	3,89	3,34	5	7	5	7	6,00
8	2,4	0,0	2,3	2,6	3,14	3,46	0,84	2,31	3,47	2,33	7	3	7	5	5,50
9	1,6	1,6	2,6	2,8	2,94	3,46	3,53	3,47	4,41	3,70	7	3	5	7	5,50
10	2,3	1,2	1,6	2,3	3,47	2,31	3,46	3,46	2,31	2,77	7	7	7	7	7,00
11	2,6	2,4	0,0	0,0	2,39	3,47	3,46	0,58	3,47	2,30	5	7	4	7	5,75
12	2,7	2,8	2,2	2,7	3,10	4,41	4,41	2,54	4,41	3,72	6	7	4	6	5,75
13	2,7	1,6	2,6	3,2	3,44	4,41	3,46	3,47	2,18	3,52	6	7	5	5	5,75
14	2,8	2,8	2,6	2,6	3,09	3,47	3,47	2,18	3,50	3,27	5	5	5	7	5,50
15	2,9	2,6	1,6	2,4	3,24	3,47	3,50	3,53	3,46	3,49	7	7	3	7	6,00
16	2,7	0,0	2,6	2,6	3,49	4,41	0,58	3,47	3,46	2,44	6	4	5	7	5,50
17	1,7	0,3	2,6	0,0	3,49	3,89	3,50	3,46	0,84	2,43	7	5	7	3	5,50
18	2,6	2,7	2,9	0,3	3,10	3,47	4,41	3,47	3,50	3,70	5	6	5	5	5,25
19	2,6	2,6	2,7	2,6	3,49	3,47	3,46	4,41	3,50	3,74	5	7	6	7	6,25
20	2,6	2,6	0,0	2,9	3,49	3,46	3,47	0,84	3,47	2,64	7	5	3	5	5,00

TRABAJADOR	Manipulación de Carga					Repetitividad					Postura Forzada				
	R1	R2	R3	R4	NIOSH (SLI)	R1	R2	R3	R4	OCRA	R1	R2	R3	R4	RULA
21	0,0	3,2	2,9	2,6	3,44	0,84	2,18	3,47	3,47	2,45	3	5	5	5	4,50
22	1,2	2,9	3,5	3,5	3,14	3,46	3,47	3,54	3,54	3,50	7	5	6	6	6,00
23	2,2	2,6	1,6	2,6	2,91	2,54	3,50	3,53	2,18	2,94	4	7	3	5	4,75
24	2,8	2,2	2,6	0,0	3,04	3,47	2,54	3,50	0,58	2,10	5	4	7	4	5,00
25	2,6	2,7	1,7	2,2	2,96	3,50	4,41	3,89	2,54	3,37	7	6	7	4	6,00
26	2,6	2,8	2,7	1,6	2,92	3,47	3,47	4,41	3,53	3,68	5	5	6	3	4,75
27	0,0	2,3	2,8	2,7	3,14	0,58	2,31	4,41	4,41	2,40	4	7	7	6	6,00
28	2,9	1,7	2,6	1,2	3,17	3,47	3,89	3,47	3,46	3,54	5	7	5	7	6,00
29	2,6	1,6	2,7	2,8	3,08	3,50	3,53	4,41	3,47	3,72	7	3	6	5	5,25
30	0,0	2,7	2,4	1,6	2,80	3,47	4,41	3,46	3,53	3,71	7	6	7	3	5,75
31	2,6	2,9	0,0	2,7	3,24	2,18	3,47	3,47	4,41	3,52	5	7	7	6	6,25
32	3,5	3,5	3,2	2,6	3,44	3,54	3,54	2,18	3,47	3,30	6	6	5	5	5,50

- **CORRIDA OCRA AG**

CORRIDA	Tiempo(seg)	Tiempo(Min)	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
1	245	4,08333333	39,7375	4,312335	5,737697
2	320	5,33333333	39,5175	4,294577	5,97367
3	304	5,06666667	38,655	4,163126	5,805805
4	227	3,78333333	40,7375	4,403663	5,970776
5	255	4,25	39,7375	4,242144	5,970776
6	243	4,05	38,4075	4,294577	5,970776
7	230	3,83333333	37,2975	4,312335	5,72435
8	321	5,35	39,7375	4,129282	5,986806
9	259	4,31666667	37,5725	4,163126	5,970776
10	256	4,26666667	38,655	4,403663	5,974434
Max	321	5,35	40,7375	4,403663	5,986806
Min	227	3,78333333	37,2975	4,129282	5,72435
Promedio	266	4,43333333	39,0055	4,2718828	5,9085866

TRABAJADOR	Manipulación de Carga					Repetitividad					Postura Forzada				
	R1	R2	R3	R4	NIOSH (SLI)	R1	R2	R3	R4	OCRA	R1	R2	R3	R4	RULA
1	2,6	2,6	0,3	2,7	4,09	3,46	2,18	3,50	4,41	3,54	7	5	5	6	5,75
2	2,2	2,4	2,4	1,6	2,39	2,54	3,46	3,46	3,53	3,14	4	7	7	3	5,25
3	2,7	2,9	2,6	2,4	3,98	4,41	3,47	3,46	3,46	3,72	6	5	7	7	6,25
4	2,6	2,7	1,6	2,9	3,18	2,18	4,41	3,53	3,47	3,54	5	6	3	7	5,25
5	0,0	2,6	2,6	2,7	2,96	0,84	3,50	3,50	4,41	2,63	3	7	7	6	5,75
6	0,0	2,6	2,7	1,7	2,89	0,58	3,50	4,41	3,89	2,32	4	7	6	7	6,00
7	2,9	2,6	2,9	1,6	3,16	3,47	3,47	3,47	3,46	3,47	5	5	5	7	5,50

TRABAJADOR	Manipulación de Carga					Repetitividad					Postura Forzada				
	R1	R2	R3	R4	NIOSH (SLI)	R1	R2	R3	R4	OCRA	R1	R2	R3	R4	RULA
8	3,2	1,6	3,5	2,6	3,83	2,18	3,46	3,54	3,50	3,22	5	7	6	7	6,25
9	2,6	0,0	2,7	2,8	3,10	3,47	0,84	4,41	4,41	3,03	5	3	6	7	5,25
10	1,6	1,6	0,0	2,7	2,80	3,53	3,53	0,58	4,41	2,62	3	3	4	6	4,00
11	1,2	2,6	2,9	2,6	3,08	3,46	3,47	3,47	3,47	3,47	7	5	7	5	6,00
12	2,8	3,5	2,2	2,9	3,84	3,47	3,54	2,54	3,47	3,17	5	6	4	5	5,00
13	2,9	2,8	2,6	0,0	3,25	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	7	5	5	7	6,00
14	2,6	2,9	2,6	2,8	3,24	3,50	3,47	3,47	3,47	3,48	7	7	5	5	6,00
15	2,6	0,0	2,9	1,2	3,14	3,50	3,47	3,47	3,46	3,47	7	7	5	7	6,50
16	2,7	1,6	3,2	2,6	3,44	4,41	3,53	2,18	3,47	3,54	6	3	5	5	4,75
17	2,3	2,6	2,6	1,6	4,31	2,31	3,46	3,47	3,53	3,21	7	7	5	3	5,50
18	2,8	0,3	1,2	2,3	3,39	3,47	3,50	3,46	2,31	3,14	5	5	7	7	6,00
19	2,6	2,3	0,0	0,3	3,14	3,47	2,31	3,47	3,50	3,17	5	7	7	5	6,00
20	3,5	0,0	2,8	3,5	3,84	3,54	0,58	4,41	3,54	2,43	6	4	7	6	5,75
21	2,7	2,7	0,0	2,6	2,95	4,41	4,41	0,84	3,50	2,96	6	6	3	7	5,50
22	2,8	2,6	2,6	2,6	2,94	4,41	3,47	3,47	3,47	3,67	7	5	5	5	5,50
23	0,0	3,5	2,3	2,9	3,82	3,47	3,54	2,31	3,47	3,20	7	6	7	5	6,25
24	2,6	2,6	2,6	2,6	4,09	3,47	3,47	2,18	3,46	3,28	5	5	5	7	5,50
25	1,7	2,7	2,8	3,2	3,60	3,89	4,41	3,47	2,18	3,60	7	6	5	5	5,75
26	0,3	2,9	1,7	2,6	3,10	3,50	3,47	3,89	2,18	3,33	5	5	7	5	5,50
27	1,6	3,2	2,6	3,5	3,83	3,53	2,18	3,50	3,54	3,30	3	5	7	6	5,25
28	2,9	1,2	2,8	2,8	3,14	3,47	3,46	3,47	3,47	3,47	5	7	5	5	5,50
29	2,6	2,8	3,5	2,2	3,79	3,47	3,47	3,54	2,54	3,17	5	5	6	4	5,00
30	1,6	2,2	1,6	2,6	2,18	3,46	2,54	3,53	3,47	3,17	7	4	3	5	4,75
31	3,5	2,8	2,7	0,0	3,84	3,54	4,41	4,41	0,58	2,62	6	7	6	4	5,75
32	2,4	1,7	1,6	0,0	2,39	3,46	3,89	3,46	0,84	2,44	7	7	7	3	6,00

- **CORRIDA RULA AG**

CORRIDA	Tiempo(seg)	Tiempo(Min)	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
1	244	4,06666667	32,4175	4,163126	8,253261
2	221	3,68333333	32,4175	4,294577	7,715594
3	224	3,73333333	32,6375	4,294577	8,630525
4	234	3,9	32,4175	4,163126	7,726477
5	230	3,83333333	32,9125	4,242144	8,755961
6	230	3,83333333	32,9125	4,163126	9,248
7	228	3,8	32,6375	4,163126	9,017703
8	230	3,83333333	32,4175	4,129282	8,437962
9	231	3,85	32,4175	4,163126	8,207365
10	231	3,85	32,4175	4,242144	8,968254

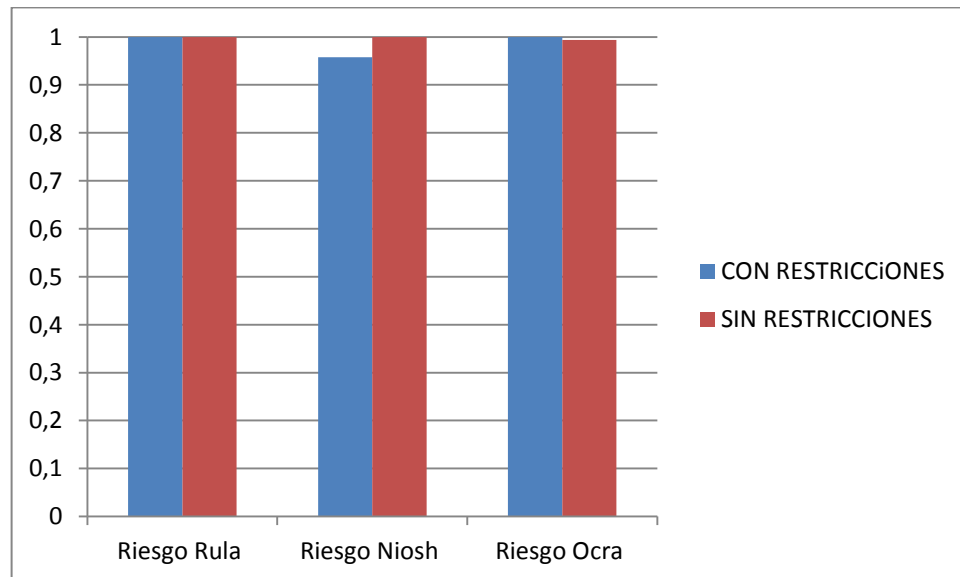
CORRIDA	Tiempo(seg)	Tiempo(Min)	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA
Max	244	4,06666667	32,9125	4,294577	9,248
Min	221	3,68333333	32,4175	4,129282	7,715594
Promedio	230,3	3,83833333	32,5605	4,2018354	8,4961102

TRABAJADOR	Manipulación de Carga					Repetitividad					Postura Forzada				
	R1	R2	R3	R4	NIOSH (SLI)	R1	R2	R3	R4	OCRA	R1	R2	R3	R4	RULA
1	1,7	2,9	2,6	2,8	3,17	3,89	3,47	3,47	3,47	3,53	7	5	5	5	5,50
2	2,2	2,3	2,6	3,5	3,83	2,54	2,31	2,18	3,54	2,64	4	7	5	6	5,50
3	0,0	3,5	2,8	2,9	3,68	3,47	3,54	3,47	3,47	3,49	7	6	5	5	5,75
4	2,6	2,7	2,3	2,6	3,14	3,47	4,41	2,31	3,47	3,40	5	6	7	5	5,75
5	2,7	1,6	1,6	2,9	3,17	4,41	3,53	3,46	3,47	3,70	6	3	7	7	5,75
6	2,4	2,7	2,6	1,6	2,92	3,46	4,41	3,50	3,53	3,75	7	6	7	3	5,75
7	2,7	0,0	2,8	2,4	3,05	4,41	0,58	3,47	3,46	2,44	6	4	5	7	5,50
8	2,7	2,2	2,6	2,7	4,10	4,41	2,54	3,46	4,41	3,53	6	4	7	6	5,75
9	2,8	0,0	2,2	1,2	2,92	3,47	3,47	2,54	3,46	3,14	5	7	4	7	5,75
10	2,6	1,2	0,0	2,6	2,85	3,50	3,46	0,84	3,47	2,49	7	7	3	5	5,50
11	2,8	0,0	0,0	2,7	2,94	4,41	0,84	3,47	4,41	3,01	7	3	7	6	5,75
12	2,6	2,7	2,7	1,6	2,96	3,50	4,41	4,41	3,53	3,97	7	6	6	3	5,50
13	2,6	3,2	1,6	0,0	4,24	3,46	2,18	3,53	3,47	3,29	7	5	3	7	5,50
14	2,9	2,6	2,4	2,6	3,08	3,47	3,47	3,46	3,50	3,47	5	5	7	7	6,00
15	2,9	1,6	0,0	2,6	3,49	3,47	3,53	0,58	3,46	2,37	7	3	4	7	5,25
16	1,6	2,6	1,2	0,0	3,87	3,53	3,46	3,46	0,58	2,25	3	7	7	4	5,25
17	1,6	2,9	1,7	2,2	3,16	3,46	3,47	3,89	2,54	3,16	7	5	7	4	5,75
18	2,9	2,6	2,7	1,6	3,08	3,47	3,47	4,41	3,46	3,69	5	5	6	7	5,75
19	0,3	2,6	2,6	2,8	2,92	3,50	3,50	3,47	3,47	3,48	5	7	5	5	5,50
20	2,6	3,5	2,6	3,2	3,68	3,47	3,54	3,47	2,18	3,30	5	6	5	5	5,25
21	3,5	2,6	3,2	2,9	3,83	3,54	3,50	2,18	3,47	3,27	6	7	5	5	5,75
22	0,0	2,8	3,5	3,5	2,94	0,58	4,41	3,54	3,54	2,43	4	7	6	6	5,75
23	0,0	1,7	2,9	2,3	3,82	0,84	3,89	3,47	2,31	2,37	3	7	7	7	6,00
24	2,3	2,4	1,6	0,3	3,64	2,31	3,46	3,53	3,50	3,17	7	7	3	5	5,50
25	2,8	0,3	2,8	1,7	3,03	3,47	3,50	4,41	3,89	3,82	5	5	7	7	6,00
26	3,5	2,6	2,9	2,6	3,83	3,54	2,18	3,47	3,50	3,27	6	5	5	7	5,75
27	2,6	2,9	2,9	2,6	3,08	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	5	7	5	5	5,50
28	1,2	2,6	0,3	0,0	1,19	3,46	3,47	3,50	0,84	2,52	7	5	5	3	5,00
29	1,6	1,6	2,6	2,6	2,78	3,53	3,46	3,50	3,47	3,49	3	7	7	5	5,50
30	2,6	2,8	2,6	2,7	3,08	2,18	3,47	3,47	4,41	3,52	5	5	5	6	5,25
31	2,6	2,8	2,7	2,6	2,95	3,47	3,47	4,41	2,18	3,52	5	5	6	5	5,25
32	3,2	2,6	3,5	2,8	3,84	2,18	3,47	3,54	4,41	3,54	5	5	6	7	5,75

ANEXO 4 - Contraste de Algoritmo Genético Multiobjetivo, Con Restricciones o Limitaciones y sin Restricciones o Limitaciones

- Resultado de Corridos sin Considerar la Limitaciones o Limitaciones.

CORRIDA	Tiempo(seg)	Tiempo(Min)	Riesgo RULA	Riesgo NIOSH	Riesgo OCRA	Domina
1	249	4,15	32,6375	3,675989	5,97367	2
2	252	4,2	32,6375	3,675989	5,974434	0
3	260	4,33	32,6375	3,675837	5,67109	5
4	245	4,08	32,4175	3,675989	5,984912	1
5	246	4,1	32,4175	3,675989	5,974434	3
6	239	3,98	32,9125	3,675837	5,97367	0
7	246	4,1	32,9125	3,867098	5,661671	0
8	261	4,35	32,6375	3,675989	5,97367	2
9	241	4,02	32,6375	3,675989	5,971756	3
10	245	4,08	32,4175	3,675989	5,984912	1
Max	261	4,35	32,9125	3,867098	5,984912	5
Min	239	3,98	32,4175	3,675837	5,661671	0
Promedio	248,4	4,14	32,6265	3,6950695	5,9144219	1,7



ANEXO 5 - Modelos de Rotación Laboral Desarrollados en GAMS

MODELO NIOSH (PROGRAMACION LINEAL ENTERA)

\$Title ROTACION LABORAL DE PUESTOS DE TRABAJO - ESQUEMA MANIPULACION DE CARGA - NIOSH

\$ontext

Modelo para la Rotación Laboral de Puestos de Trabajo, tomando en consideración la manipulación de carga, bajo el Método NIOSH.

Holman Ospina Mateus, Dic 2012

\$offtext

Set

I Cantidad de Trabajadores /Datos.../

J Puesto de Trabajo/Datos.../

T Periodos para la Rotación Laboral Tiempo /Datos.../

H Cantidad de Jornadas de 4 horas /Datos.../;

alias (J,Q);

scalar LC Constante de Carga /Datos..../;

parameter HM(J) Distancia Horizontal
 VM(J) Distancia Vertical
 DM(J) Distancia de Desplazamiento
 AM(J) Factor de Asimetría de Movimiento
 FM(J) Factor de Movimiento Normal
 FMM(J) Factor de Movimiento Máximo
 CM(J) Factor de Agarre
 PC(J) Peso Manipulado
 NIOSH(J) Riesgo NIOSH de la Tarea J
 NIOSHMAX(J) Riesgo Máximo de la Tarea J
 SLI(J,Q) Riesgo Calculado de Realizar la tarea J y Q en 4 horas;

table NIOSHdata Datos para el Calculo de Riesgo Ergonómico NIOSH

	HM	VM	DM	AM	FM	FMM	CM	PC
1	x	x	x	x	x	x	x	x
2	x	x	x	x	x	x	x	x
n	...	...	...	...	...	...	...	...

HM(J) = NIOSHdata (J,'HM') ;

VM(J) = NIOSHdata (J,'VM') ;

DM(J) = NIOSHdata (J,'DM') ;

AM(J) = NIOSHdata (J,'AM') ;

FM(J) = NIOSHdata (J,'FM') ;

FMM(J) = NIOSHdata (J,'FMM') ;

CM(J) = NIOSHdata (J,'CM') ;

PC(J) = NIOSHdata (J,'PC') ;

NIOSH(J)=((PC(J))/(LC*HM(J)*VM(J)*DM(J)*AM(J)*FM(J)*CM(J)));

NIOSHMAX(J)=((PC(J))/(LC*HM(J)*VM(J)*DM(J)*AM(J)*FMM(J)*CM(J)));

SLI(J,Q)\$((ord(J) ne ord(Q)) and (NIOSHMAX(J)> NIOSHMAX(Q)))
 = NIOSH(J)+(NIOSHMAX(J)-NIOSH(J))*((0.5*(NIOSHMAX(J)+NIOSHMAX(Q)))/NIOSHMAX(J));

$SLI(J,Q) \begin{cases} \text{ord}(J) \neq \text{ord}(Q) & \text{and} \quad (NIOSHMAX(J) < NIOSHMAX(Q)) \\ \text{ord}(J) = \text{ord}(Q) & \end{cases} = NIOSH(Q) + (NIOSHMAX(Q) - NIOSH(Q)) * ((0.5 * (NIOSHMAX(J) + NIOSHMAX(Q))) / NIOSHMAX(Q));$
 $SLI(J,Q) \begin{cases} \text{ord}(J) \neq \text{ord}(Q) \\ \text{ord}(J) = \text{ord}(Q) \end{cases} = NIOSHMAX(J);$

table Pena(I,J) Penalización de los puestos de trabajo x trabajadores

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
n	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

**Binaria de Asignación de Puestos de Trabajo*

binary Variables X(I,J,T);

**Min Máximo Riesgo Total*

Variables M , ERGO_NIOSH;

**Riesgo percibido por Trabajador en Jornada;*

Variables SLITRA(I,H);

**Variable de asignación en secuencia con precedencia*

binary Variables R(I,J,Q,T) ;

Equations

FO Función Objetivo (Manipulación de Carga)
 R1(J,T) Un Trabajador en un Puesto de Trabajo
 R2(I,T) Un Puesto de Trabajo con un Trabajador
 R3(I) Calculo de Riesgo en Trabajador NIOSH Jornada 1
 R4(I) Calculo de Riesgo en Trabajador NIOSH Jornada 2
 R5(I,H) Minimiza el máximo riesgo NIOSH (Jornada +Trabajador)
 R6(I,J,Q,T) Restricción de Asignación de secuencia de trabajos P1
 R7(I,J,Q,T) Restricción de Asignación de secuencia de trabajos P2
 R8(I,J,Q,T) Restricción de Asignación de secuencia de trabajos P1
 R9(I,J,T) Restricción por Penalización de Puestos de Trabajo;

FO..M=e=ERGO_NIOSH;
 R1(J,T)..sum((I),X(I,J,T))=e= 1;
 R2(I,T)..sum((J),X(I,J,T))=e= 1;
 R3(I)..SLITRA(I,'1') =e= sum ((J,Q),SLI(J,Q)*R(I,J,Q,'1'));
 R4(I)..SLITRA(I,'2') =e= sum ((J,Q),SLI(J,Q)*R(I,J,Q,'3'));
 R5(I,H)..SLITRA(I,H) =|= ERGO_NIOSH;
 R6(I,J,Q,T)\$(ord (T) lt 4).. X(I,J,T) + X(I,Q,T+1) - R(I,J,Q,T) =|= 1;
 R7(I,J,Q,T)\$(ord (T) lt 4)..-X(I,J,T) + R(I,J,Q,T) =|= 0;
 R8(I,J,Q,T)\$(ord (T) lt 4)..-X(I,Q,T+1) + R(I,J,Q,T) =|= 0;
 R9(I,J,T).. X(I,J,T)=|= Pena(I,J);

Model Taller /all/;

Solve Taller Minimizing M using mip ;

OPTION ITERLIM=3000000; **OPTION** RESLIM= 3000000;

OPTION subsystems;**OPTION** lp = xa;

OPTION optca=0;**OPTION** optcr=0.01;

**Consolidación de Datos Depurados*

**Consolidación en la Asignación de Puestos de Trabajo*

parameter Y(I,T);

Y(I,T) = sum(J,ord (J)*X.I(I,J,T));

Display M.L ; **Display** X.L ;**Display** R.L ; **Display** SLITRA.L ; **Display** Y, NIOSH,NIOSHMAX ,SLI;

MODELO OCRA ((PROGRAMACION LINEAL ENTERA))

\$Title ROTACION LABORAL DE PUESTOS DE TRABAJO - ESQUEMA REPETITIVIDAD -OCRA

\$ontext

Modelo para la Rotación Laboral de Puestos de Trabajo, tomando en consideración la repetitividad de actividades, bajo el Método OCRA, considerando la variabilidad en las actividades.

Holman Ospina Mateus, Dic 2012

\$offtext

Set

I Cantidad de Trabajadores /Datos/

J Puesto de Trabajo/Datos/

T Periodos para la Rotación Laboral tiempo /Datos/ ;

alias (J,Q);

parameter Time(T) Duración de los Periodos de Rotación

/ 1 X

2 X

3 X

4 X /;

parameter FF(J) Frecuencia de Actividad por Minuto

FM(J) Factor de Fuerza - Constante

PM(J) Factor de Postura

RM(J) Factor de Repetitividad

AM(J) Factor de Otros Aspectos - Adicionales

OCRA(J) Nivel de Riesgo de Puesto de Trabajo

Vari(J,Q);

table OCRAdata Datos para el Calculo de Riesgo Ergonómico OCRA

	FF	FM	PM	RM	AM
1	X	X	X	X	X
2	X	X	X	X	X
N	...	...	...	...	...

 ;

FF(J) = OCRAdata (J,'FF');

FM(J) = OCRAdata (J,'FM');

PM(J) = OCRAdata (J,'PM');

RM(J) = OCRAdata (J,'RM');

AM(J) = OCRAdata (J,'AM');

scalar Dura Duración de Toda Jornada Laboral / 7 /;

scalar KF Factor de Movimientos Estándar / 30 /;

scalar DM Factor de recuperación en jornada / 1 /;

scalar RCM Factor de Duración de jornada / 0.6 /;

OCRA(J) = FF(J) / (FM(J)*PM(J)*RM(J)*AM(J)*KF*DM*RCM);

Vari(J,Q)\$ (OCRA(J)<2.3 and OCRA(Q)<2.3)=0;

Vari(J,Q)\$ (OCRA(J)<2.3 and OCRA(Q)>=2.3 and OCRA(Q)<3.5)=0;

Vari(J,Q)\$ (OCRA(J)<2.3 and OCRA(Q)>=3.5)=0;

$\text{Vari}(J,Q)\$(\text{OCRA}(J)\geq 2.3 \text{ and } \text{OCRA}(J)<3.5 \text{ and } \text{OCRA}(Q)<2.3)=0;$
 $\text{Vari}(J,Q)\$(\text{OCRA}(J)\geq 2.3 \text{ and } \text{OCRA}(J)<3.5 \text{ and } \text{OCRA}(Q)\geq 2.3 \text{ and } \text{OCRA}(Q)<3.5)=2;$
 $\text{Vari}(J,Q)\$(\text{OCRA}(J)\geq 2.3 \text{ and } \text{OCRA}(J)<3.5 \text{ and } \text{OCRA}(Q)\geq 3.5)=3;$

$\text{Vari}(J,Q)\$(\text{OCRA}(J)\geq 3.5 \text{ and } \text{OCRA}(Q)<2.3)=0;$
 $\text{Vari}(J,Q)\$(\text{OCRA}(J)\geq 3.5 \text{ and } \text{OCRA}(Q)\geq 2.3 \text{ and } \text{OCRA}(Q)<3.5)=2;$
 $\text{Vari}(J,Q)\$(\text{OCRA}(J)\geq 3.5 \text{ and } \text{OCRA}(Q)\geq 3.5)=4;$

table Pena(I,J) Penalización de los puestos de trabajo x trabajadores

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
n	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

table Relax(T,T) Constante de Relax

	1	2	3	4
1	0	0	0	0
2	0	0	1	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0

**Binaria de Asignación de Puestos de Trabajo*

binary Variables X(I,J,T);

**Min Máximo Riesgo Total*

Variables Z , ERGO_OCRA;

**Riesgo percibido por Trabajador;*

Variables OCRAT(I);

**Variable de asignación en secuencia con precedencia*

binary Variables R(I,J,Q,T) ;

**Variación de Penalización de Riesgo del Trabajador*

Variables VARITRA(I,T);

**Variación de Riesgo del Trabajador Total*

Variables RVL(I);

Equations

FO Función Objetivo (Repetitividad)
 R1(J,T) Un Trabajador en un Puesto de Trabajo
 R2(I,T) Un Puesto de Trabajo con un Trabajador
 R3(I) Calculo de Riesgo en Trabajador (OCRA + Variabilidad)
 R4(I) Minimiza el máximo riesgo
 R5(I,J,Q,T) Restricción de Asignación de secuencia de trabajos P1
 R6(I,J,Q,T) Restricción de Asignación de secuencia de trabajos P2
 R7(I,J,Q,T) Restricción de Asignación de secuencia de trabajos P1
 R8(I,T) Calculo de penalización por Variación de Riesgo
 R9(I) Calculo de Variación de Riesgo del Trabajador Total
 R10(I,J,T) Restricción por Penalización de Puestos de Trabajo;

FO..Z=e=ERGO_OCRA;

R1(J,T)..sum((I),X(I,J,T))=e= 1;

R2(I,T)..sum((J),X(I,J,T))=e= 1;

R3(I)..OCRAT(I) =e= sum ((J,T),OCRA(J)* X(I,J,T));

R4(I).. OCRAT(I)+RVL(I) != ERGO_OCRA;

R5(I,J,Q,T)\$(ord (T) lt 4).. X(I,J,T) + X(I,Q,T+1)- R(I,J,Q,T) != 1;

$R6(I,J,Q,T) \$(ord(T) \le 4) \dots -X(I,J,T) + R(I,J,Q,T) = 0;$
 $R7(I,J,Q,T) \$(ord(T) \le 4) \dots -X(I,Q,T+1) + R(I,J,Q,T) = 0;$
 $R8(I,T) \$(ord(T) < 4) \dots VARITRA(I,T) = e = \text{sum}(J,Q, (Vari(J,Q) * R(I,J,Q,T)));$
 $R9(I) \dots RVL(I) = e = \text{sum}(T) \$(ord(T) < 4), (VARITRA(I,T) * ((Time(T) + Time(T+1)) / Dura) - Relax(T, T+1));$
 $R10(I,J,T) \dots X(I,J,T) = Pena(I,J);$

Model Taller /all;
Solve Taller Minimizing Z using mip ;

OPTION ITERLIM=3000000;

OPTION subsystems;
OPTION lp = xa;
OPTION optca=0;
OPTION optcr=0.01;

**Consolidación de Datos Depurados*

**Acciones Técnicas Reales*

parameter ATA(I);

**Acciones Técnica Calculado*

parameter RTA(I);

**Acciones Técnica Trabajador en Index OCRA*

parameter INDOCRA(I);

**Variación por periodo t*

parameter RaVL(I,T);

**Consolidación en la Asignación de Puestos de Trabajo*

parameter Y(I,T);

$ATA(I) = \text{sum}(T,J, X.I(I,J,T) * FF(J) * Time(T));$

$RTA(I) = \text{sum}(T,J, X.I(I,J,T) * FM(J) * PM(J) * RM(J) * AM(J) * KF * DM * RCM * Time(T));$

$INDOCRA(I) = ATA(I) / RTA(I);$

$RaVL(I,T) \$(ord(T) < 4) = VARITRA.I(I,T) * ((Time(T) + Time(T+1)) / Dura) - Relax(T, T+1);$

$Y(I,T) = \text{sum}(J, ord(J) * X.I(I,J,T));$

Display Z.L ;
Display X.L ;
Display R.L ;
Display RVL.L ;
Display VARITRA.L ;
Display OCRAT.L;
Display Y, INDOCRA, ATA,RTA,RaVL,OCRA;

MODELO RULA ((PROGRAMACION LINEAL ENTERA))

\$Title ROTACION LABORAL DE PUESTOS DE TRABAJO - ESQUEMA POSTURA- RULA OPCION 1

\$ontext

Modelo para la Rotación Laboral de Puestos de Trabajo, tomando en consideración la posturas forzadas o inadecuadas, bajo el Método RULA, considerando la variabilidad en las actividades.

Holman Ospina Mateus, Dic 2012

\$offtext

Set

I Cantidad de Trabajadores /Datos/

J Puesto de Trabajo/Datos/

T Periodos para la Rotación Laboral tiempo /Datos/ ;

alias (J,L);

parameter Time(T) Duración de los Periodos de Rotación

/ 1 X

2 X

3 X

4 X /;

parameter TimeAcu(T) Duración de los Periodos de Rotación

/ 1 X

2 X

3 X

4 X /;

table Relax(T,T) Constante de Relax

1 2 3 4

1 0 0 0 0

2 0 0 1 0

3 0 0 0 0

4 0 0 0 0 ;

parameter E(J) Nivel de Valoración Ergonómico RULA

/ 1 X

2 X

N ... /;

scalar RED Factor de Reducción / 0.33 /;

parameter FT(J,L,T) Factor de Fatiga por Postura Laboral;

$FT(J,L,'1') = 1 + RED * (((E(J) * Time('1')) / TimeAcu('1')) + ((E(L) * Time('2')) / TimeAcu('2')));$

$FT(J,L,'2') = 1 + RED * (((E(J) * Time('2')) / TimeAcu('2')) + ((E(L) * Time('3')) / TimeAcu('3')));$

$FT(J,L,'3') = 1 + RED * (((E(J) * Time('3')) / TimeAcu('3')) + ((E(L) * Time('4')) / TimeAcu('4')));$

table Pena(I,J) Penalización de los puestos de trabajo x trabajadores

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

1 x x x x x x x x x x x x x x

n ;

**Binaria de Asignación de Puestos de Trabajo*

binary Variables X(I,J,T);

**Variable de asignación en secuencia con precedencia*

binary Variables R(I,J,L,T) ;

**Variable de Nivel Ergo RULA, y Variación RULA*

Variables ERGOTRA(I),RVRULA (I),VARIRULA(I,T) ;

**Min Máximo Riesgo Total*

Variables N , ERGO_RULA, REP;

Equations

FO Función Objetivo (Postura forzada)
R1(J,T) Un trabajador en un puesto de trabajo
R2(I,T) Un Puesto de trabajo con un trabajador
R3(I) Acumulación de riesgo RULA Por trabajador
R4(I) Consolidación de RULA y variación
R5(I,J,L,T) Restricción de asignación de secuencia de trabajos P1
R6(I,J,L,T) Restricción de asignación de secuencia de trabajos P2
R7(I,J,L,T) Restricción de asignación de secuencia de trabajos P3
R8(I,T) Calculo de penalización de variación por trabajadores
R9(I) Calculo de Variación de riesgo del trabajador total
R10(I,J) Calculo de puestos repetidos por trabajador

;

FO..N=e=ERGO_RULA + REP ;
R1(J,T)..sum((I),X(I,J,T))=e= 1;
R2(I,T)..sum((J),X(I,J,T))=e= 1;
R3(I).. sum((J,T), E(J)* X(I,J,T))=I=ERGOTRA(I);
R4(I)..ERGOTRA(I) + RVRULA (I) =I= ERGO_RULA;
R5(I,J,L,T)\$**(ord (T) lt 4)**.. X(I,J,T) + X(I,L,T+1)- R(I,J,L,T) =I= 1;
R6(I,J,L,T)\$**(ord (T) lt 4)**..-X(I,J,T) + R(I,J,L,T)=I= 0;
R7(I,J,L,T)\$**(ord (T) lt 4)**..-X(I,L,T+1)+ R(I,J,L,T)=I= 0;
R8(I,T)\$**(ord(T)<4)**..VARIRULA(I,T)=e=sum((J,L),(FT(J,L,T)*R(I,J,L,T)));
R9(I)..RVRULA(I)=e= sum((T)\$**(ord(T)<4)**,(VARIRULA(I,T)- Relax(T,T+1)));
R10(I,J)..(sum((T), X(I,J,T)))=I= REP;

Model Taller /all/;

Solve Taller Minimizing N using mip ;

OPTION ITERLIM=300000;

OPTION RESLIM=100000;

OPTION subsystems;

OPTION lp = xa;

option optcr=0;

option optca=0.01;

**Consolidación en la Asignación de Puestos de Trabajo*

parameter Y(I,T);

Y(I,T) = sum(J,**ord** (J)*X.I(I,J,T));

Display Y,FT;

Display N.L ; **Display** X.L ;

Display R.L ; **Display** ERGOTRA.L;

Display RVRULA.L; **Display** ERGO_RULA.L;**Display** REP.L;

ANEXO 6 - Aplicación de Programa Ejecutable para la Rotación Laboral Multiobjetivo

En el diseño de un modelo de rotación laboral multiobjetivo de que prevengan los riesgos ergonómicos en actividades repetitivas, manipulación de carga y posturas forzadas, se desarrolló la programación del Algoritmo Genético Multiobjetivo en lenguaje Java bajo la plataforma de Eclipse. La aplicación diseñada permite la configuración de los datos de entrada (Parámetros del AG, Problema) bajo una hoja de datos estructurada en Ms Excel para luego Ejecutar el programa, y finalmente trasladar automáticamente la información compactada y generada en la ejecución en una nueva hoja de datos.

A continuación se describe el modo de aplicación del programa desarrollado:

1. Abrir la carpeta "EJECUTABLE DE ROTACION LABORAL MULTI OBJETIVO".
2. Configurar la Información del Problema el Documento de MS EXCEL "Datos.xls" y guardar.

3. Ejecutar la Aplicación "MODELO DE ROTACION LABORAL MULTI OBJETIVO ERGONOMICO.JAR".



MODELO DE ROTACION LABORAL MULTI OBJETIVO ERGONOMICO.jar

4. Abrir la hoja de MS EXCEL con las respuestas "RESULTADO_MULTI OBJETIVO_ROTA_LABO.xls".

El Código del Algoritmo Genético Multiobjetivo Implementado es:

```
//Declaración de Paquetes y Librerías
package COMPLETOS;
import java.io.File;
import jxl.Cell;
import jxl.Sheet;
import jxl.Workbook;
import jxl.write.Label;
import jxl.write.Number;
import jxl.write.WritableSheet;
import jxl.write.WritableWorkbook;
import java.awt.Desktop;
import java.io.File;
import java.io.IOException;

//Apertura de Main de Enlace Principal
public class COMPLETO_AG_SINPRINT_SINGEN {

public static void main(String[] args) {
    //Declaracion de Variables, Vectores y Matrices del Problema
    long time_start, time_end;
    time_start = System.currentTimeMillis();
    int TotalTrabajadores;
    int TotalPuestosDeTrabajo;
    int TotalJornadas;
    int TamanoPoblacion;
    double DuracionTotal;
    int Generaciones;
    int Individuos[][];
    int Individuosprint [][];
    int Secuencia[];
    int k=0;
    double RiesgoRulaPuesto[];
    double FactorReduccionRula;
    double DuracionJornada[];
    double RiesgoNioshHM[];
    double RiesgoNioshVM[];
    double RiesgoNioshDM[];
    double RiesgoNioshAM[];
    double RiesgoNioshFM[];
    double RiesgoNioshFMM[];
    double RiesgoNioshCM[];
    double RiesgoNioshPC[];
    int FactorCargaNiosh;
    double RiesgoOcraFF[];
    double RiesgoOcraFM[];
    double RiesgoOcraPM[];
    double RiesgoOcraRM[];
    double RiesgoOcraAM[];
    double FactorMovimientoOcra;
    double FactorRecuperacionOcra;
    double FactorDuracionOcra;
    double FactorRelaxOcra;
    int Penalizacion[];
    double Elitismo;
    double Pcruce;
    double PMutacion;
```

```

double IntMutacion;
double ConjuNodominante;
int ORDENFITNESS[];
double FitnessRula[][];
double FitnessTotalRula[];
double FitnessOcra[][];
double FitnessTotalOcra [];
double FitnessNiosh[][];
double FitnessTotalNIOSH[];
double FitnessDominant[];
double MEJORRESPUESTARULA[];
double MEJORRESPUESTAOCRA[];
double MEJORRESPUESTANIOSH[];
double MEJORRESPUESTADOMINANTE[];
double nicho1;
double nicho2;
double nicho3;
double nicho4;
double nicho5;

```

```

try{ /// Lectura de MS Excel
Workbook workbook = Workbook.getWorkbook(new File("DATOS.xls"));
Sheet Hoja1 = workbook.getSheet(0);
Cell b1 = Hoja1.getCell(1,0);
String indb1 = b1.getContents();
TotalTrabajadores = Integer.parseInt(indb1);

Cell b2 =Hoja1.getCell(1,1);
String Indb2= b2.getContents();
TotalPuestosDeTrabajo=Integer.parseInt(Indb2);
Cell b3 =Hoja1.getCell(1,2);
String Indb3= b3.getContents();
TotalJornadas=Integer.parseInt(Indb3);
Cell b4 =Hoja1.getCell(1,3);
String Indb4 = b4.getContents();
TamanoPoblacion=Integer.parseInt(Indb4);
Cell b5 =Hoja1.getCell(1,4);
String Indb5 = b5.getContents();
Generaciones=Integer.parseInt(Indb5);
Cell b6 =Hoja1.getCell(1,5);
String Indb6 = b6.getContents();
DuracionTotal=Double.parseDouble(Indb6);
DuracionJornada=new double [TotalJornadas];

for(int a=0; a<TotalJornadas; a++){
    Cell DJ =Hoja1.getCell(1,6+a);
    String IndDJ = DJ.getContents();
    DuracionJornada[a]=Double.parseDouble(IndDJ);
}

Cell b11 =Hoja1.getCell(1,10);
String Indb11 = b11.getContents();
FactorReduccionRula=Double.parseDouble(Indb11);
RiesgoRulaPuesto=new double[TotalPuestosDeTrabajo];

for(int i=0; i<TotalPuestosDeTrabajo; i++){
    Cell G =Hoja1.getCell(6,i+2);
    String IndiG = G.getContents();
    RiesgoRulaPuesto[i]=Double.parseDouble(IndiG);
}

```

```

}

RiesgoNioshHM = new double[TotalPuestosDeTrabajo];
RiesgoNioshVM = new double[TotalPuestosDeTrabajo];
RiesgoNioshDM = new double[TotalPuestosDeTrabajo];
RiesgoNioshAM = new double[TotalPuestosDeTrabajo];
RiesgoNioshFM = new double[TotalPuestosDeTrabajo];
RiesgoNioshFMM = new double[TotalPuestosDeTrabajo];
RiesgoNioshCM = new double[TotalPuestosDeTrabajo];
RiesgoNioshPC = new double[TotalPuestosDeTrabajo];

for(int i=0; i<TotalPuestosDeTrabajo; i++){
    Cell HM =Hoja1.getCell(18,i+2);
    String IndiHM = HM.getContents();
    RiesgoNioshHM[i]=Double.parseDouble(IndiHM);
    Cell VM =Hoja1.getCell(19,i+2);
    String IndiVM = VM.getContents();
    RiesgoNioshVM[i]=Double.parseDouble(IndiVM);
    Cell DM =Hoja1.getCell(20,i+2);
    String IndiDM = DM.getContents();
    RiesgoNioshDM[i]=Double.parseDouble(IndiDM);
    Cell AM =Hoja1.getCell(21,i+2);
    String IndiAM = AM.getContents();
    RiesgoNioshAM[i]=Double.parseDouble(IndiAM);
    Cell FM =Hoja1.getCell(22,i+2);
    String IndiFM = FM.getContents();
    RiesgoNioshFM[i]=Double.parseDouble(IndiFM);
    Cell FMM =Hoja1.getCell(23,i+2);
    String IndiFMM = FMM.getContents();
    RiesgoNioshFMM[i]=Double.parseDouble(IndiFMM);
    Cell CM =Hoja1.getCell(24,i+2);
    String IndiCM = CM.getContents();
    RiesgoNioshCM[i]=Double.parseDouble(IndiCM);
    Cell PC =Hoja1.getCell(25,i+2);
    String IndiPC = PC.getContents();
    RiesgoNioshPC[i]=Double.parseDouble(IndiPC);
}

Cell b16 =Hoja1.getCell(1,15);
String Indb16 = b16.getContents();
FactorCargaNiosh=Integer.parseInt(Indb16);
RiesgoOcraFF=new double[TotalPuestosDeTrabajo];
RiesgoOcraFM=new double[TotalPuestosDeTrabajo];
RiesgoOcraPM=new double[TotalPuestosDeTrabajo];
RiesgoOcraRM=new double[TotalPuestosDeTrabajo];
RiesgoOcraAM=new double[TotalPuestosDeTrabajo];

for(int i=0; i<TotalPuestosDeTrabajo; i++){
    Cell FF =Hoja1.getCell(10,i+2);
    String IndiFF = FF.getContents();
    RiesgoOcraFF[i]=Double.parseDouble(IndiFF);
    Cell FM =Hoja1.getCell(11,i+2);
    String IndiFM = FM.getContents();
    RiesgoOcraFM[i]=Double.parseDouble(IndiFM);
    Cell PM =Hoja1.getCell(12,i+2);
    String IndiPM = PM.getContents();
    RiesgoOcraPM[i]=Double.parseDouble(IndiPM);
    Cell RM =Hoja1.getCell(13,i+2);
    String IndiRM = RM.getContents();
}

```

```

        RiesgoOcraRM[i]=Double.parseDouble(IndiRM);
        Cell AM =Hoja1.getCell(14,i+2);
        String IndiAM = AM.getContents();
        RiesgoOcraAM[i]=Double.parseDouble(IndiAM);
    }

    Cell b12 =Hoja1.getCell(1,11);
    String Indb12 = b12.getContents();
    FactorMovimientoOcra=Double.parseDouble(Indb12);
    Cell b13 =Hoja1.getCell(1,12);
    String Indb13 = b13.getContents();
    FactorRecuperacionOcra=Double.parseDouble(Indb13);
    Cell b14 =Hoja1.getCell(1,13);
    String Indb14 = b14.getContents();
    FactorDuracionOcra=Double.parseDouble(Indb14);
    Cell b15 =Hoja1.getCell(1,14);
    String Indb15 = b15.getContents();
    FactorRelaxOcra=Double.parseDouble(Indb15);

    Penalizacion=new int[TotalTrabajadores][TotalPuestosDeTrabajo];
    for(int i=0; i<TotalPuestosDeTrabajo; i++){
        for(int ii=0; ii<TotalPuestosDeTrabajo; ii++){
            Cell PENA =Hoja1.getCell(29+ii,i+2);
            String IndiPENA = PENA.getContents();
            Penalizacion[i][ii]=Integer.parseInt(IndiPENA);
        }
    }

    Cell b17 =Hoja1.getCell(1,16);
    String Indb17 = b17.getContents();
    Elitismo=Double.parseDouble(Indb17);
    Cell b18 =Hoja1.getCell(1,17);
    String Indb18 = b18.getContents();
    Pcruce=Double.parseDouble(Indb18);
    Cell b19 =Hoja1.getCell(1,18);
    String Indb19 = b19.getContents();
    PMutacion=Double.parseDouble(Indb19);
    Cell b20 =Hoja1.getCell(1,19);
    String Indb20 = b20.getContents();
    IntMutacion=Double.parseDouble(Indb20);
    Cell b21 =Hoja1.getCell(1,20);
    String Indb21 = b21.getContents();
    ConjuNodominante=Double.parseDouble(Indb21);
    Cell b22 =Hoja1.getCell(1,21);
    String Indb22 = b22.getContents();
    nicho1=Double.parseDouble(Indb22);
    Cell b23 =Hoja1.getCell(1,22);
    String Indb23 = b23.getContents();
    nicho2=Double.parseDouble(Indb23);
    Cell b24 =Hoja1.getCell(1,23);
    String Indb24 = b24.getContents();
    nicho3=Double.parseDouble(Indb24);
    Cell b25 =Hoja1.getCell(1,24);
    String Indb25 = b25.getContents();
    nicho4=Double.parseDouble(Indb25);
    Cell b26 =Hoja1.getCell(1,25);
    String Indb26 = b26.getContents();
    nicho5=Double.parseDouble(Indb26);

```

```

MEJORRESPUESTARULA = new double[Generaciones];
MEJORRESPUESTANIOSH = new double[Generaciones];
MEJORRESPUESTAOCRA = new double[Generaciones];
MEJORRESPUESTADOMINANTE = new double[Generaciones];

```

```

Individuos=new int[TamanoPoblacion][TotalPuestosDeTrabajo][TotalJornadas];
Individuosprint=new int[TamanoPoblacion][TotalPuestosDeTrabajo][TotalJornadas];
Secuencia =new int [TotalJornadas][TotalTrabajadores];
ORDENFITNESS=new int [TamanoPoblacion];
FitnessRula=new double[TamanoPoblacion][TotalTrabajadores];
FitnessTotalRula=new double[TamanoPoblacion];
FitnessTotalOcra= new double [TamanoPoblacion];
FitnessOcra=new double [TamanoPoblacion][TotalTrabajadores];
FitnessTotalNIOSH=new double [TamanoPoblacion];
FitnessNiosh=new double [TamanoPoblacion][TotalTrabajadores];
FitnessDominant=new double [TamanoPoblacion];

```

//Creacion de la poblacion inicial de forma aleatoria

```

while(k<TamanoPoblacion){
    for(int a=0;a<TotalJornadas;a++){
        for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
            Secuencia[a][i]=(int)(Math.random()*TotalTrabajadores+1);
            for(int j=0;j<i;j++){
                if(Secuencia[a][i]==Secuencia[a][j]){
                    i--;
                }
            }
            Individuos[k][i][a]= Secuencia[a][i];
        }
    }
}

```

```

k++;
}

```

//Informacion de Turnos de Trabajos y Tiempos

```

double TimeJorAcum[];
TimeJorAcum= new double [TotalJornadas];
double acum =0 ;
for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
    TimeJorAcum[a]= DuracionJornada[a]+acum;
    acum=TimeJorAcum[a];
}

```

//Calculo de métodos de valoración para los puestos de trabajo

```

double NIOSH[];
NIOSH=new double[TotalPuestosDeTrabajo];
double NIOSHMAX[];
NIOSHMAX=new double[TotalPuestosDeTrabajo];

```

```

for(int i=0;i<TotalPuestosDeTrabajo;i++){
    NIOSH[i] = (RiesgoNioshPC[i]) / (FactorCargaNiosh * RiesgoNioshHM[i] * RiesgoNioshVM[i] * RiesgoNioshDM[i] * RiesgoNioshAM[i] *
        RiesgoNioshFM[i] * RiesgoNioshCM[i]);
    NIOSHMAX[i] = (RiesgoNioshPC[i]) / (FactorCargaNiosh * RiesgoNioshHM[i] * RiesgoNioshVM[i] * RiesgoNioshDM[i] * RiesgoNioshAM[i] *
        RiesgoNioshFMM[i] * RiesgoNioshCM[i]);
}

```

double OCRA[];

```

OCRA=new double[TotalPuestosDeTrabajo];
for(int i=0;i<TotalPuestosDeTrabajo;i++){
    OCRA[i] = (RiesgoOcraFF[i]) / (RiesgoOcraFM[i] * RiesgoOcraPM[i] * RiesgoOcraRM[i] * RiesgoOcraAM[i] *
        FactorMovimientoOcra * FactorDuracionOcra * FactorRecuperacionOcra);
}

```

```

}

int gen=0;
while( gen< Generaciones){
    double ERGOTRA[][];
    ERGOTRA=new double[TamanoPoblacion][TotalTrabajadores];
    double RVLRLULA[][];
    RVLRLULA=new double[TamanoPoblacion][TotalTrabajadores];

    for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
        for(int i=0;i <TotalTrabajadores;i++){
            ERGOTRA[p][i]=0;
            RVLRLULA[p][i]=0;
        }
    }

    for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
        for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
            for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
                ERGOTRA[p][i]= RiesgoRulaPuesto[Individuos[p][i][a]-1] + ERGOTRA[p][i];
            }
        }
    }

    for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
        for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
            for(int a=0;a <TotalJornadas-1;a++){
                RVLRLULA[p][i] = (1 + ((FactorReduccionRula))*(((RiesgoRulaPuesto[Individuos[p][i][a]-1]*DuracionJornada[a])/
                    (TimeJorAcum[a]) + ((RiesgoRulaPuesto[Individuos[p][i][a+1]-1] * DuracionJornada[a])
                    /(TimeJorAcum[a+1])))) + RVLRLULA[p][i] ;
            }
        }
    }

    int Nrep[][];
    Nrep=new int [TamanoPoblacion][TotalTrabajadores];
    int NrepMayor[];
    NrepMayor=new int [TamanoPoblacion];
    int auxrep[][];
    auxrep= new int[TamanoPoblacion][TotalTrabajadores][TotalTrabajadores];

    for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
        for(int ii=0;ii<TotalTrabajadores;ii++){
            for(int i=0;i <TotalTrabajadores;i++){
                auxrep[p][i][ii]=0;
                Nrep[p][i]=0;
                NrepMayor[p]=0;
            }
        }
    }

    for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
        for(int ii=0;ii<TotalTrabajadores;ii++){
            for(int i=0;i <TotalTrabajadores;i++){
                for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
                    if(((Individuos[p][i][a]-1) == (ii)){
                        auxrep[p][i][ii]= 1+ auxrep[p][i][ii];
                    }
                }
            }
        }
    }

```

```

    }
    if(auxrep[p][i] > 1){
        Nrep[p][i] = Nrep[p][i] + auxrep[p][i];
    }
}
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int i=0;i <TotalTrabajadores;i++){
        if( NrepMayor[p] < Nrep[p][i]){
            NrepMayor[p] = Nrep[p][i];
        }
    }
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        FitnessRula[p][i] = RVLROLA[p][i] + ERGOTRA[p][i] + NrepMayor[p];
    }
}

double RULAMayor[];
RULAMayor=new double [TamanoPoblacion];
for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    RULAMayor[p]=0;
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int i=0;i <TotalTrabajadores;i++){
        if( RULAMayor[p] < FitnessRula[p][i]){
            RULAMayor[p] = FitnessRula[p][i];
        }
    }
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    FitnessTotalRula[p] = RULAMayor[p] ;
}

double SLI[][];
SLI=new double[TamanoPoblacion][TotalPuestosDeTrabajo][TotalJornadas-1];

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int i=0;i<TotalPuestosDeTrabajo;i++){
        for(int a=0;a <TotalJornadas-1;a++){
            if( (a!=1) & (Individuos[p][i][a] != Individuos[p][i][a+1]) &
                NIOSHMAX[Individuos[p][i][a]-1] > NIOSHMAX[Individuos[p][i][a+1]-1]){
                SLI[p][i][a] = NIOSH [Individuos[p][i][a]-1] + ((NIOSHMAX[Individuos[p][i][a]-1]- NIOSH [Individuos[p][i][a]-1])*
                    ((0.5*(NIOSHMAX[Individuos[p][i][a]-1]+NIOSHMAX[Individuos[p][i][a+1]-1]))/NIOSHMAX[Individuos[p][i][a]-1]));
            }
            if( (a!=1) & (Individuos[p][i][a] != Individuos[p][i][a+1]) &
                NIOSHMAX[Individuos[p][i][a]-1] < NIOSHMAX[Individuos[p][i][a+1]-1] ){
                SLI[p][i][a] = NIOSH [Individuos[p][i][a+1]-1] + ((NIOSHMAX[Individuos[p][i][a+1]-1]-NIOSH [Individuos[p][i][a+1]-1])*
                    ((0.5*(NIOSHMAX[Individuos[p][i][a]-1]+NIOSHMAX[Individuos[p][i][a+1]-1]))/NIOSHMAX[Individuos[p][i][a+1]-1]));
            }
            if( (a!=1) & (Individuos[p][i][a] == Individuos[p][i][a+1]) ){
                SLI[p][i][a] = NIOSHMAX[Individuos[p][i][a]-1];
            }
        }
    }
}

```



```

    }
  }
}

double SLIMAX[][]; // SLI Maximo por Trabajador
SLIMAX=new double[TamanoPoblacion][TotalPuestosDeTrabajo];
for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
  for(int i=0;i<TotalPuestosDeTrabajo;i++){
    SLIMAX[p][i]=0;
  }
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
  for(int i=0;i<TotalPuestosDeTrabajo;i++){
    for(int h=0;h<3;h++){
      if(SLIMAX[p][i]< SLI[p][i][h]){
        SLIMAX[p][i]=SLI[p][i][h];
      }
    }
  }
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
  for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
    FitnessNiosh[p][i]= SLIMAX[p][i];
  }
}

double NIOSHMayor[];
NIOSHMayor=new double [TamanoPoblacion];

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
  NIOSHMayor[p]=0;
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
  for(int i=0; i <TotalTrabajadores;i++){
    if( NIOSHMayor[p] < FitnessNiosh[p][i]){
      NIOSHMayor[p] = FitnessNiosh[p][i];
    }
  }
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
  FitnessTotalNIOSH[p]= NIOSHMayor[p];
}

double ATAOCRA[][];
ATAOCRA=new double[TamanoPoblacion][TotalTrabajadores];
double RTAOCRA[][];
RTAOCRA=new double[TamanoPoblacion][TotalTrabajadores];
double INDOCRA[][];
INDOCRA=new double[TamanoPoblacion][TotalTrabajadores];

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
  for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
    ATAOCRA[p][i]=0;
    RTAOCRA[p][i]=0;
    INDOCRA[p][i]=0;
  }
}

```

```

    }
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
            ATAOCRA[p][i]= (RiesgoOcraFF[Individuos[p][i][a]-1] * DuracionJornada[a] ) + ATAOCRA[p][i];
            RTAOCRA[p][i]= (RiesgoOcraFM[Individuos[p][i][a]-1] * RiesgoOcraPM[Individuos[p][i][a]-1] *
                RiesgoOcraRM[Individuos[p][i][a]-1] * RiesgoOcraAM[Individuos[p][i][a]-1] *
                FactorMovimientoOcra * FactorDuracionOcra * FactorRecuperacionOcra *
                DuracionJornada [a])+ RTAOCRA[p][i];
        }
        INDOCRA[p][i]=(ATAOCRA[p][i])/(RTAOCRA[p][i]);
    }
}

int VARITRA[][];
VARITRA=new int [TamanoPoblacion][TotalTrabajadores][TotalJornadas];
for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        for(int a=0;a <TotalJornadas-1;a++){
            if( (OCRA[Individuos[p][i][a]-1] < 2.3 ) ){
                if((OCRA[Individuos[p][i][a+1]-1] < 2.3 ) ){
                    VARITRA[p][i][a]=0;
                }
                if((OCRA[Individuos[p][i][a+1]-1] >= 2.3) & (OCRA[Individuos[p][i][a+1]-1] < 3.5 )){
                    VARITRA[p][i][a]=0;
                }
                if( (OCRA[Individuos[p][i][a+1]-1] >= 3.5 ) ){
                    VARITRA[p][i][a]=0;
                }
            }
            if((OCRA[Individuos[p][i][a]-1] >= 2.3 ) & (OCRA[Individuos[p][i][a]-1] < 3.5 )){
                if((OCRA[Individuos[p][i][a+1]-1] < 2.3 )){
                    VARITRA[p][i][a]=0;
                }
                if((OCRA[Individuos[p][i][a+1]-1] >= 2.3) & (OCRA[Individuos[p][i][a+1]-1] < 3.5 )){
                    VARITRA[p][i][a]=2;
                }
                if((OCRA[Individuos[p][i][a+1]-1] >= 3.5 ) ){
                    VARITRA[p][i][a]=3;
                }
            }
            if((OCRA[Individuos[p][i][a]-1] >= 3.5 )){
                if((OCRA[Individuos[p][i][a+1]-1] < 2.3 )){
                    VARITRA[p][i][a]=0;
                }
                if((OCRA[Individuos[p][i][a+1]-1] >= 2.3) & (OCRA[Individuos[p][i][a+1]-1] < 3.5 )){
                    VARITRA[p][i][a]=2;
                }
                if((OCRA[Individuos[p][i][a+1]-1] >= 3.5 )){
                    VARITRA[p][i][a]=4;
                }
            }
        }
    }
}

double RVLOCRA[][];
RVLOCRA=new double [TamanoPoblacion][TotalTrabajadores];

```

```

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        RVLOCRA[p][i]=0;
    }
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        for(int a=0;a <TotalJornadas-1;a++){
            if( a==1 ){
                RVLOCRA[p][i]= (VARITRA[p][i][a]*((DuracionJornada[a]+DuracionJornada[a+1])/ DuracionTotal)-
                FactorRelaxOcra )+ RVLOCRA[p][i];
            }
            else{
                RVLOCRA[p][i]= ( VARITRA[p][i][a]*((DuracionJornada[a]+DuracionJornada[a+1])/ DuracionTotal))+
                RVLOCRA[p][i];
            }
        }
    }
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        FitnessOcra[p][i]= RVLOCRA[p][i]+INDOCRA[p][i];
    }
}

double OCRAMayor[] ;
OCRAMayor=new double [TamanoPoblacion];

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    OCRAMayor[p]=0;
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int i=0;i <TotalTrabajadores;i++){
        if(OCRAMayor[p] < FitnessOcra[p][i]){
            OCRAMayor[p] = FitnessOcra[p][i];
        }
    }
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    FitnessTotalOcra[p]= OCRAMayor[p];
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    FitnessDominant[p]=0;
}
//Calculo de conjuntos dominates
for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int pp=0;pp<TamanoPoblacion;pp++){
        if(p != pp){
            if( (FitnessTotalNIOSH[p] <= FitnessTotalNIOSH[pp]) &
            (FitnessTotalRula[p] <= FitnessTotalRula[pp]) &
            (FitnessTotalOcra[p] <= FitnessTotalOcra[pp]) ){
                FitnessDominant [p] = 1 +FitnessDominant [p];
            }
        }
    }
}

```

```

    }
  }
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
  for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
    for(int a=0;a <TotalJornadas-1;a++){
      if( Penalizacion[i][Individuos[p][i][a]-1]==1){
        FitnessDominant [p]=00;
      }
    }
  }
}

double auxFitnessDominant[];
auxFitnessDominant=new double [TamanoPoblacion];

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
  auxFitnessDominant [p]= FitnessDominant[p];
  ORDENFITNESS[p] = p;
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
  int max = p;
  for(int pp=p+1;pp<TamanoPoblacion;pp++){
    if( auxFitnessDominant [pp]> auxFitnessDominant [max]){
      max=pp;
    }
  }
  if (p != max) {
    double auxLPT = auxFitnessDominant[p];
    int auxilpt = ORDENFITNESS[p];
    ORDENFITNESS[p]=ORDENFITNESS[max];
    auxFitnessDominant[p] = auxFitnessDominant[max];
    ORDENFITNESS[max]=auxilpt;
    auxFitnessDominant[max] = auxLPT;
  }
}

MEJORRESPUESTADOMINANTE[gen]= auxFitnessDominant[0];
MEJORRESPUESTARULA[gen]= FitnessTotalRula[ORDENFITNESS[0]];
MEJORRESPUESTANIOSH[gen]= FitnessTotalNIOH[ORDENFITNESS[0]];
MEJORRESPUESTAOCRA[gen]= FitnessTotalOcra[ORDENFITNESS[0]];

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
  for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
    for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
      Individuosprint[p][i][a] = Individuos[ORDENFITNESS[p]][i][a];
    }
  }
}

//Capas de Frontera Dominantes
double n1= nicho1*TamanoPoblacion;
int ni1 = (int) n1;
double n2= nicho2*TamanoPoblacion;
int ni2 = (int) n2;
double n3= nicho3*TamanoPoblacion;
int ni3 = (int) n3;
double n4= nicho4*TamanoPoblacion;

```

```

int ni4 = (int) n4;
double n5= nicho5*TamanoPoblacion;
int ni5 = (int) n5;

for(int p=0;p<ni1;p++){
    auxFitnessDominant[p]=5;
}
for(int p=ni1;p<ni1+ni2;p++){
    auxFitnessDominant[p]=4;
}
for(int p=ni1+ni2;p<ni1+ni2+ni3;p++){
    auxFitnessDominant[p]=3;
}
for(int p=ni1+ni2+ni3;p<ni1+ni2+ni3+ni4;p++){
    auxFitnessDominant[p]=2;
}
for(int p=ni1+ni2+ni3+ni4;p<TamanoPoblacion;p++){
    auxFitnessDominant[p]=1;
}

double fitnessSuma=0;
for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    fitnessSuma= auxFitnessDominant [p]+fitnessSuma;
}

double NumCruce = Pcruce*TamanoPoblacion;
int NumCruce2 = (int) NumCruce;
if (NumCruce2%2 !=0){
    NumCruce2= NumCruce2+1;
}
double NumSobrevivi = TamanoPoblacion-NumCruce2-Elitismo;
double ProbFitness[];
ProbFitness=new double [TamanoPoblacion];
double AcumProbFitness[];
AcumProbFitness=new double [TamanoPoblacion];

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    ProbFitness[p] = auxFitnessDominant[p]/fitnessSuma;
    if(p==0 ){
        AcumProbFitness[p]=ProbFitness[p];
    }
    if(p>0 & p<TamanoPoblacion){
        AcumProbFitness[p]= AcumProbFitness[p-1]+ProbFitness[p];
    }
}

int ElegiCruce[];
ElegiCruce=new int [NumCruce2];
for(int NC=0;NC<NumCruce2;NC++){
    double aleatorioC=(double)(Math.random());
    for(int p=0;p<TamanoPoblacion-1;p++){
        if( aleatorioC <= AcumProbFitness[0] ){
            ElegiCruce [NC] = ORDENFITNESS[0];
        }
        if( aleatorioC > AcumProbFitness[p] & aleatorioC<= AcumProbFitness[p+1] ){
            ElegiCruce [NC] = ORDENFITNESS[p+1];
        }
    }
}
}

```

```

int IndividuosCruce [][];
IndividuosCruce=new int[NumCruce2][TotalPuestosDeTrabajo][TotalJornadas];

//Cruce uni punto
for(int NC=0;NC<NumCruce2/2;NC++){
    int ptjor= TotalJornadas-1; //Para que no se pase en el cruce
    int pointcruce=(int)(Math.random()*ptjor+1);
    int FNC = NC*2;
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        for(int a=0;a <pointcruce;a++){
            IndividuosCruce [FNC][i][a]=Individuos [ElegiCruce[FNC]][i][a];
            IndividuosCruce [FNC+1][i][a]=Individuos [ElegiCruce[FNC+1]][i][a];
        }
        for(int aa=pointcruce; aa <TotalJornadas;aa++){
            IndividuosCruce [FNC][i][aa]=Individuos [ElegiCruce[FNC+1]][i][aa];
            IndividuosCruce [FNC+1][i][aa]=Individuos [ElegiCruce[FNC]][i][aa];
        }
    }
}

//sobrevivientes
int NumSobrevivi2 = (int) NumSobrevivi;
int ElegiSobrevivi[];
ElegiSobrevivi=new int [NumSobrevivi2];
for(int NS=0;NS<NumSobrevivi2;NS++){
    double aleatorio=(double)(Math.random());
    for(int p=0;p<TamanoPoblacion-1;p++){
        if( aleatorio<= AcumProbFitness[0] ){
            ElegiSobrevivi [NS] = ORDENFITNESS[0];
        }
        if( aleatorio > AcumProbFitness[p] & aleatorio<= AcumProbFitness[p+1] ){
            ElegiSobrevivi [NS] = ORDENFITNESS[p+1];
        }
    }
}

int IndividuosSobrevivi [][];
IndividuosSobrevivi=new int[NumSobrevivi2][TotalPuestosDeTrabajo][TotalJornadas];

for(int NS=0;NS<NumSobrevivi2;NS++){
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
            IndividuosSobrevivi [NS][i][a]=Individuos [ElegiSobrevivi[NS]][i][a];
        }
    }
}

//Elitismo
int Elitismo2 = (int) Elitismo;
int IndividuosElite [][];
IndividuosElite=new int[Elitismo2][TotalPuestosDeTrabajo][TotalJornadas];
//Compactacion antes de mutacion
if(Elitismo!=0){
    for(int p=0;p<Elitismo;p++){
        for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
            for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
                IndividuosElite[p][i][a] = Individuos[ORDENFITNESS[p]][i][a];
            }
        }
    }
}

```

```

    }
}

int IndividuosAnteMutacion [][];
IndividuosAnteMutacion=new int[TamanoPoblacion][TotalPuestosDeTrabajo][TotalJornadas];

for(int p=0;p<Elitismo2;p++){
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
            IndividuosAnteMutacion[p][i][a] = IndividuosElite[p][i][a];
        }
    }
}

int ElimasRepro= Elitismo2+NumCruce2;
for(int p=Elitismo2;p<ElimasRepro ;p++){
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
            IndividuosAnteMutacion[p][i][a] = IndividuosCruce[p-Elitismo2][i][a];
        }
    }
}

for(int p=ElimasRepro;p<TamanoPoblacion ;p++){
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
            IndividuosAnteMutacion[p][i][a] = IndividuosSobrevivi[p-ElimasRepro][i][a];
        }
    }
}

//Proceso de mutacion
double NumMuta = PMutacion*TamanoPoblacion;
int mutacion=0;
int Intmuta=0;
while( mutacion<NumMuta){
    int aleatoriomuta=(int)(Math.random()*TamanoPoblacion);
    Intmuta=0;
    while( Intmuta <IntMutacion){
        int aleatoriomutaJor=(int)(Math.random()*TotalJornadas);
        int aleatoriomutaTrab1=(int)(Math.random()*TotalTrabajadores);
        int aleatoriomutaTrab2=(int)(Math.random()*TotalTrabajadores);
        int Mut1= IndividuosAnteMutacion[aleatoriomuta][aleatoriomutaTrab1][aleatoriomutaJor];
        int Mut2= IndividuosAnteMutacion[aleatoriomuta][aleatoriomutaTrab2][aleatoriomutaJor];
        IndividuosAnteMutacion[aleatoriomuta][aleatoriomutaTrab2][aleatoriomutaJor]=Mut1;
        IndividuosAnteMutacion[aleatoriomuta][aleatoriomutaTrab1][aleatoriomutaJor]= Mut2;
        Intmuta++;
    }
    mutacion++;
}

int IndividuosDespuesMutacion [][];
IndividuosDespuesMutacion=new int[TamanoPoblacion][TotalPuestosDeTrabajo][TotalJornadas];

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
            IndividuosDespuesMutacion[p][i][a] = IndividuosAnteMutacion[p][i][a];
        }
    }
}

```

```

    }
}

//Nueva poblacion
for(int p=TamanoPoblacion-1;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
            IndividuosDespuesMutacion[p][i][a] = Individuos[ORDENFITNESS[0]][i][a];
        }
    }
}

for(int p=0;p<TamanoPoblacion;p++){
    for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
        for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
            Individuos[p][i][a] = IndividuosDespuesMutacion[p][i][a];
        }
    }
}

//Nueva Generacio
gen= gen +1;
System.out. println(" Vamos por Generacion " + gen);
}

//Reinicia Ciclo
try{ //Imprimir en Nueva Hoja de MS Excel

    WritableWorkbook libro = Workbook.createWorkbook(new File("RESULTADO_MULTIOBJETIVO_ROTA_LABO.xls"));
    WritableSheet hoja1 = libro.createSheet("RESULTADOS", 1);
    Label labela = new Label(1,0,"RESULTADOS ");
    hoja1.addCell(labela);
    Label label1 = new Label(1,1,"Generacion ");
    Label label2 = new Label(2,1,"Mejor Fitness de Rula ");
    Label label3 = new Label(3,1,"Mejor Fitness de Niosh ");
    Label label4 = new Label(4,1,"Mejor Fitness de Ocro ");
    Label label5 = new Label(5,1,"Mejor Fitness de Dominante ");
    hoja1.addCell(label1);
    hoja1.addCell(label2);
    hoja1.addCell(label3);
    hoja1.addCell(label4);
    hoja1.addCell(label5);

    for(int G=0;G<Generaciones;G++){
        Number number =new Number(1,G+2, G);
        hoja1.addCell(number);
        Number number1 =new Number(2,G+2, MEJORRESPUESTARULA[G]);
        hoja1.addCell(number1);
        Number number2 =new Number(3,G+2, MEJORRESPUESTANIOSH[G]);
        hoja1.addCell(number2);
        Number number3 =new Number(4,G+2, MEJORRESPUESTAOCRA[G]);
        hoja1.addCell(number3);
        Number number4 =new Number(5,G+2, MEJORRESPUESTADOMINANTE[G]);
        hoja1.addCell(number4);
    }

    int cti =0;
    int ctt=0;
    for(int p=0;p<ConjuNodominante;p++){
        Label labelb = new Label(9,0,"RESULTADOS CONJUNTOS NO DOMINADOS ");
        hoja1.addCell(labelb);
    }
}

```



```

Label label6 = new Label(9,p+1+cti,"Individuo "+p);
hoja1.addCell(label6);
Label label7 = new Label(9,p+2+cti,"Trabajadores ");
hoja1.addCell(label7);
Label label8 = new Label(10,p+2+cti,"Rotacion 1");
hoja1.addCell(label8);
Label label9 = new Label(11,p+2+cti,"Rotacion 2");
hoja1.addCell(label9);
Label label10 = new Label(12,p+2+cti,"Rotacion 3");
hoja1.addCell(label10);
Label label11 = new Label(13,p+2+cti,"Rotacion 4");
hoja1.addCell(label11);
Label label12 = new Label(14,p+2+cti,"Fitness de Rula");
hoja1.addCell(label12);
Label label13 = new Label(15,p+2+cti,"Fitness de Niosh");
hoja1.addCell(label13);
Label label14 = new Label(16,p+2+cti,"Fitness de Ocra");
hoja1.addCell(label14);
Label label15 = new Label(17,p+16+cti,"DOMINA");
hoja1.addCell(label15);
Label label16 = new Label(10,p+17+cti,"TOTALES MAXIMO NIVEL DE RIESGOS");
hoja1.addCell(label16);
Number label17 = new Number(14,p+17+cti, FitnessTotalRula[ORDENFITNESS[p]]);
hoja1.addCell(label17);
Number label18 = new Number(15,p+17+cti, FitnessTotalNiosh[ORDENFITNESS[p]]);
hoja1.addCell(label18);
Number label19 = new Number(16,p+17+cti, FitnessTotalOcra[ORDENFITNESS[p]]);
hoja1.addCell(label19);
Number label20 = new Number(17,p+17+cti, FitnessDominant[ORDENFITNESS[p]]);
hoja1.addCell(label20);

for(int i=0;i<TotalTrabajadores;i++){
    Number number5 =new Number(9,3+ctt, i);
    hoja1.addCell(number5);
    Number number6 =new Number(14,3+ctt, FitnessRula[ORDENFITNESS[p]][i]);
    hoja1.addCell(number6);
    Number number7 =new Number(15,3+ctt, FitnessNiosh[ORDENFITNESS[p]][i]);
    hoja1.addCell(number7);
    Number number8 =new Number(16,3+ctt, FitnessOcra[ORDENFITNESS[p]][i]);
    hoja1.addCell(number8);
    ctt= ctt+1;
    cti= cti+1;
    for(int a=0;a <TotalJornadas;a++){
        Number number9 =new Number(10+a,p+2+cti, Individuosprint[p][i][a]);
        hoja1.addCell(number9);
    }
}
cti= cti+2;
ctt= ctt+3;
}

Label label21 = new Label(21,1,"Riesgo Rula ");
Label label22 = new Label(22,1,"Riesgo Niosh ");
Label label23 = new Label(23,1,"Riesgo Ocra ");
Label label24 = new Label(24,1,"Dominante ");
hoja1.addCell(label21);
hoja1.addCell(label22);
hoja1.addCell(label23);
hoja1.addCell(label24);

```

```

for(int p=0;p<ConjuNodominante;p++){
    Label labelc = new Label(20,0,"FRONTERA DE PARETO ");
    hoja1.addCell(labelc);
    Label number10 = new Label(20,p+2,"Individuo "+p);
    hoja1.addCell(number10);
    Number number11 = new Number(21,p+2, FitnessTotalRula[ORDENFITNESS[p]]);
    hoja1.addCell(number11);
    Number number12 = new Number(22,p+2, FitnessTotalNIOSSH[ORDENFITNESS[p]]);
    hoja1.addCell(number12);
    Number number13 = new Number(23,p+2, FitnessTotalOcro[ORDENFITNESS[p]]);
    hoja1.addCell(number13);
    Number number14 = new Number(24,p+2, FitnessDominant[ORDENFITNESS[p]]);
    hoja1.addCell(number14);
}

libro.write();
ibro.close();
}catch(Exception eP){System.out.println(" treFin!");
    eP.printStackTrace();
} //Fin Catch
}catch (Exception ex){ System.out.println(" Fin!");
}
//Calculo de Tiempo Computacional de Problema
time_end = System.currentTimeMillis();
long timecal=0;
timecal= time_end - time_start;
timecal=timecal/1000;
System.out.println("the task has taken "+ ( timecal ) +" seconds");

try{ //Apertura de Nuevo Documento
    File path = new File("C:/Users/TRABAJO_DE_GRADO_MAESTRIA/RESULTADO_MULTIOBJETIVO_ROTA_LABO.xls");
    Desktop.getDesktop().open(path);
}catch(IOException e){e.printStackTrace();
    System.out.println("Ruta erronea");
}
}
} //Fin Main Principal

```

ANEXO 7. Resultado de Caso de Estudio Completo -CD



**COMPILADO
FINAL.xlsx**

ANEXO 8. Plan de Rotación de Puestos de Trabajo.

ETIQUETA	PERFIL PUESTO DE TRABAJO
A	Operador Extrusión Principal Polietileno
1B	Operador Mezclas de Extrusión Polietileno
1C	Operador de Seguimiento de Extrusión Polietileno
2C	Operador de Seguimiento de Extrusión Polietileno
1D	Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polietileno
2D	Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polietileno
1E	Operador Conversión Principal Polietileno
1F	Operador de Conversión 1
2F	Operador de Conversión 1
1G	Operador de Conversión 2
2G	Operador de Conversión 2
1H	Operador de Conversión 3
1I	Operador de Conversión 4
2I	Operador de Conversión 4
3I	Operador de Conversión 4
4I	Operador de Conversión 4
1J	Operador de Conversión 5
2J	Operador de Conversión 5
1K	Operador de Conversión 6
2K	Operador de Conversión 6
3K	Operador de Conversión 6
1L	Operador Auxiliar de Perforación
1M	Operador de Empaque de conversión 4
1N	Operador de Empaque de conversión 6
1O	Operador de Empaque de conversión 3
1P	Operador de Apoyo de conversión 2
1Q	Operador Extrusión Principal Polipropileno
1R	Operador Mezclas de Extrusión Polipropileno
1S	Operador de Twister de Extrusión Polipropileno
1T	Operador de Pesaje y Etiquetado de Extrusión Polipropileno
1U	Operador de Apoyo de Extrusión Polipropileno
1V	Operador de Extrusión Polipropileno Zuncho



TRABAJADOR	R1	R2	R3	R4
1	B	4I	1G	2F
2	U	H	2I	S
3	1G	2I	V	2D
4	2K	U	2J	1J
5	2J	1J	Q	O
6	L	A	S	3K
7	S	2F	M	2I
8	N	2K	E	L
9	H	1K	U	1F
10	M	E	H	1K
11	3I	Q	1J	2J
12	P	3I	1F	N
13	E	1D	2D	4I
14	T	2C	2K	A
15	R	M	1C	1G
16	2F	O	R	2C
17	1K	1C	L	U
18	2D	3K	A	2K
19	4I	B	3I	P
20	2C	T	O	Q
21	2G	V	P	T
22	1C	N	B	3I
23	Q	S	1K	1I
24	1F	L	4I	M
25	1J	2J	1D	E
26	1I	P	T	V
27	A	2D	3K	H
28	V	1F	N	1C
29	1D	2G	2C	R
30	O	1G	1I	B
31	2I	R	2G	1D
32	3K	1I	2F	2G

Es importante considerar dentro del plan de rotación que cada uno de los trabajadores deben conocer su numeración dentro de la estructura de la planta, además de identificar la etiquetas de cada uno de las estaciones de trabajo en las cuales se desarrollan las actividades, de esta forma dentro de un ambiente de supervisión se permite que los trabajadores se involucren y conozcan la secuencia de asignación.