

DISEÑO Y APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA MULTIOBJETIVO, BASADA EN LOS ALGORITMOS GENÉTICOS “VEGA” Y “MOGA”, PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO DE LAS VARIABLES TIEMPO DE PROCESAMIENTO, PORCENTAJE DE PRODUCCIÓN DEFECTUOSA CAUSADA POR LA FATIGA DEL OPERARIO Y COSTO DE MANO DE OBRA DIRECTA, EN UN SISTEMA DE FABRICACIÓN TIPO “JOB SHOB” DE UNA COMPAÑÍA METALMECÁNICA.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A MULTIOBJECTIVE METHODOLOGY BASED ON GENETIC ALGORITHMS "VEGA" AND "MOGA" TO IMPROVE THE VARIABLES PROCESSING TIME, PRODUCTION RATE CAUSED BY DEFECTIVE OPERATOR FATIGUE AND COST OF DIRECT LABOR PERFORMANCE, IN A MANUFACTURING SYSTEM TYPE "JOB SHOB" OF A METAL PROCESSING COMPANY.

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA – INGENIERÍA INDUSTRIAL

**AUTOR
GERMÁN AUGUSTO COCA ORTEGÓN.**

**DIRECTOR DE TESIS.
OMAR DANILO CASTRILLÓN GÓMEZ.
DOCTOR EN BIOINGENIERÍA.**

**CODIRECTOR DE TESIS.
SANTIAGO RUIZ HERRERA.
MAGÍSTER EN INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES Y ESTADÍSTICA.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES
MAESTRÍA INVESTIGATIVA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
MANIZALES
2014**

RESUMEN.

El proyecto presentado a continuación muestra el diseño y aplicación de una metodología multobjetivo basada en los algoritmos genéticos “VEGA” y “MOGA. De esta forma, se obtiene el mejoramiento en el desempeño de las variables: tiempo de procesamiento, porcentaje de producción defectuosa causada por la fatiga del operario y costo de mano de obra directa, en una compañía metalmecánica, cuyo sistema de fabricación es del tipo “Job Shop”. Al respecto, se compara el comportamiento de las variables en mención, tomando como base para el análisis dos referentes. El primero corresponde al comportamiento después de haber aplicado la metodología diseñada; mientras que el segundo corresponde al comportamiento propio de la utilización de técnicas tradicionales para la solución de éste tipo de problemas. De acuerdo con lo anterior, se procede en términos generales de la siguiente manera: se revisa la bibliografía correspondiente a programación de operaciones, enfatizando de forma especial, en las metodologías tradicionales e inteligentes relacionadas con la asignación de recursos en los sistemas de fabricación tipo “Job Shop”. Más adelante, se identifican las variables que intervienen en el proceso de programación de operaciones de la Compañía objeto de estudio. La anterior información, sirve como base para diseñar y posteriormente aplicar la respectiva metodología. Por último, se realiza un comparativo con los resultados obtenidos, al utilizar técnicas tradicionales para la programación de operaciones en sistemas “Job Shop”; permitiendo de ésta forma, establecer la efectividad de la metodología propuesta.

De manera específica, la metodología diseñada a partir de los algoritmos Vega y Moga, se le denomina “método uno” y a la metodología tradicional basada en un método híbrido entre algoritmos genéticos y sumas ponderadas se le denomina “método dos”.

Al evaluar las anteriores metodologías (método uno y método dos) se encontraron entre otros, los siguientes resultados:

- Respecto a los valores tomados por los coeficientes de variación luego de aplicar el método uno sobre las variables de interés (tiempo de procesamiento, costo de mano de obra directa y fracción defectuosa), se observa que los parámetros bajo análisis, toman valores superiores a los coeficientes de variación obtenidos, después de aplicar el método dos. De manera particular, se encuentra que en cuanto al comportamiento de la variable tiempo de proceso (en horas), el valor del coeficiente de variación arrojado por el método uno, supera el valor del coeficiente de variación arrojado por el método dos en 49,38%.

De acuerdo con lo anterior, se establece que el método uno muestra mayor capacidad para detectar cierta diversidad de soluciones, las cuales pueden fluctuar entre determinados valores extremos (valores mínimos a valores máximos) para aquellas variables objeto de estudio. Es así como, se determina que el método uno al encontrarse estructurado para identificar soluciones no dominadas extremas, posee mejor nivel de adaptación, al ser comparado con el desempeño del método dos. Con relación a lo expresado, se comenta que al aplicar el método uno pueden por ejemplo, detectarse tiempos de fabricación muy bajos o muy altos. A su vez, estos tiempos de fabricación, con el fin de cerrar el ciclo de evaluación, se procede a asociarlos en cada caso con los respectivos valores de penalización por costo de mano de obra directa y, asimismo por fracción defectuosa causada por la fatiga del operario.

- Con relación a los individuos de mínimo valor provenientes del método uno al compararlos con el individuo de mayor factor de ponderación proveniente del método dos, se encuentra en síntesis que el desempeño del método uno supera el desempeño del método dos, debido a los siguientes hechos entre otros: en cuanto al tiempo de procesamiento en horas, el método uno presenta un valor inferior en 6,92 % al compararlo con el método dos y, en cuanto a la penalización por fracción defectuosa el método uno presenta un valor inferior en 2,1 % al compararlo con el método dos.

- El número de frentes detectados con el método uno es de 32 frentes, mientras que el número de frentes detectados con el método dos es sólo de un frente.

Con base en los resultados presentados, se pudo establecer que al analizar las tendencias del mercado (crecimiento, estabilidad o decrecimiento), la dirección de operaciones de la compañía, puede seleccionar diferentes programas de producción, los cuales proceden de diversos individuos no dominados. Asimismo, en algunas circunstancias propias de la organización objeto de estudio, se pueden seleccionar programas de producción que generen la menor penalización posible por costo de mano de obra directa o por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario.

PALABRAS CLAVE.

Algoritmos genéticos, multiobjetivo, job shop, tiempo de procesamiento, VEGA, MOGA.

ABSTRACT

The project below shows the design and implementation of a methodology based on multiojective "VEGA" genetic algorithms "MOGA. Thus, the improvement is obtained in the performance of the variables: processing time, percentage of defective products caused by operator fatigue and cost of direct labor, in a metallurgical company, whose manufacturing system is of the type "Job Shop ". In this regard, the behavior of the variables in question is compared, based on two reference analysis. The first corresponds to the behavior after applying the methodology designed; while the second corresponds to the behavior of the use of traditional techniques for solving this type of problem. According to the above, it generally proceeds as follows: the relevant literature is reviewed to schedule operations, focusing specially in traditional and intelligent methodologies related to resource allocation in manufacturing systems type "Job Shop ". Later, the variables involved in the process of scheduling operations of the Company under study are identified. The above information serves as a basis to design and then apply the appropriate methodology. Finally, a comparison is made with the results obtained by using conventional techniques for programming operations "job shop" systems; allowing in this way, establish the effectiveness of the proposed methodology.

Specifically, the methodology designed from the Vega and Moga algorithms, called "Method One" and the traditional methodology based on a hybrid approach between genetic algorithms and weighted sums is called "method two".

In assessing the above methodologies (Method One and Method Two) were among others the following results:

- With regard to the values taken by the coefficients of variation after applying the method one on the variables of interest (processing time, cost of direct labor and defective fraction), we see that the parameters under analysis, taking values in excess variation coefficients obtained after applying method two. In particular, we find that in terms of the behavior of the variable processing time (in hours), the coefficient of variation thrown by method one, exceeds the value of the coefficient of variation method two thrown in 49.38 %.

According to the above, it is established that one method shows greater ability to detect certain diversity of solutions, which can fluctuate between certain extreme values (minimum to maximum values values) for those variables object of study. This is how, it is determined that one method be structured to identify nondominated extreme solutions, has

better adaptation level, when compared with the performance of the method both. In view of the above, it is said that one can apply the method eg time detected very low or very high manufacturing. In turn, this time of manufacture, in order to close the cycle of evaluation is necessary to associate each with the respective values of penalty cost of direct labor and also by defective fraction caused by fatigue operator.

- With respect to individuals of minimum value from the method each compared to the individual higher weighting factor from method two is in synthesis method performance one outperforms the two method, due to the following facts among others: in terms of processing time in hours, method one has a lower value of 6.92% compared to method two, and as to the penalty fraction defective method one has a lower value to 2,1% compared to method two.
- The number of fronts detected with method one is 32 fronts, while the number of fronts detected by method two is just one front.

Based on the results presented, it was established that in analyzing market trends (growth, stability or decline), the direction of company operations, you can select different production programs, which come from various non-dominated individuals. Also, some specific to the organization under study conditions, you can select programs that generate production the least penalty cost of direct labor or fraction defective due to fatigue.

KEYWORDS.

Genetic algorithms, multi-objective, job shob, make span time, VEGA, MOGA.

Contenido

RESUMEN.....	II
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABLAS.....	X
INTRODUCCIÓN.....	1
1 PRELIMINARES.....	4
1.1 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.2 ÁREA PROBLEMÁTICA.....	7
1.2.1 Tiempo de procesamiento.....	7
1.2.2 Fracción defectuosa causada por la fatiga del operario.....	8
1.2.3 Costos de mano de obra directa.....	8
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	8
1.4 OBJETIVOS.....	9
1.4.1 Objetivo general.....	9
1.4.2 Objetivos específicos.....	9
1.5 PLANTEAMIENTO DE LA HIPOTESIS.....	10
2 MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 Decisiones en operaciones.....	11
2.2 Conceptualización sobre configuraciones productivas.....	11
2.3 Sistemas de trabajo de taller o de planta (Job Shop).....	12
2.4 El renglón metalmecánico en Colombia.....	13
2.4.1 Características generales del renglón metalmecánico en Colombia.....	13
2.4.2 Características generales de los procesos de producción metalmecánicos.....	14
2.5 Conceptualización general sobre inteligencia artificial, metaheurística y algoritmos genéticos.....	15
2.5.1 Inteligencia Artificial.....	15
2.5.2 Metaheurística.....	15
2.5.3 Algoritmos genéticos.....	17
2.6 Métodos tradicionales y aplicaciones basadas en algoritmos genéticos para el abordaje del problema.....	20
2.6.1 Métodos tradicionales para el abordaje del problema.....	20
2.6.2 Aplicaciones basadas en algoritmos genéticos para el abordaje del problema.....	22
3 METODOLOGÍA.....	32

3.1	Descripción general de los cuatro aspectos considerados en la metodología.	32
3.1.1	Metodología utilizada en el método uno (metodología basada en los algoritmos Vega y Moga): Descripción general.	32
3.1.2	Metodología utilizada en el método dos (metodología basada en sumas ponderadas y algoritmos genéticos): Descripción general.	34
3.1.3	Metodología utilizada para la comparación de métodos (Descripción general):	35
3.1.4	Metodología utilizada para los otros elementos del método uno (Descripción general):	35
3.2	Descripción detallada de los cuatro aspectos considerados en la metodología.	36
3.2.1	Metodología utilizada en el método uno (metodología basada en los algoritmos Vega y Moga): Descripción detallada.	36
3.2.2	Metodología utilizada en el método dos (metodología basada en sumas ponderadas y algoritmos genéticos): Descripción detallada.....	75
3.2.3	Paso 11. Comparación de métodos.....	79
3.2.4	Paso 12 Análisis estadístico de los datos y caracterización del individuo de menor tiempo de procesamiento.....	82
4	EXPERIMENTACIÓN	84
4.1	Estado del problema actual:	84
4.1.1	Situación inicial:.....	84
4.2	Desarrollo experimental para la aplicación de la metodología.	87
4.2.1	Paso uno de la metodología. Caracterización general del problema y generación de la población inicial (Experimentación).....	87
4.2.2	Paso 2. Generación y evaluación de las subpoblaciones (Experimentación).. ..	89
4.2.3	Paso 3. Conformar la primera nueva población (Experimentación).....	99
4.2.4	Paso 4. Ordenar por frentes la primera nueva población (Experimentación)	102
4.2.5	Paso 5. Conformar la segunda nueva población (Experimentación)	102
4.2.6	Paso 6 a Paso 12 de la experimentación.....	104
5	RESULTADOS	106
5.1	Análisis método uno (método híbrido entre los algoritmos Vega y Moga).	106
5.1.1	Pasos 1 a 6: Identificación de la población final de respuesta.	106
5.1.2	Paso 6. Sistematización de la información (Resultados).....	107
5.2	Análisis método dos (método híbrido entre algoritmos genéticos y sumas ponderadas).....	120

5.2.1	Pasos 7 a 10: Identificación de la población final de respuesta después de aplicar el respectivo procedimiento.	120
5.2.2	Paso 6. Sistematización de la información.....	122
5.3	Paso 11. Comparación de métodos.....	124
5.3.1	Comparación de los parámetros arrojados por los métodos.	124
5.3.2	Comparación de los individuos de mínimo valor para las variables analizadas.	125
5.3.3	Comparación del “método 1” respecto al individuo con mayor ponderación obtenido a través de la aplicación del “método 2”.	128
5.3.4	Comparación del número de frentes encontrados al aplicar cada método.	130
5.3.5	Comparación de los individuos por intervalo en el frente uno.	131
5.4	Otros elementos relacionados con el método uno.	132
5.4.1	Paso 12. Análisis estadístico de los datos y Caracterización del individuo de menor tiempo de procesamiento.....	132
6	DISCUSIONES.....	140
7	CONCLUSIONES.....	144
8	FUTURAS LÍNEAS DE ACCIÓN.	151
9	AGRADECIMIENTOS.....	152
10	BIBLIOGRAFÍA.	153
A	ANEXO 1.....	161
B	ANEXO 2.....	162
C	ANEXO 3.....	196
1.	Barras de menús:.....	198
2.	Current Folder:.....	199
3.	Editor:	199
4.	Command Windows:	200
5.	Command History: Contiene	200
6.	Workspace:	200
D	ANEXO 4.....	204
E	ANEXO 5.....	210

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Alternativas de programación de un Individuo.....	38
Figura 2. Diagrama de la función GenerarAleatorio().	41
Figura 3. Diagrama de la función igualesindi().	42
Figura 4. Diagrama de la función ordenar().	46
Figura 5. Diagrama de la función cal_pen_cos().	55
Figura 6. Diagrama para la función num_per().	56
Figura 7. Conteo de posiciones para cruzamiento en individuos padre.	58
Figura 8. Individuos hijo después de operación de cruzamiento.	59
Figura 9. Diagrama de la función apareamiento().	60
Figura 10. Diagrama de la función detectarigualpedido().	61
Figura 11. Operación de mutación.	62
Figura 12. Ruta de fabricación pedido uno.	88
Figura 13. Procedimiento de obtención de la primera nueva población.	101
Figura 14. Procedimiento de obtención de la segunda nueva población.	103
Figura 15. Diagrama de Gantt para el individuo de menor tiempo de proceso Tiempo de procesamiento: 159 horas equivalentes a 0,9464 semanas.	139
Figura 16. Diagrama de la función paso().	176
Figura 17. Diagrama de la función cal_time_pro().	179
Figura 18. Diagrama de la función cal_pen_def().	185
Figura 19. Diagrama de la función penalizacionCosto().	189
Figura 20. Diagrama para la función mutar().	192
Figura 21. Diagrama de la función orgFrentesMoga().	194
Figura 22. Diagrama de la función OrdenTsieFrentes().	195

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Proyección de crecimiento en el PTP.....	6
Tabla 2. Problema General JSSPNxM.....	36
Tabla 3. Estructura general de un subindividuo.	39
Tabla 4. Estructura general de un subindividuo.	39
Tabla 5. Datos para cálculo de tiempo de procesamiento (ejemplo).	44
Tabla 6. Determinación de tiempo de procesamiento (ejemplo básico: Orden uno).	44
Tabla 7. Determinación de tiempo de procesamiento (ejemplo básico: Orden dos).	45
Tabla 8. Programación de 7 pedidos en 24 horas.....	47
Tabla 9. Correspondencia de 24 horas en jornadas laborales de 8 horas por día.....	48
Tabla 10. Fracción defectuosa por hora para el pedido 7.	49
Tabla 11. Penalización para los pedidos presentados en la tabla 8 en el primer día.....	50
Tabla 12. Segundo intervalo (horas 9 a 16).	53
Tabla 13. Agrupación para 4 personas (horas 9 a 16).	53
Tabla 14. Penalización por costo de mano de obra directa en diferentes jornadas laborales.....	54
Tabla 15. Caso ejemplo para establecer dominancia entre individuos.	64
Tabla 16. Comparación del individuo número uno respecto a los demás individuos.	65
Tabla 17. Relaciones de dominancia correspondientes a los individuos registrados en la tabla 15.....	66
Tabla 18. Resumen de dominancia para las tablas 16 y 17.	66
Tabla 19. Valor del frente por individuo.....	67
Tabla 20. Distribución de individuos por frente: ejemplo de primera población.	68
Tabla 21. Distribución porcentual de individuos por frente: primera nueva población.....	69
Tabla 22. Matriz distribución de los individuos del frente uno por intervalos (tiempo o costos o fracción defectuosa).	71
Tabla 23. Distancia de cada individuo respecto al valor promedio del intervalo.	72
Tabla 24. Pertenencia por individuo.....	73
Tabla 25. Formato Pertenencia de los individuos por función objetivo.	74
Tabla 26. Pertenencia de los individuos por función objetivo (ejemplo base: tiempo de procesamiento).....	74
Tabla 27. Diferencia respecto al valor ponderado promedio de grupo.	80
Tabla 28. Matriz de presentación de métodos considerando los individuos de mínimo valor.....	80

Tabla 29. Matriz de comparación porcentual de los individuos de mínimo valor.	81
Tabla 30. Comparación respecto al individuo con mayor valor de factor de ponderación.	81
Tabla 31. Esquema promedio por variable para cada población.	82
Tabla 32. Ruta de manufactura por pedido.	88
Tabla 33. Rutas y tiempos de fabricación por pedido (en horas).....	88
Tabla 34. Programación de la secuencia: 3 – 7 – 8 – 1 – 4 – 9 – 5 – 2 – 6 en 24 horas...	90
Tabla 35. Tiempo final de proceso en la secuencia: 3 – 7 – 8 – 1 – 4 – 9 – 5 – 2 – 6.....	91
Tabla 36. Tiempo de procesamiento expresado en semanas para 196 horas.	92
Tabla 37. Ponderaciones sobre el tiempo normal y penalización.	92
Tabla 38. Penalización por costo de mano de obra directa para los pedidos de la tabla 34 (caso: día hábil).	93
Tabla 39. Penalización por costo de mano de obra directa para la tabla 34 (caso: día hábil con dominical o día dominical).	93
Tabla 40. Fracción defectuosa causada por la fatiga del operario y penalización.	94
Tabla 41. Equivalencia horaria para jornadas laborales de 8 horas en 24 horas.....	95
Tabla 42. Penalización fracción defectuosa de la tabla 34 para jornada de 8 horas por día.	96
Tabla 43. Equivalencia horaria para jornadas laborales de 16 horas en 24 horas.....	97
Tabla 44. Penalización fracción defectuosa de la tabla 34 para jornada de 16 horas por día.	97
Tabla 45. Equivalencia horaria para jornadas laborales de 24 horas en 24 horas.....	98
Tabla 46. Penalización fracción defectuosa de la tabla 34 para jornada de 24 horas por día.	99
Tabla 47. Descripción de las operaciones para conformar la primera nueva población.	100
Tabla 48. Descripción de las operaciones para conformar la segunda nueva población.	102
Tabla 49. Resumen población resultado (método uno).	106
Tabla 50. Cantidad de individuos por frente.	108
Tabla 51. Intervalos para el tiempo de procesamiento (en semanas).	109
Tabla 52. Distribución de los individuos del frente uno por intervalos (tiempo de proceso).	110
Tabla 53. Promedio de cada variable por intervalo (tiempo de proceso).	110
Tabla 54. Pertenencia del individuo por intervalo (tiempo de proceso en semanas).	110
Tabla 55. Individuos con sus respectivos valores de radio (variable: Tiempo de procesamiento).	111

Tabla 56. Intervalos para la penalización por costos de mano de obra directa (puntos).	112
Tabla 57. Distribución de los individuos del frente uno por intervalos (penalización por costos de mano de obra directa).....	112
Tabla 58. Promedio de cada variable por intervalo (penalización por costos de mano de obra directa).	113
Tabla 59. Pertenencia del individuo por intervalo (penalización por costos de mano de obra directa).	113
Tabla 60. Individuos con sus respectivos valores de radio (variable: Penalización por costos de mano de obra directa).....	113
Tabla 61. Intervalos para la penalización por fracción defectuosa (puntos).	114
Tabla 62. Distribución de los individuos del frente uno por intervalos (penalización por fracción defectuosa).....	115
Tabla 63. Promedio de cada variable por intervalo (penalización por fracción defectuosa).	115
Tabla 64. Pertenencia del individuo por intervalo (penalización por fracción defectuosa).	116
Tabla 65. Individuos con sus respectivos valores de radio (variable: Penalización por fracción defectuosa).....	116
Tabla 66. Pertenencia de los individuos para la variable tiempo de procesamiento.	116
Tabla 67. Pertenencia de los individuos para la variable penalización por costos de mano de obra directa.....	118
Tabla 68. Pertenencia de los individuos para la variable penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario.....	119
Tabla 69. Resumen de la población resultado (método dos).....	121
Tabla 70. Distribución de los individuos del frente uno por intervalos (tiempo de procesamiento en semanas – método dos).	123
Tabla 71. Distribución de los individuos del frente uno por intervalos (penalización por fracción defectuosa – método dos).	124
Tabla 72. Comparación de los parámetros arrojados por los métodos uno y dos.	125
Tabla 73. Comparación de métodos considerando los individuos de mínimo valor.	126
Tabla 74. Comparación porcentual de los individuos de mínimo valor.	126
Tabla 75. Individuo con mayor valor de ponderación obtenido por el método dos.	128
Tabla 76. Comparación de los individuos del método 1 con el individuo de mayor ponderación del método 2.....	129

Tabla 77. Individuo del método uno de similar comportamiento al individuo de mayor valor ponderado del método dos.	129
Tabla 78. Distribución porcentual de individuos por frente (método uno).	130
Tabla 79. Datos base: tiempo de procesamiento (en horas).	134
Tabla 80. Análisis de varianza para la variable tiempo de proceso (en horas).	134
Tabla 81. Datos base: tiempo de procesamiento (en semanas).....	135
Tabla 82. Análisis de varianza para la variable tiempo de proceso (en semanas).....	135
Tabla 83. Datos base: costo de mano de obra directa.	136
Tabla 84. Análisis de varianza costo de mano de obra directa.....	136
Tabla 85. Datos base: análisis de varianza en fracción defectuosa.	136
Tabla 86. Análisis de varianza para la variable fracción defectuosa.....	137
Tabla 87. Población resultado (método uno).....	204
Tabla 88. Población resultado (método dos).....	210

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de manufactura tipo Job Shop, se clasifican desde el punto de vista de su configuración, en la categoría denominada “taller”. De acuerdo con lo anterior, las diferentes líneas de productos, no presentan un único estándar de proceso, razón por la cual, las rutas de fabricación son variables (Niebel, 2004).

Respecto a los sistemas Job Shop, debe mencionarse que el problema relacionado con la programación de los recursos, se clasifica como NP difícil (Correa et al, 2008). Este tipo de problema, requiere para su solución, elementos provenientes de la optimización combinatoria y de la modelación estocástica. Por ejemplo, sí existen “n” pedidos, el total de formas de ordenarlos, para su ingreso a la planta es $n!$. Con base en lo expuesto, puede afirmarse que para 30 pedidos se tendrían $4.43 * 10^{29}$ soluciones, una de las cuales corresponde al menor tiempo de procesamiento. A su vez, su tiempo de cómputo es significativamente alto, concluyéndose por tanto, la imposibilidad de obtener una respuesta oportuna, al momento de realizar la asignación de planta.

Asimismo, se comenta que la determinación del tiempo de proceso en los sistemas tipo “Job Shop”, se encuentra sujeta al comportamiento de ciertas variables, algunas de las cuales son: la definición de los tiempos de fabricación por unidad, la variabilidad inherente a los tiempos de fabricación, el número de unidades a ser obtenido por referencia, los tiempos de alistamiento y su variabilidad, los tiempos correspondientes a actividades de mantenimiento (preventivo, programado y correctivo), la generación de artículos defectuosos en el sistema de fabricación, la habilidad de las personas, entre otras.

De acuerdo con el párrafo previo, se hace notar que el presente proyecto busca minimizar el tiempo de procesamiento, el costo de mano de obra directa y el porcentaje de fracción defectuosa causado por la fatiga del operario, en un Sistema Job Shop de una Compañía metalmecánica. Al respecto, es necesario aclarar que el análisis correspondiente al proyecto considerado, se efectúa tomando la información de una referencia (tipo de artículo), seleccionada por la organización objeto de estudio. Asimismo, se indica que tal empresa, con el propósito de evaluar el problema planteado, suministra entre otros aspectos, la siguiente información: la ruta de procesamiento de la referencia elegida, las variaciones de la ruta, la justificación de estas variaciones y a su vez, la fracción defectuosa horaria generada por la fatiga de la persona.

De forma particular, en cuanto a la minimización del tiempo de proceso, las técnicas tradicionales de programación de operaciones, identifican el recurso con mayor carga.

Este recurso deberá ser prioritariamente programado, evitando la existencia de tiempos muertos. (Domínguez et al, 1995). La solución ilustrada, se complementa con las reglas de priorización para la programación de operaciones. Estas reglas inicialmente fueron utilizadas en los escenarios de “N” actividades - una máquina (Heizer & Render, 2004); sin embargo, debido a la necesidad de aplicación, se extendieron posteriormente a los escenarios “N” actividades - “M” máquinas. Es así como, si bien se trata de programar con prioridad el recurso con mayor carga, éste plan inicial puede ajustarse, de tal manera que se atienda por ejemplo con premura, aquellos pedidos que generen mayor liquidez para una compañía o pertenezcan a los clientes más importantes.

De otro lado, se observa en la actualidad un relevante interés académico, hacia la aplicación de técnicas basadas en inteligencia artificial. Estas técnicas tratan de identificar en tiempos de cómputo relativamente bajos, el menor tiempo de procesamiento. Los desarrollos al respecto incluyen métodos constructivos, aleatorizados, de búsqueda local, con memoria, poblacionales y de enjambres.

A su vez, las tendencias de la heurística muestran que las técnicas pertenecientes a la inteligencia artificial, pueden complementarse unas a otras, generando metodologías robustas, denominadas híbridos. Estos métodos en caso de estructurarse para evaluar determinados contextos, permiten acercarse de mejor manera que los métodos estrictamente heurísticos, al óptimo global del sistema.

Específicamente, el presente proyecto, busca diseñar una metodología fundamentada en los algoritmos Vega y Moga, por medio de la cual se logre minimizar el comportamiento de tres variables. Se comenta por tanto que si bien, existen algunas modalidades de algoritmos genéticos desarrollados con éste fin, hasta el momento no se han analizado de manera simultánea en ningún tipo de antecedente literario, el cumplimiento de los objetivos: mínimo tiempo de procesamiento, mínimo costo de mano de obra directa y mínimo porcentaje de fracción defectuosa causada por la fatiga del operario.

Con el propósito de atender los requerimientos arriba definidos, el proyecto se aborda en las siguientes fases:

En la primera fase, se presenta la revisión bibliográfica relacionada con los enfoques tanto tradicionales como inteligentes de la programación de operaciones.

En la segunda fase, se ilustra la metodología por medio de la cual se desarrolla el proyecto. De esta forma, el mencionado componente metodológico se implementa en cuatro etapas. En la primera etapa se describe el método híbrido entre los algoritmos multiobjetivo Vega y Moga (método uno). En la segunda etapa se describe el método

híbrido entre algoritmos genéticos y sumas ponderadas (método dos). En la tercera etapa se realiza un análisis comparativo entre los métodos anteriores y, por último, en la cuarta etapa se muestra el análisis de varianza correspondiente al método uno.

En la tercera fase del proyecto se observa la experimentación. En esta fase, se caracterizan los datos necesarios que permiten aplicar los aspectos señalados en el componente metodológico.

En la cuarta fase, se presentan los resultados correspondientes al desarrollo de la metodología. Es así como, se aprecian los siguientes elementos por cada método (método uno y método dos): población final de respuesta, definición de frentes, definición de intervalos en el primer frente, análisis por datos agrupados para el primer frente y análisis de pertenencia por intervalo. Asimismo, en esta fase se muestra también la comparación entre métodos, considerando esta vez los aspectos mencionados enseguida: variación entre métodos, individuos de mínimo valor en cada método, número de frentes por método y número de individuos por intervalo en cada método.

En la quinta fase, se ilustran las conclusiones, procediendo a identificar los argumentos que permiten evidenciar el cumplimiento de los objetivos establecidos en el proyecto, al evaluar la aplicación de la metodología a los datos experimentales.

Finalmente, se presentan las líneas de acción futuras. En esta fase, se determina la complementariedad de los conceptos que soportan el proyecto con otros conceptos, cuyo desarrollo sea de interés relevante para la comunidad académica. Por tanto, se establecen líneas generales de acción que pueden conducir al planteamiento de nuevos proyectos.

1 PRELIMINARES

A continuación se presentarán los siguientes aspectos: justificación del problema, área problemática, formulación del problema, objetivos y planteamiento de la hipótesis.

1.1 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.

En la actualidad las empresas atienden mercados saturados por gran cantidad de proveedores, los cuales implementan diversas estrategias con el propósito de mantener la preferencia de sus clientes; es así como, se busca garantizar su permanencia y crecimiento futuro.

De acuerdo con lo anterior, se analizará en éste proyecto de manera particular una empresa cuyo sistema de fabricación se encuentre configurado como tipo “Job Shop”, evaluando el comportamiento de algunas prioridades competitivas de operaciones (Leong et al, 1990).

Respecto a lo afirmado, las prioridades competitivas en operaciones son: tiempo de entrega, calidad, flexibilidad y costos.

Igualmente, es necesario anotar que al momento de evaluar un sistema de producción tipo “Job Shop”, pueden identificarse gran diversidad de variables intervinientes en el proceso, algunas de ellas son: tiempo de procesamiento, tiempo de tardanza total, tiempos de carga total, tiempos de alistamiento, producción de artículos defectuosos causado por la fatiga del operario, costo de mano de obra directa, etc. Respecto a las cuatro primeras variables, diversos autores las han analizado, llegando a aplicar técnicas inteligentes para lograr su minimización. En cuanto a las dos últimas, no se han detectado antecedentes de análisis en la literatura especializada, por lo cual se concluye la existencia de una oportunidad académica de desarrollo.

A su vez, en los sistemas de producción que utilizan mano de obra intensiva, se ha establecido que la causa de fabricación de artículos no conformes, se origina la mayor parte de las veces en la fatiga del operario, la cual se incrementa al transcurrir la jornada laboral (Estrada, 2000). También debe mencionarse que la producción de artículos defectuosos, aumenta los costos de operación e incide sobre el mayor tiempo de procesamiento, ocasionando entregas con retraso y como consecuencia la pérdida potencial de los clientes (Noori & Radford, 1997).

Cabe aclarar que la pérdida potencial de mercado, podría incidir en la desaparición de una empresa, ocasionando el respectivo surgimiento de una serie de efectos no deseados: supresión de puestos de trabajo, aumento en los índices de desempleo y la disminución de la calidad de vida de las familias afectadas (Goldratt, 1995).

En cuanto al costo de mano de obra directa, en algunos casos toma la figura de tiempo extra o de recargo nocturno. La extensión del horario normal, se origina en la necesidad de atender las fechas de entrega pactadas con los clientes, lo cual incrementa los costos de producción, reduciendo la rentabilidad y por ende la capacidad de inversión de la compañía (Silver et al, 1998).

Complementariamente, se afirma que la prioridad competitiva tiempo de entrega, puede verse afectada por el comportamiento de la variable tiempo de procesamiento (Ballou, 2004). Dado el caso que el tiempo de procesamiento no sea el apropiado, posiblemente se entregue con retraso al cliente (Hopp & Spearman, 1996), generando su insatisfacción, además de los efectos ya mencionados.

Con base en lo expuesto, se decide desde las técnicas de la inteligencia artificial, aplicar algoritmos genéticos multiobjetivos, para minimizar el comportamiento de las variables: tiempo de procesamiento, porcentaje de producción defectuosa y el costo por mano de obra directa; esperando disminuir los potenciales efectos negativos arriba nombrados.

Así mismo, es conveniente mencionar la importancia que ha dado el estado colombiano a la reconversión de algunos renglones económicos, bajo el programa de transformación productiva liderado por el ministerio de comercio, industria y turismo A continuación, se muestran las metas correspondientes a dicho programa para el año 2014 (Tomado de: <https://www.mincomercio.gov.co/publicaciones.php?id=847>):

Tabla 1. Proyección de crecimiento en el PTP.

Renglón	Meta de nuevos empleos	Cambio en nivel de exportaciones (millones de dólares)
Autopartes y vehículos	4.000	670 a 1.000
Camaronicultura	1.150	55 a 85
Carne bovina	25.000	25 a 300
Chocolatería, confitería y sus materias primas.	4.460	275 a 540
Cosméticos y artículos de aseo.	6.000	700 a 1.100
Editoriales e industrias gráficas	3.350	260 a 620
Energía eléctrica y servicios conexos.	4.200	400 a 1.800
Palma, aceites, grasas y biocombustibles	24.300	130 a 370
Software y tecnologías de la información.	Llegar en el sector a 24.690 empleos	10 a 500
Industria textil, confección, diseño y moda, calzado, cuero y marroquinería.	143.000	1.000 a 3.900
Turismo de salud	700	160 a 300
Siderurgia y metalmecánico.	Llegar en el sector a 112.232 empleos en 2016 (*)	674.125 toneladas exportadas en 2016.(*)
Hortofrutícola.		Aumentar las exportaciones 30 % en el corto plazo y 50 % en el mediano plazo. y largo plazo(*)

También se comenta que los renglones económicos listados en la tabla 1, se encuentran expuestos a la competencia internacional generada por los diversos tratados de libre comercio recientemente firmados.

Con base en lo expresado, se concluye la necesidad por parte de las empresas ubicadas en los sectores pertenecientes al programa de transformación productiva, de incorporar metodologías para gestión de operaciones estructuradas bajo los conceptos de inteligencia artificial; de tal forma, se les habilitará con un factor importante de competitividad en los mercados globales. En caso de no adaptar ese tipo de metodologías, posiblemente la viabilidad de éstas organizaciones se vea afectada en el corto o mediano plazo, conduciendo a la reducción de su tamaño o a su desaparición como unidades de negocio.

Particularmente, el proyecto se realizará en una empresa del renglón de la siderurgia y metalmecánico, el cual presenta entre algunos de sus indicadores, el siguiente comportamiento a 2012 (Tomado de https://www.andi.com.co/pages/prensa/comunicados_prensa_detalle.aspx?Id=282):

- Genera el 11,6% de la producción manufacturera.
- Aporta el 13,44% del total del empleo manufacturero.

De acuerdo con el desempeño mostrado, se concluye que implementar el proyecto en una empresa de tal renglón, se convierte en una oportunidad de desarrollo, debido a que su tamaño es significativo para la industria del país. La federación colombiana de industrias metalúrgicas (entidad que agremia al sector siderúrgico y metalmecánico), podría replicar la experiencia en otras empresas, extendiendo el beneficio al renglón económico en su

conjunto. Con base en lo anterior, se menciona que los ahorros en costos, se podrían utilizar en nuevas inversiones para las plantas de producción, aprovechando las actuales oportunidades de expansión de los mercados, lo cual tendría como efecto potencial, la generación de fuentes de empleo.

Finalmente, desde el enfoque académico, se hace notar que el proyecto amplía la base de conocimiento al analizar dos variables (costo de mano de obra directa y fracción defectuosa debida a la fatiga del operario), de las cuales no se ha caracterizado su desempeño en los sistemas de producción tipo “Job Shop”. De esta manera, al momento de efectuar el análisis requerido sobre las variables en cuestión y, considerando a su vez las perspectivas de desarrollo del presente trabajo, se propone como etapa básica, diseñar un algoritmo que fusione aquellos elementos importantes de los algoritmos VEGA y MOGA. Es así como los resultados obtenidos por medio de la aplicación del algoritmo diseñado, podrán compararse con los resultados obtenidos al aplicar posteriormente sobre la misma situación, los algoritmos NSGA II, SPEA II u otro tipo de métodos híbridos entre técnicas heurísticas y/o técnicas exactas.

1.2 ÁREA PROBLEMÁTICA.

De acuerdo con lo mencionado previamente, se analiza una organización metalmecánica, cuyo sistema de fabricación se categoriza como “Job Shop”. Para ésta compañía, se describirá enseguida el comportamiento de las variables: tiempo de proceso, fracción defectuosa causada por la fatiga del operario y costos por mano de obra directa.

1.2.1 Tiempo de procesamiento.

En cuanto a la determinación del tiempo de proceso, puede afirmarse que la organización estima su comportamiento de manera intuitiva, fundamentándose en la experiencia del personal de ingeniería de diseño, quienes de acuerdo con la naturaleza de los pedidos, realizan una proyección global de la variable considerada, desconociendo la necesidad de preparar planes detallados de producción. Debido a lo anterior, se generan como efectos observables los siguiente hechos: improvisación en las asignaciones de personas y equipos para las diferentes órdenes de trabajo, producto en proceso retenido, falta de

material en proceso, dilatación de los tiempos de entrega y reducción en el nivel de servicio.

1.2.2 Fracción defectuosa causada por la fatiga del operario.

La organización objeto de estudio utiliza mano de obra intensiva en el proceso productivo; por tanto, al transcurrir la jornada laboral, debido a la fatiga de la persona se incrementa la probabilidad de obtener artículos no conformes. En la tabla 40, se muestra la proporción de productos no conformes originada por la fatiga del operario. Los valores contenidos en dicha tabla pueden calificarse como significativos, ya que implican reprocesamiento de productos no conformes, reducción de la capacidad productiva, consumos no planeados de materia prima, programación de tiempos extras no previstos, aumentos en los costos directos e indirectos de producción, entre otros aspectos.

1.2.3 Costos de mano de obra directa.

En cuanto a los costos de mano de obra directa, se hace notar que debido a las fluctuaciones incidentes sobre el renglón económico en el cual se encuentra clasificada la compañía, la demanda de mercado frecuentemente se incrementa o se reduce, dificultándose tomar de forma oportuna la decisión de qué tipo de esquema laboral será adoptado por la organización (determinación del número de horas a laborar tanto por día como por semana). Con relación a la decisión del esquema laboral a ser adoptado, se busca identificar un programa de producción, bajo el cual se opere al menor costo posible de mano de obra directa.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

¿Cómo diseñar y aplicar una metodología multiobjetivo basada en los algoritmos genéticos “VEGA” y “MOGA”, para mejorar el desempeño de las variables tiempo de procesamiento, fracción de producción defectuosa causada por la fatiga del operario y costo de mano de obra directa, en un sistema de fabricación tipo “Job Shop” de una Compañía metalmecánica?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general.

Por medio de los algoritmos genéticos “VEGA” y “MOGA, diseñar una metodología multiobjetivo, que permita mejorar el desempeño de las variables: tiempo de procesamiento, fracción de producción defectuosa causada por la fatiga del operario y costo de mano de obra directa, en una compañía metalmeccánica, cuyo sistema de fabricación sea del tipo “Job Shop”.

1.4.2 Objetivos específicos.

- Realizar una revisión bibliográfica de las principales técnicas tradicionales e inteligentes que se han utilizado para analizar el problema de programación del sistema de fabricación tipo “Job Shop”, con el propósito de identificar sus antecedentes, su estado de desarrollo actual y sus tendencias.
- Establecer las variables dependientes e independientes del proceso de programación de producción en una compañía cuyo sistema de fabricación sea del tipo “Job Shop”, con el fin de diseñar una metodología multiobjetivo basada en los algoritmos genéticos “VEGA” Y “MOGA”.
- Aplicar la metodología diseñada a la compañía objeto de estudio, con el propósito de obtener los resultados correspondientes al comportamiento de las variables: tiempo de procesamiento, fracción de producción defectuosa causada por la fatiga del operario y costo de mano de obra directa.

- Realizar un análisis estadístico de los resultados obtenidos al aplicar la metodología, con el fin de evaluar su efectividad frente a otras metodologías que a nivel tradicional, se utilicen en la solución de ésta clase de problemas.

1.5 PLANTEAMIENTO DE LA HIPOTESIS

¿Mediante el diseño y aplicación de una metodología multiobjetivo basada en los algoritmos genéticos “VEGA” y “MOGA”, es factible mejorar el desempeño de las variables tiempo de procesamiento, fracción de producción defectuosa causada por la fatiga del operario y costo de mano de obra directa, en un sistema de fabricación tipo “Job Shop” de una Compañía metalmecánica?

2 MARCO TEÓRICO.

Se tratarán a continuación, los siguientes temas: decisiones en operaciones, conceptualización sobre configuraciones productivas, Sistemas de trabajo de taller o de planta (Job Shop), el renglón metalmecánico en Colombia, conceptualización general sobre inteligencia artificial y metaheurística y, por último métodos tradicionales y aplicaciones basadas en algoritmos genéticos para el abordaje del problema.

2.1 Decisiones en operaciones.

Las decisiones en operaciones, cubren básicamente cinco aspectos (Schroeder, 1992):

- Decisiones de capacidad. Se determina la cantidad de recursos requeridos en el largo plazo. Igualmente, se establece cómo se utilizarán los recursos en el mediano y en el corto plazo.
- Decisiones de inventario: Se determina la cantidad de producto terminado, producto en proceso y materia prima que deben mantenerse en inventario. Respecto a las materias primas, se establecen las fechas de compra y las cantidades a comprar. Respecto al producto terminado, se define el plan de entregas.
- Decisiones de proceso: Se deciden las características técnicas de las máquinas y equipos a adquirir, el flujo de materiales y la distribución de las instalaciones.
- Decisiones de talento humano: Se establecen los medios de contratación, capacitación, evaluación del desempeño, remuneración y despido.
- Decisiones de calidad: Se especifican las características de calidad de la materia prima, del producto en proceso y del producto terminado.

2.2 Conceptualización sobre configuraciones productivas

Las configuraciones productivas se clasifican en las siguientes categorías (Adam & Ebert, 1991):

- Proyectos: En ésta configuración, se obtienen productos individuales ajustados a las necesidades de cada cliente.

- Trabajo de taller o de planta (Job Shop). Se fabrican pequeños lotes de gran variedad de productos. Cada tipo de referencia presenta un diseño único, por tanto se generan diferentes rutas en el proceso de fabricación.
- Por lotes. Se manufacturan lotes de mayor tamaño que los de tipo taller, lo cual facilita generar algunas condiciones de estandarización, que no pueden compararse con los niveles alcanzados en una línea de ensamble.
- Líneas de ensamblaje (Flow Shop): En ésta configuración se obtienen productos estandarizados en pocos modelos.
- Continuos: Su estandarización es muy alta, se fabrican pocos productos. En general los artículos siguen la misma ruta al ser procesados.

2.3 Sistemas de trabajo de taller o de planta (Job Shop).

Para ilustrar las características generales del sistema “Job Shop”, se describirán a continuación los siguientes aspectos: Políticas de la compañía, naturaleza de los equipos, habilidades de las personas, métodos de trabajo y determinación de tiempos de operación (Meredith & Gibbs, 1986).

- Políticas de la compañía. En éste caso, la orientación estratégica explicita la intención de adaptarse a las necesidades cambiantes de los clientes, por lo cual se debe estar en capacidad de fabricar gran variedad de referencias.
- Naturaleza de los equipos. Los equipos son de uso genérico, por tanto es posible obtener productos terminados. de diferentes especificaciones.
- Habilidades de las personas. Las personas deben ser polivalentes, de tal forma podrán realizar diferentes tipos de actividades en sus puestos de trabajo.
- Métodos de trabajo: Son variables dependiendo de la referencia. La dirección de operaciones, debe prever frente a la naturaleza del pedido, el acondicionamiento necesario para los puestos de trabajo.
- Determinación de tiempos de operación: Se recurre a las tablas de tiempos predeterminados, pero en algunos casos son imprecisas. Debido a lo anterior, se recomienda a las organizaciones construir sus propios registros históricos de tiempos de operación, documentándolos de acuerdo con las especificaciones de cada tipo de movimiento.

2.4 El renglón metalmecánico en Colombia.

Este renglón se analizará en dos apartes, en el primero se mostrarán sus características generales y en el segundo se describirán algunos elementos de sus procesos productivos.

2.4.1 Características generales del renglón metalmecánico en Colombia.

La producción metalmecánica en Colombia hace parte del renglón “siderurgia y metalmecánico”.

Las empresas metalmecánicas se encuentran agremiadas por Fedemetal (Federación Colombiana de Industrias Metalúrgicas). Fedemetal es el vocero de su cadena productiva, se encarga de llevar registros actualizados de producción y ventas, participa en las negociaciones internacionales y busca en general, el diseño y ejecución de proyectos para beneficiar a sus afiliados (Tomado de : <http://www.andi.com.co/pages/comun/infogeneral.aspx?Id=27&Tipo=2>)

La producción metalmecánica en Colombia agrupa los siguientes tipos de industria (Tomado de: http://www.imebu.gov.co/documentos/observatorio/mercado_trabajo/Estudio%20Sector%20Metalmecanico.pdf)

Industrias básicas de hierro y acero.

Industrias básicas de metales preciosos y de metales no ferrosos.

Industrias de fabricación de productos para uso estructural

Industrias de fabricación de otros productos elaborados de metal y actividades de servicios relacionadas con el trabajo de metales.

Industrias de fabricación de maquinaria de uso general.

Industrias de fabricación de maquinaria de uso especial

Industrias de fabricación de aparatos de uso doméstico.

Industrias de fabricación de vehículos automotores y sus motores.

Industrias de fabricación de carrocerías para vehículos automotores.

Industrias de fabricación de remolques y semirremolques.

Industrias de fabricación de partes, piezas y accesorios (autopartes) para vehículos automotores y sus motores.

Industrias de construcción y reparación de buques y de otras embarcaciones.

Industrias de fabricación de aeronaves y de naves espaciales.

Industrias de fabricación de otros tipos de transporte.

La información sobre la capacidad de producción actual del renglón y su proyección, se presentó en la justificación del problema.

2.4.2 Características generales de los procesos de producción metalmecánicos.

Los procesos metalmecánicos en general involucran las siguientes operaciones (tomado de <http://sites.google.com/site/procesosmetalmecanicosunal/>):

- Procesos por arranque de viruta:

Al respecto, se considera:

Fluidos para corte

Procesos de corte con herramienta monofilos: Torneado, Limado, Cepillado, Mortajado

Procesos de corte con herramienta multifilo: Taladrado, Fresado, Brochado

Procesos de corte con herramientas abrasivas: Esmerilado, Rectificado

Procesos por cizallamiento: Troquelado

- Procesos asociados al cambio de propiedades físicas.

Tratamientos térmicos.

- Procesos asociados al mantenimiento de la cohesión y el cambio de forma.

Las operaciones propias de estos procesos son:

Conformado metálico

Laminación

Forja

Extrusión

Trefilado

Embutición

Doblado

- Procesos de unión y ensamble.

Las operaciones de estos procesos son:

Soldadura

Uniones adhesivas

Ensamble mecánico: Sujetadores roscados, remaches, otros métodos

Unión con materiales no metálicos.

2.5 Conceptualización general sobre inteligencia artificial, metaheurística y algoritmos genéticos.

A continuación se presentan los conceptos relacionados con los siguientes aspectos: inteligencia artificial, metaheurística y algoritmos genéticos.

2.5.1 Inteligencia Artificial.

Campo de la investigación en el cual se diseñan sistemas que tratan de imitar la inteligencia humana. Con éste fin se aplican desarrollos relacionados con teorías de la computación, la información y el control (Gallardo & Avila, 2008).

Dentro de las áreas de aplicación de la inteligencia artificial, se encuentra la Metaheurística. Es así como se presenta enseguida la caracterización del tema mencionado.

2.5.2 Metaheurística.

Hace referencia a un conjunto de métodos que permiten obtener soluciones aproximadas utilizando procedimientos sistemáticos. Con éste propósito, toma como referentes los desarrollos computacionales, la optimización y la estadística. La metaheurística generalmente es usada para resolver problemas de optimización combinatoria (Gendreau & Potvin, 2005).

La metaheurística cubre en términos generales los siguientes aspectos:

2.5.2.1 Métodos constructivos.

Son utilizados para definir soluciones sobre aquellos problemas de los cuales se desconoce cualquier aproximación inicial. Para éste efecto, se establecen las reglas que permitirán obtener las mencionadas soluciones (Schrimpf et al, 1999).

2.5.2.2 Recocido Simulado.

Es un método de aleatorización que permite a través de su diseño estadístico, evitar aquellas soluciones cercanas al óptimo local, desplazándose hacia otras regiones en las cuales pueda encontrarse el óptimo global (Kathryn & Belarmino, 2003).

2.5.2.3 Búsqueda local iterada.

Permite rastrear la solución a un problema de optimización combinatoria. Se diseña por tanto, un algoritmo de búsqueda que una vez identificado un óptimo local, trata de buscar otra solución óptima perturbando la solución actual sin aleatorizar (Martin et al, 2003)

2.5.2.4 Búsqueda de entorno variable (Variable Neighbourhood Search, VNS)

La idea fundamental de VNS, se orienta a cambiar sistemáticamente de estructura de entornos en una búsqueda local, lo cual mejora la detección de soluciones satisfactorias. (Hansen et al, 2003)

2.5.2.5 Grasp (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure).

Esta metodología en cada iteración recorre dos fases, la primera de construcción y la siguiente de búsqueda local. En la fase de construcción, se obtiene una solución factible mientras que en la segunda, se detecta un posible valor óptimo. El valor óptimo se guarda. Posteriormente, se continúan recorriendo las fases nombradas durante varias iteraciones. Se selecciona entonces como solución, el mejor de los valores óptimos que se guardaron (Rabello et al, 2008).

2.5.2.6 Búsqueda Tabú

La búsqueda tabú también realiza búsquedas locales, pero en éste caso se mejora el rendimiento debido al uso de estructuras de memoria, en las cuales se graban las soluciones de apropiado potencial. Después de recorridos los diversos vecindarios, se selecciona la mejor de las soluciones grabadas (Glover & Melián, 2003).

2.5.2.7 Colonia de hormigas.

En éste caso se trata de imitar el método por medio del cual las hormigas encuentran el camino más corto entre una fuente de comida y el hormiguero. En términos generales se diseña un agente computacional, el cual: graba las soluciones factibles, graba la forma de obtener soluciones factibles, selecciona y graba las mejores soluciones y selecciona la mejor solución encontrada (Feitó & Cespón, 2009).

2.5.2.8 Algoritmos híbridos.

De acuerdo con la situación bajo análisis, se diseñan metodologías robustas, las cuales toman diversos elementos de las metodologías anteriores. En general el desempeño de los algoritmos híbridos es apropiado, pero en algunos casos se debe evitar el incremento de los tiempos de cómputo. (Talbi, 2002)

La metaheurística también incluye como uno de sus elementos centrales, el tema correspondiente a algoritmos genéticos. Este tema se desarrolla a continuación.

2.5.3 Algoritmos genéticos.

Es un método fundamentado en los principios de la selección natural y en la supervivencia del más fuerte. Así mismo, éste método es adaptativo y puede utilizarse para resolver problemas de búsqueda y de optimización (Rosing & ReVelle, 1997).

A nivel de algoritmos genéticos se utilizan las siguientes expresiones (Beasley et al., 1993):

- Individuo: Corresponde a cada una de las posibles soluciones. Por ejemplo si se tienen 6 pedidos por programar en una planta de producción, el orden de programación: 5,2,3,6,1,4, constituirá un Individuo. En éste caso en el individuo, se indica que el primer pedido en ser programado será el cinco.
- Gen: Hace referencia a cada una de las posiciones en el individuo. Por ejemplo, el primer gen en el individuo ejemplificado, corresponde al pedido cinco.
- Cromosoma: Hace referencia al conjunto de genes.
- Fenotipo: Contiene la información requerida para construir un organismo.
- Genotipo: Se refiere al organismo.
- Función de evaluación: Se refiere a la función que permite obtener el resultado de una solución, es decir, es el resultado de computar un individuo en la función.
- Función de adaptación: Se diseña para cada tipo de problema. Consiste en la asignación de un número real a cada cromosoma, el cual refleja la capacidad de adaptación del individuo (representado por el cromosoma) al problema.

El procedimiento general de los algoritmos genéticos, a nivel básico (canónico), consiste en (Gen & Cheng, 1997):

- Generar una población inicial, es decir, un conjunto de soluciones factibles
- Obtener la función de evaluación de cada individuo, es decir, la respuesta de la solución.
- Seleccionar dos individuos de la anterior generación.
- Seleccionar punto de corte en cada individuo seleccionado.
- Cruzar los individuos y obtener los descendientes.
- Mutar los dos descendientes.
- Obtener la función de evaluación de cada descendiente.
- Insertar los dos descendientes mutados en la nueva generación.
- Terminar, si la población ha convergido.

Finalmente, se comenta que utilizando algoritmos genéticos puede realizarse programación multiobjetivo, es decir, puede identificarse la forma de proceder, al tratar de cumplir varios objetivos de manera simultánea. Al respecto, los algoritmos genéticos

multiobjetivo que se fusionan en el proyecto, con el propósito de obtener una metodología robusta son:

2.5.3.1 Algoritmo Vega.

Con el propósito de aprovechar la potencialidad de los algoritmos genéticos para realizar optimización multiobjetivo, en el año de 1985, se realizó una propuesta en éste sentido. La propuesta consistió en readaptar la aptitud del vector valorado, lo cual recibió el nombre de algoritmo genético para evaluación del vector (Vector evaluated genetic algorithm: VEGA). Se modificó por tanto, el paso correspondiente a la selección. De ésta forma, en cada generación se obtuvieron cierto número de subpoblaciones, teniendo como criterio el desempeño de la función objetivo evaluada en su momento. Con base en lo expuesto, para “m” objetivos, “m” generaciones con tamaño N / m serían generadas, asumiendo que la población es de tamaño “N”. Posteriormente, las subpoblaciones se reúnen, con el propósito de continuar con las funciones usuales de cruzamiento y mutación (Toscano, 2001).

2.5.3.2 Algoritmo Moga.

Inicialmente en la programación multiobjetivo, se lograba convergencia hacia cierto tipo de soluciones que reciben el nombre de frontera de Pareto. El riesgo de éste enfoque consiste en su poca capacidad de evitar que un óptimo local sea identificado como solución. Es así como en 1993, se diseña la aplicación denominada: algoritmo genético multiobjetivo (Multiobjective genetic algorithm: MOGA), la cual permite, por medio de la modificación de la función de adaptación, ampliar la búsqueda hacia áreas de la frontera de Pareto con pocos puntos solución. De ésta forma, se extiende el espacio de búsqueda, evitando los óptimos locales (Baesler et al, 2006).

2.6 Métodos tradicionales y aplicaciones basadas en algoritmos genéticos para el abordaje del problema.

2.6.1 Métodos tradicionales para el abordaje del problema.

Los métodos tradicionales se tratarán en dos instancias, en primera instancia se describirá la determinación de los tiempos de procesamiento a nivel mono objetivo, en segunda instancia, se observarán los métodos relacionados con la solución de problemas multiobjetivo.

2.6.1.1 Métodos tradicionales para la determinación del tiempo de procesamiento.

La programación de las operaciones en los sistemas “Job Shop”, es compleja. En caso de existir “n” trabajos y “m” máquinas, el número de programas posibles es de $(n!)^m$. (Sipper & Bulfin, 1998). En términos generales, dicha programación se ha realizado, siguiendo dos tendencias:

- Determinación de tiempo de carga.

En éste caso, se trata de identificar los centros de trabajo que de acuerdo con el nivel de demanda, requieren mayor asignación de tiempo. Aquel o aquellos centros que presenten mayor volumen de carga, deberán ser programados con prioridad, de tal manera que sus tiempos muertos sean escasos o inexistentes. Consecuentemente el tiempo de procesamiento se verá reducido (Sipper & Bulfin, 1998).

De manera análoga, se propone en el procedimiento de mejora continua, definido desde teoría de restricciones: “Explotar la restricción”, es decir, lograr que el recurso más lento, sea programado la mayor parte posible del tiempo (Goldratt, 1993).

- Reglas de despacho (Chase et al, 1995).

Se trata de definir el orden de programación de los pedidos en la planta, utilizando una serie de reglas de prioridad, las cuales son:

- Primero en llegar primero en ser atendido.

- Menor tiempo operativo. Se programa primero el pedido con menor tiempo de terminación, luego el segundo, etc.
- Fecha de entrega: Se programa de manera prioritaria los pedidos con fecha de entrega más cercana.
- Fecha de inicio: Se programan primero los pedidos que tengan menor fecha de inicio (fecha de entrega menos tiempo de entrega normal).
- Tiempo de holgura faltante (THF): Se calcula como la diferencia entre aquel tiempo que falta para llegar a la fecha de entrega menos el tiempo de procesamiento que falta. Se programan primero los pedidos de menor THF.
- Relación crítica: Se calcula como la diferencia entre la fecha de entrega y la fecha actual, dividiendo éste valor entre el trabajo faltante. Se programan primero los pedidos con menor valor de RC.
- Relación de cola. Se calcula como el tiempo de holgura faltante del programa dividido entre el tiempo de cola planificado faltante. Primero se ejecutan los pedidos con menor valor de relación de cola.

2.6.1.2 Métodos tradicionales de programación multiobjetivo (Coello, 2002).

Los métodos tradicionales para la programación multiobjetivo cubren los siguientes temas:

- Método de la suma ponderada: En este método se trata de identificar aquella solución que presente el mayor valor ponderado. El valor ponderado proviene de sumar los productos de los valores ponderados de cada función objetivo por sus respectivos coeficientes de peso. Los coeficientes de peso son predefinidos por el agente decisor.
- Programación por metas: Este método se encuentra basado en los conceptos de programación lineal. De esta forma, se establece una función objetivo que pretende minimizar una serie de desviaciones, las cuales están relacionadas con las restricciones del modelo (evitar sobrepasar el presupuesto, lograr un nivel mínimo de ganancia, etc). Es así como, se busca encontrar la combinación lineal que permita cumplir las metas establecidas.
- Método de las restricciones: El método se origina en los preceptos de la programación lineal. En este caso se selecciona un objetivo del conjunto de objetivos, los demás objetivos se interpretan como restricciones. El problema se resuelve tratando de cumplir la función objetivo y a la vez tratando de satisfacer las diversas restricciones.

Asimismo, dicho problema debe solucionarse tantas veces como objetivos existan. De acuerdo con lo anterior, se analiza el conjunto de soluciones. Es así como, a partir del análisis efectuado se establece el curso de acción a tomar.

- Método lexicográfico. En éste método las funciones objetivo se ordenan por nivel de importancia. El método optimiza con prioridad la función con primer nivel de importancia, la cual se encuentra sujeta a ciertas restricciones. Más adelante optimiza la función con segundo nivel de importancia, considerando en este caso como restricción los resultados de optimizar la primera función objetivo. De ésta forma, se continúa optimizando cada función, tomando como restricciones los resultados previos.

2.6.2 Aplicaciones basadas en algoritmos genéticos para el abordaje del problema.

A continuación, se presenta el desarrollo relacionado con la aplicación de algoritmos genéticos en el campo de análisis de los problemas correspondientes a los sistemas de producción, “Job Shop”. Al respecto, debe anotarse que antes de 2008, tal tipo de aplicaciones eran escasas, por lo cual el tratamiento de la información para épocas anteriores a tal año, tiene como alcance la gestión operacional en su conjunto. Con base en lo expuesto, se utilizará la siguiente clasificación para abordar integralmente el tema en cuestión: aplicaciones en renglones económicos diferentes a la industria, problemas generales de la gestión operacional, problemas de logística externa, problemas de la gestión del mantenimiento, problemas de N actividades en una Máquina, desarrollos generales a nivel multi objetivo, problemas del tipo flow shop y problemas del tipo Job Shop.

2.6.2.1 Aplicaciones en renglones económicos diferentes a la Industria.

Existen desarrollos en temas a fines a la gestión operacional, pero correspondientes a algunos renglones económicos específicos, así:

Se usaron algoritmos genéticos para identificar el uso futuro de los terrenos y de las vías de transporte en una ciudad en crecimiento. Se incluyeron también las restricciones pertinentes para asegurar el acceso a las zonas residenciales. Los objetivos perseguidos son minimizar la congestión del tráfico y minimizar los costos. De acuerdo con lo anterior,

se genera un cuerpo organizado de alternativas factibles, que servirán como base para la toma decisiones (Balling et al, 1.999).

Posteriormente, se obtuvieron en el mismo año tres avances. El primero de ellos se relaciona con la aplicación de un algoritmo genético adaptado a la determinación de tiempos de procesamiento en proyectos de construcción, los cuales podrían considerar o no la existencia de restricciones (Toklu, 2002). El segundo, utiliza algoritmos genéticos para la distribución en planta en el sector de la construcción, observándose de un lado el cambio de la misma al avanzar el proyecto y del otro, el costo asociado a dicha distribución (Mawdesley et al, 2002). Por último, el tercer avance presenta de forma conceptual el manejo de los algoritmos genéticos, enfatizando su utilidad en el ajuste de controladores industriales (Cabezas, 2002).

2.6.2.2 Aplicaciones a los problemas generales de la gestión operacional.

Se resolvió el problema de planeación agregada, considerando que las tasas de producción pueden variar en los diferentes intervalos de tiempo analizados. Para éste efecto, el algoritmo genético se fusionó con elementos de recocido simulado (Ganesh & Punniyamoorthy, 2004).

2.6.2.3 Aplicaciones a los problemas relacionados con logística externa:

En cuanto al campo del ruteo, se elaboró un algoritmo genético y un algoritmo de búsqueda exhaustiva, para optimizar la localización de origen y las rutas que seguirá un bus alimentador, en un sistema integrado de transporte (Chien et al 2001). Igualmente, se aplicó búsqueda tabú y algoritmos genéticos para el problema de programación de conductores de autobús en ambientes multiobjetivo: costos y calidad del servicio. (Lourenço et al, 2001)

Posteriormente, se propone una multimatriz real codificada basada en algoritmos evolutivos, la cual permite minimizar el costo asociado con la operación de la cadena de suministro (Pongcharoen et al, 2007). A su vez, también se diseña un algoritmo genético de grupo, el cual es utilizado para resolver el problema del agente viajero (Brown et al., 2007).

2.6.2.4 Aplicaciones en problemas de la Gestión del Mantenimiento:

Como apoyo a las actividades de transformación, se diseñó un algoritmo genético para establecer la metodología de programación de las actividades de mantenimiento en un sistema de manufactura flexible. De ésta forma, se minimizó su tiempo de ejecución (Lin et al, 2000).

Posteriormente, se propuso la aplicación de algoritmos genéticos para el programa de mantenimiento preventivo, cuando se tiene una gran cantidad de equipos por ser revisados y personas por ser programadas, lo cual se torna bastante complejo con los modelos matemáticos tradicionales (Shum & Gong, 2006).

2.6.2.5 Aplicaciones a los problemas de “N” actividades en una máquina.

En primera instancia, se desarrolló el análisis de programación de una sola máquina, la cual debe procesar varios trabajos cuyos tiempos de fabricación y de alistamiento son diferentes. De ésta forma, se aplican algoritmos genéticos, con el propósito de identificar el menor tiempo de tardanza posible (Herrman & Lee, 1995).

Con mucha posterioridad, se definieron algoritmos genéticos para el problema de programación de una máquina, la cual debe cumplir con un plan de entregas transfiriendo por lotes (Mazdeh et al, 2012).

Más adelante, se planteó un algoritmo genético para el problema de programación de una máquina, considerando en este caso un contexto de cambio dinámico, el cual exige programar con reglas multicriterio una gran variedad de productos cuyos tiempos de preparación y de operación, presentan alto grado de variabilidad. De esta forma, se busca identificar frente a ciertos cambios en el contexto de una Compañía, cuál es la secuencia de producción que frente a ese cambio, genera el menor tiempo de retraso posible (Ozdoglu et al, 2013).

2.6.2.6 Desarrollos generales a nivel multiobjetivo:

Inicialmente, se aplica el algoritmo MOGA a una situación particular, con el propósito de identificar diferentes tipos de soluciones ante objetivos que son incompatibles (Shaw & Fleming, 2000).

De manera complementaria y con el propósito de lograr el cumplimiento de múltiples objetivos, se fusionó el algoritmo multiobjetivo MOGA con heurísticas que permiten

eliminar sus deficiencias. De acuerdo con lo anterior, se diseñó un MOGA híbrido, cuya aplicación a nivel de resultados se comparó con otras técnicas, incluyendo el mismo algoritmo MOGA (Reynolds & Azarm, 2002).

Más adelante, se propuso una función de Optimización multiobjetivo global de una planta de tratamiento de aguas residuales. Para éste caso se utiliza modelación y algoritmos genéticos (Raud et al, 2007).

Finalmente, se plantean funciones multiobjetivo con el fin de seleccionar fuentes de recursos hídricos en escenarios con restricciones (Yang et al, 2007).

2.6.2.7 Aplicaciones a los problemas del tipo Flow Shop.

El primer acercamiento utilizando algoritmos genéticos a éste tipo de situación, buscó minimizar el tiempo de procesamiento en el problema de balanceo de líneas de ensamble (Anderson & Ferris, 1994).

Más adelante, se aplicó una metodología de algoritmos genéticos, al problema de distribución de Instalaciones de una compañía, cuyo sistema de producción requiere tanques de mezclado. Estos tanques alimentan por tubería las líneas de producción. De acuerdo con lo anterior, se obtuvieron múltiples opciones de ubicación, incluyendo su costo de manejo de materiales. Las alternativas de respuesta pueden analizarse, con el propósito de seleccionar la apropiada distribución, de acuerdo con el contexto de la empresa (Maneiro & Yllada, 2005).

Luego, se aplicó el algoritmo tipo MOGA, siendo el propósito minimizar, tanto el tiempo de procesamiento como el tiempo de flujo total (Pasupathy et al, 2006).

Después, se diseñó un algoritmo genético, bajo el cual se plantean múltiples reglas, con el fin de balancear líneas de ensamble en “U”; utilizando en éste caso tiempos de tarea estocásticos (Baykasoğlu & Özbakır, 2006). Un año más tarde, se utilizó el concepto de algoritmos genéticos paralelos, con el objetivo de minimizar el tiempo de procesamiento, en el problema de programación de sistemas de producción tipo “Flow Shop” (Bozejko & Wodecki, 2007).

También en ésta misma época, se realizó una aplicación del algoritmo MOGA, bajo la cual se busca cumplir cinco objetivos: minimización del costo de mantenimiento, tiempo de procesamiento, tiempo total ponderado de elaboración de los trabajos, tardanza total ponderada y maximización de la disponibilidad de máquinas (Yulan et al, 2007). De forma simultánea, se desarrolló un algoritmo genético simple, el cual permite minimizar el

número de operarios requeridos, sin exceder el tiempo de ciclo máximo permitido (Ramírez et al, 2007).

Con posterioridad, se realizó una aplicación de los algoritmos MOGA y MOSA (recocido simulado multiobjetivo), para un problema de programación flowshop de dos máquinas. Se minimizaron tanto el tiempo de preparación, cuya secuencia es dependiente, como el tiempo de procesamiento. Se encontró que los resultados de ambos algoritmos en problemas pequeños son similares, pero en problemas grandes, MOGA genera soluciones de mejor comportamiento. (Mansouri et al, 2008)

Por último, se proponen dos heurísticas para el manejo del problema Flow Shop de ensamble, dado el caso que ciertos productos no sigan estrictamente la misma ruta de fabricación, lo cual podría deberse a sus condiciones particulares de diseño. Las funciones objetivo usadas para comparación con otros métodos, fueron el tiempo de procesamiento y el tiempo computacional (Bhongade & Khodke, 2011).

2.6.2.8 Aplicaciones a los problemas del tipo Job Shop.

Las aplicaciones se presentarán en las siguientes categorías: rediseño de operadores, propuestas de diseño de algoritmos, atención a las necesidades de los sistemas tipo “Job Shop” y atención a propósitos simultáneos.

- Rediseño de Operadores.

En ésta categoría clasifican cinco desarrollos.

En el primero, se diseñó un enfriamiento simulado y un algoritmo genético mejorado para el problema de programación. Particularmente el algoritmo genético mejorado, se orientó a implementar enfriamiento simulado en la fase de mutación, permitiendo intensificar y diversificar las soluciones, con el propósito de que no converjan rápidamente a un óptimo local (Meisel & Prado, 2010).

En el segundo desarrollo, se diseñó una nueva metodología de codificación de cromosomas, bajo la cual las operaciones de cruzamiento y de mutación fueron elaboradas en tres espacios dimensionales codificados (Wang et al, 2010).

En el tercer desarrollo, se diseñaron algoritmos de selección clonal para el problema de programación “Job Shop Flexible” y “Job Shop Ensamble” (Akhshabi & Khalatbari, 2011).

En el cuarto desarrollo, se diseñaron operadores de reparación, los cuales permiten mantener la búsqueda de soluciones globales (Fuji et al, 2011).

En el quinto desarrollo, se obtuvieron algoritmos híbridos orientados a diseñar nuevos operadores genéticos (Dao Er Ji & Wang, 2012).

De otra parte, se hace notar que el desarrollo de métodos de selección es diverso, debido a las motivaciones y experiencias de sus creadores. Por tanto, el impacto real de uno u otro método, tendrá que ser establecido a través de comparaciones confiables.

Finalmente, se comenta que una aproximación orientada a presentar de forma sistemática, las características de los métodos de selección, se encuentra en el documento preparado por los autores Silvaraj & Ravichandran (2011).

- Propuestas de diseño de algoritmos:

A ésta categoría pertenecen once desarrollos:

En el primero se obtiene un nuevo algoritmo denominado: algoritmo genético híbrido taguchi, el cual fusiona el algoritmo genético tradicional con el método taguchi. Este nuevo algoritmo mejora la capacidad de exploración del menor tiempo de procesamiento (Lui et al, 2005).

En el segundo, se diseñó un algoritmo genético simple, el cual permite resolver el problema de minimización de tiempo de procesamiento para un sistema job shop de las siguientes características: 10 pedidos con 10 máquinas o 20 pedidos con cinco máquinas (Lestan et al, 2009).

En cuanto al tercero, consiste en un nuevo algoritmo identificado con la expresión “cultural”, el cual es diferente al algoritmo canónico. Este algoritmo, extrae las características completas de la población y conforma un espacio pequeño, que se utiliza para guiar el operador genético de selección y de mutación, generando mejores soluciones tanto en calidad de resultado como en tiempo de cómputo (Wang & Li, 2010).

El cuarto desarrollo de la categoría, se orienta al diseño de un algoritmo genético guiado, cuyo método mejora el algoritmo genético usando multiplicadores; éstos multiplicadores pueden ajustarse durante el proceso de búsqueda (Ou et al, 2010).

El quinto desarrollo, propuesto por Rou & Hishammuddin (2010), se le denomina algoritmo genético coevolucionario cooperativo (CCGA); éste algoritmo permite obtener el menor tiempo de procesamiento posible.

El sexto desarrollo, corresponde a un algoritmo de búsqueda tabú híbrido con una eficiente estructura de vecindario, el cual tiene también como fin, encontrar el menor tiempo de procesamiento (Li et al, 2011)

El séptimo desarrollo fue elaborado por Surekha & Sumathi (2011). Bajo éste desarrollo se diseña para la programación de producción tipo “Job Shop”, un algoritmo híbrido entre optimización masiva y algoritmos genéticos, denominado optimización masiva genética difusa, por medio de la cual se busca minimizar el tiempo de procesamiento.

El octavo desarrollo, propone utilizar algoritmos evolutivos, de tal forma que se pueda cambiar la secuencia del orden de programación de los pedidos, generando el menor impacto en el desempeño del tiempo de procesamiento y en el cumplimiento del plan de entregas a los clientes (Thamilselvan & Balasubramanie, 2011).

El noveno desarrollo, busca minimizar el número de tareas retrasadas, para lo cual se diseña un algoritmo híbrido entre algoritmos genéticos y Gels (Pooranian et al, 2011).

El décimo desarrollo, hace referencia al diseño de algoritmos híbridos para la solución de problemas Job Shop, con fechas de entrega definidas por el cliente y lotes de transferencia diferentes a tamaño uno (Zhang & Wu, 2012).

Por último, el décimo primer desarrollo corresponde a métodos de programación Job Shop, basado en el tiempo de proceso (Bozejko, 2012).

De otro lado, es necesario mencionar que no se conoce el desempeño particular de los anteriores algoritmos, salvo por las afirmaciones de quiénes los proponen. Con base en lo expuesto, sería conveniente realizar las pruebas correspondientes, definiendo cuáles algoritmos deben utilizarse en ciertas situaciones y cuáles podrían complementarse en una metodología robusta.

Respecto a lo expresado en el párrafo previo, podría inferirse que los métodos de Surekha & Sumathi (2011), Thamilselvan & Balasubramanie (2011) y Pooranian et al (2011), hacen parte de un continuo. El primero minimiza los tiempos de procesamiento, el segundo permite cambiar la secuencia anterior generando el menor impacto sobre las fechas de entrega a los clientes y, el tercero minimiza el número de tareas retrasadas.

- Problemas generales de los sistemas “Job Shop”

En ésta categoría clasifican ocho desarrollos.

El primer desarrollo aplica a algunos sistemas Job Shop, en los cuales puede ocurrir la necesidad de distribuir los lotes entre varias máquinas que presentan intervalos de tiempos restrictivos en cuanto a la recepción de nuevos pedidos. Se diseña por tanto, un algoritmo paralelo híbrido que permite manejar esa problemática (Zhao et al, 2010).

El segundo desarrollo aplica cuando el sistema de producción presenta como característica, la existencia de tiempos de preparación con secuencia dependiente; en éste caso un algoritmo genético paralelo, minimizará dichos tiempos (Defersha & Chen, 2010).

El tercer desarrollo, permite reducir el tiempo de procesamiento y el tiempo muerto en un sistema de producción del tipo: Job Shop – Open Shop, por medio de la utilización de una metodología novedosa basada en algoritmos genéticos (Castrillón et al, 2011)

El cuarto desarrollo, tiene lugar cuando una o más máquinas deben realizar operaciones diferentes. En éste caso, se obtuvo un algoritmo que permite mejorar la utilización de los equipos (Medina et al, 2011).

En el quinto desarrollo se hace referencia a que, el mejoramiento de la tecnología y la variedad de los productos, pueden hacer ineficiente el plan inicial de distribución de la planta. Se propone por tanto, un modelo para dirigir el problema dinámico de planeación de la distribución en sistemas “Job Shop”. De acuerdo con lo anterior, se diseña un algoritmo genético capaz de resolver el problema de distribución, considerando las variables: costo de manejo de materiales, costo de movimiento de los materiales y costo de preparación de la instalación (Yang et al, 2011).

El sexto desarrollo, analiza los problemas de Programación tipo “Job Shop” y tipo “Flow Shop”, generando un algoritmo hereditario mejorado, en el cual se reemplaza la operación de mutación por pares por un proceso de mutación puntual de cierta probabilidad. De ésta forma, se garantiza la confiabilidad de las soluciones en un dominio de búsqueda local, lo cual conduce a identificar con mayor certeza, el tiempo de procesamiento mínimo (Anandaraman, 2011).

El séptimo desarrollo se encuentra representado en métodos de programación para máquinas que procesan lotes paralelos (Cheng et al, 2012)

El octavo desarrollo muestra el rediseño del operador de cruzamiento, con el propósito de evitar la convergencia prematura al aplicar algoritmos genéticos en la programación de operaciones de los sistemas Job Shop. El operador se complementa con la utilización de un método de regresión, el cual permite validar si la búsqueda está detectando un óptimo local o un óptimo global en el problema analizado (Bhatwadekar & Khire, 2013)

De acuerdo con lo observado, se puede afirmar que los métodos propuestos son complementarios y, dado que una planta de producción tipo “Job Shop”, presente las necesidades anteriores, se podrían utilizar las técnicas propuestas de forma simultánea.

- Problemas multiobjetivo en “Job Shop”. A la categoría pertenecen seis desarrollos.

Estos seis desarrollos pueden clasificarse en técnicas analíticas y técnicas heurísticas. Desde el enfoque analítico, existe un desarrollo reciente, el cual aborda la programación multiobjetivo de los sistemas “Job Shop Flexible” por medio de la aplicación de los siguientes modelos: sistemas de espera, métodos de decisión general, cadenas de Markov y simulación Monte Carlo (Nicoara, 2012).

La aplicación de métodos analíticos se complementa con la aplicación de métodos heurísticos. De acuerdo con lo anterior, puede afirmarse que los cinco desarrollos adicionales pertenecen al campo de la heurística. Específicamente, tres de estos desarrollos utilizan de manera básica algoritmos genéticos, el cuarto desarrollo se orienta a definir un método híbrido entre algoritmos genéticos con otra técnica heurística y, por último el quinto desarrollo y el sexto desarrollo, comparan el desempeño entre algoritmos genéticos con métodos híbridos entre técnicas analíticas y técnicas heurísticas.

Al evaluar las tres aplicaciones estructuradas para utilizar de manera básica algoritmos genéticos, se encuentra que el objetivo común de dos ellas, coincide en la caracterización de ciertas variables no tratadas hasta el momento en la literatura, mientras que la tercera busca mejorar las operaciones de cruzamiento y de mutación. Es así como, la primera aplicación minimiza el comportamiento de las variables: tiempo de proceso, costos por energía y accidentalidad laboral (Ruiz et al., 2011). En la segunda, se propone un algoritmo híbrido denominado algoritmo híbrido de ordenamiento (NSHA), cuya fundamentación se encuentra en el Método Simplex Nelder - Mead y en el algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II. Su pretensión se orienta a minimizar el tiempo de procesamiento y también a conseguir otras metas en los sistemas Job Shop. Los resultados del algoritmo híbrido, se comparan con problemas manejados desde NSGA – II, comprobándose la mejor calidad de las soluciones al igual que el menor tiempo de cómputo (Ghiasi et al, 2011). Finalmente, en la tercera aplicación se diseñó el algoritmo multiobjetivo (MOGA), basado en principios de entropía y de inmunidad. De tal forma, se resuelve el problema de programación multiobjetivo de los sistemas de producción Job Shop Flexible. En éste MOGA mejorado, se pretende mantener la diversidad de los

individuos y evitar el problema de convergencia prematura. Con este propósito, se utiliza la aplicación del Pareto optimizado y, se diseñan operadores de mutación y cruzamiento que permitan readaptar la estructura del cromosoma (Wang et al, 2010).

A nivel del cuarto desarrollo, se obtiene un método híbrido entre algoritmos genéticos con una búsqueda local, cuya aplicación permite incrementar el desempeño de las variables: tiempo de proceso, total de carga de trabajo y máxima carga de trabajo de un sistema del tipo “Job Shop Flexible” (Xiong et al., 2012).

En cuanto a los dos últimos desarrollos, se aprecia la caracterización de algunas variables que no han sido objeto de análisis en la literatura; dichas variables son tiempo de procesamiento, costos de mano de obra directa y fracción defectuosa debida a la fatiga del operario. Para este efecto, se compara en el quinto desarrollo un método híbrido entre los algoritmos Vega y Moga con un método híbrido entre algoritmos genéticos con una técnica predefinida de aleatorización (Coca et al., 2013). De manera similar en el sexto desarrollo, se compara también el mismo método híbrido entre los algoritmos Vega y Moga con un método híbrido entre algoritmos genéticos con una técnica analítica, la cual es conocida bajo el nombre de “suma de factores ponderados” (Coca et al., 2013). Respecto a los dos desarrollos en mención, se muestran en el anexo 1, las referencias bibliográficas particulares.

A su vez, también debe resaltarse que de acuerdo con la revisión elaborada, sólo se identifican dos desarrollos recientes en el campo de la heurística aplicables a la gestión de producción: Ozdagoglu et al, (2013) y Bhatwadekar y Khire (2013). Estos desarrollos fueron nombrados previamente en las categorías en las cuales clasifican: “N actividades una máquina” en el primer caso y “problemas generales en Job Shop” en el segundo caso. Con base en lo expuesto, se establece que el problema de minimización simultánea de las variables tiempo de procesamiento, costos de mano de obra directa y fracción defectuosa debida a la fatiga del operario, continúa de una parte sin ser analizado en la literatura especializada y, de la otra continúa siendo un problema de interés para la empresa objeto de estudio, es decir, existe una necesidad organizacional que debe satisfacerse.

3 METODOLOGÍA

El desarrollo de la metodología considera cuatro aspectos, al primer aspecto se le denomina: “método uno”, al segundo aspecto se le denomina “método dos”, al tercer aspecto se le denomina: “comparación de métodos” y al cuarto aspecto se le denomina: “otros elementos del método uno”. El “método uno”, se relaciona con el algoritmo estructurado a partir de los algoritmos Vega y Moga; el “métodos dos” hace referencia a un algoritmo híbrido entre algoritmos genéticos y sumas ponderadas; la “comparación de métodos”, establece las ventajas y desventajas existentes entre los métodos anteriores y, finalmente, “los otros aspectos del método uno”, se orientan a realizar tanto el tratamiento estadístico de este método como el análisis específico de una de las variables de interés.

De manera particular, la metodología se presenta en dos etapas. En la primera, se describen a nivel general las actividades que serán implementadas para cada uno de los cuatro aspectos, mientras que en la segunda se ilustran sus especificaciones.

De acuerdo con lo mencionado, se presentan a continuación las respectivas etapas:

3.1 Descripción general de los cuatro aspectos considerados en la metodología.

3.1.1 Metodología utilizada en el método uno (metodología basada en los algoritmos Vega y Moga): Descripción general.

Las actividades generales correspondientes al método uno son:

1. Definir el número de individuos que conformarán la población inicial Q y, asimismo una bandera de parada de ciclos, la cual controla que se realicen R iteraciones.
2. Generar una población aleatoria de Q individuos y verificar que no existan individuos repetidos.
3. Dividir la población en 3 subpoblaciones de $Q / 3$ individuos. A cada subpoblación se asignará una función objetivo en particular. En la subpoblación uno, se evaluará el tiempo de procesamiento; en la subpoblación dos, se evaluará la penalización por costo de mano

de obra directa y, en la subpoblación 3 se evaluará la penalización por fracción defectuosa.

4. Evaluar el tiempo de procesamiento de cada individuo en cada subpoblación.
5. Determinar respectivamente en las subpoblaciones 2 y 3, los valores correspondientes a la penalización por costos de mano de obra directa y a la penalización por fracción defectuosa.
6. Ordenar a nivel ascendente los individuos de cada subpoblación, de acuerdo con el valor tomado por la función objetivo asignada a dicha subpoblación.
7. Eliminar de cada subpoblación el 20 % de los individuos con mayor valor, de acuerdo con la función objetivo asignada a la subpoblación. En este momento cada subpoblación queda integrada por $0,26667$ individuos.
8. Extraer aleatoriamente $0,16667$ Q individuos de cada subpoblación.
9. Formar una subpoblación de $Q/2$ (cada subpoblación aporta $0,16667$ Q individuos).
10. Aplicar la operación de cruzamiento sobre los $Q / 2$ individuos seleccionados. Obtener $0,3$ Q Individuos a partir de la operación de cruzamiento. Ahora se tiene una población de $0,8$ Q individuos ($0,5$ Q individuos provenientes de las subpoblaciones más $0,3$ Q individuos originados en la operación de cruzamiento).
11. Tomar aleatoriamente $0,1$ Q individuos de los $0,8$ Q individuos creados y mutarlos generando una población de $0,9$ Q individuos.
12. Tomar $0,1$ Q individuos aleatoriamente del universo general de soluciones. De esta forma, se completa la primera nueva población, la cual está integrada por Q individuos.
13. Definir los frentes de Pareto correspondientes a los Q individuos de la primera nueva población.
14. Seleccionar $Q / 2$ individuos de los frentes estructurados.
15. Determinar la proporción de individuos por frente para los Q individuos que integran la primera nueva población. El valor de la proporción calculado se aplica a $Q / 3$ individuos. En este caso, la cantidad de individuos establecidos por frente, denota el número de individuos que se deben obtener al cruzar de manera aleatoria aquellos individuos que conforman cada uno de los mencionados frentes. Después de haber identificado los $Q / 3$ anteriores individuos, se contará con un total de $0,8$ Q individuos ($Q / 2$ individuos procedentes de los frentes y los últimos $0,3$ Q individuos obtenidos por cruzamiento).
16. Tomar aleatoriamente $0,1$ Q individuos de los $0,8$ Q individuos creados y mutarlos. Es así como se genera una población de $0,9$ Q individuos.

17. Generar $0,1 Q$ individuos aleatoriamente. Estos individuos se toman del universo general de soluciones. De esta forma, se completa la segunda nueva población, la cual está integrada por Q individuos.

Los pasos 3 a 17 se repiten durante R iteraciones.

18. Ordenar la población final de respuesta por frentes, de acuerdo con lo indicado en el paso 13 de este procedimiento general (conformación de frentes de Pareto).

19. Sistematizar la información: definir los frentes, establecer los intervalos del primer frente por cada función objetivo, analizar los individuos del primer frente a nivel de intervalos y realizar análisis de pertenencia por intervalo.

3.1.2 Metodología utilizada en el método dos (metodología basada en sumas ponderadas y algoritmos genéticos): Descripción general.

Las actividades generales correspondientes al método dos son:

1. Generar de manera aleatoria T individuos, verificando que sean diferentes.
2. Evaluar el factor de ponderación para cada uno de los T individuos, asumiendo en este caso igual importancia de las funciones objetivo.
3. Seleccionar los $0,8 T$ individuos con mayor valor de factor de ponderación.
4. Seleccionar $0,8 T / 2$ pares de individuos para cruzar.
5. Realizar la operación de cruzamiento de los individuos agrupados en el punto anterior como par. Se utiliza en este caso una probabilidad de cruzamiento de 95 %. La anterior operación de cruzamiento permite obtener $0,8 T$ individuos.
6. Realizar la operación de mutación para los $0,8 T$ individuos anteriores, utilizando con este propósito una probabilidad de mutación de 4 %. La anterior operación de mutación permite obtener $0,8 T$ individuos.
7. Evaluar el factor de ponderación para cada uno de los $0,8 T$ individuos, seleccionando aquel individuo que alcance el mayor valor en cuanto al comportamiento de este factor.
8. Guardar en Q posiciones los mayores valores detectados del factor de ponderación.
9. Generar otros $0,2 T$ individuos de manera completamente aleatoria. Se cuenta en este caso con T individuos, aquellos $0,8 T$ que provienen de las operaciones de cruzamiento y mutación al igual que otros $0,2 T$ completamente nuevos. Desde este paso se regresa al paso 2, repitiéndose el ciclo durante P iteraciones.

10. Ordenar y listar los Q individuos obtenidos de menor a mayor valor de factor de ponderación.
11. Ordenar y listar por frentes los Q individuos que integran la población final de respuesta.
12. Sistematizar la información: definir los frentes, establecer los intervalos del primer frente por cada función objetivo y analizar los individuos por intervalo.

3.1.3 Metodología utilizada para la comparación de métodos (Descripción general):

La comparación de los métodos uno y dos se realizará en términos generales, considerando los siguientes elementos:

1. Comparar parámetros (desviación estándar, coeficiente de variación, valores máximos y mínimos).
2. Comparar los individuos de mínimo valor provenientes de ambos métodos (individuos cuyos valores en cuanto al comportamiento de las funciones objetivo: tiempo de procesamiento, penalización por costo de mano de obra directa y penalización por fracción defectuosa, sean los menores al compararlos con los demás individuos que integran la población final de respuesta).
3. Comparar el individuo de mayor valor del factor de ponderación proveniente del método dos, respecto a los individuos de mínimo valor en cuanto al comportamiento de las tres funciones objetivo provenientes del método uno.
4. Comparar el número de frentes generados por cada método.
5. Comparar el número de individuos existentes por intervalo del primer frente para ambos métodos.

3.1.4 Metodología utilizada para los otros elementos del método uno (Descripción general):

Los elementos complementarios que deben revisarse del método uno son:

- Realizar análisis de varianza.

En este caso, se realiza análisis anova de un factor para las variables de interés.

- Analizar a nivel mono objetivo la variable tiempo de procesamiento (en horas)

Para la situación bajo estudio, se establece el menor tiempo de procesamiento, procediéndose a compararlo con el valor obtenido al aplicar otras técnicas de programación de operaciones.

3.2 Descripción detallada de los cuatro aspectos considerados en la metodología.

3.2.1 Metodología utilizada en el método uno (metodología basada en los algoritmos Vega y Moga): Descripción detallada.

3.2.1.1 Paso 1 Caracterización general del problema y generación de la población inicial.

Con el propósito de desarrollar el paso 1, se tratará en primera instancia la caracterización del problema, mientras que más adelante se analizará la generación de la población inicial.

3.2.1.1.1 Caracterización general del problema:

De acuerdo con las consideraciones anteriormente realizadas, se observa en el presente trabajo el análisis de un sistema de fabricación tipo “Job Shop”. La configuración general de los tiempos de fabricación propios de este tipo de sistema se ilustran en la tabla 2. Es así como, en la tabla nombrada los pedidos se presentan por filas mientras que los centros de trabajo se presentan por columnas. En la intersección entre fila y columna se registra el tiempo de operación de los pedidos en cada centro de trabajo (Koonce, 2000).

Tabla 2. Problema General JSSPNxM

	C_1	...	C_m
Pedido ₁			
...		Tiempo de operación _{ij}	
Pedido _n			

Con el fin de solucionar el problema ilustrado, se requiere definir la población inicial, la cual se encuentra integrada como se verá más adelante por Q alternativas de programación. De esta forma, cada alternativa dentro del conjunto de Q alternativas,

indicará aquel posible orden de asignación de los pedidos en un programa detallado de producción. Por ejemplo, una posible alternativa de programación de 4 pedidos, tomada del conjunto de Q alternativas, podría ser: programar con prioridad uno el pedido número 2, programar con prioridad dos el pedido número 4, programar con prioridad tres el pedido número 1 y por último, programar con prioridad cuatro el pedido número 3. Esta secuencia de programación: primero programar el pedido 2, segundo programar el pedido 4, tercero programar el pedido 1 y, por último programar el pedido 3, recibe el nombre de individuo.

3.2.1.1.2 Generación de la población inicial.

En términos generales puede afirmarse que si una Organización cuenta con “n” pedidos a ser programados, existe un total de $n!$ secuencias posibles de programación. Por ejemplo, si deben entregarse dos pedidos uno llamado “A” y otro llamado “B”, se identifican al respecto dos formas de programación: primero pedido “A”, segundo pedido “B” o al contrario primero pedido “B” segundo pedido “A”. Con base en lo anterior, se establece que dos pedidos implicarán dos formas de programar el sistema de producción; estas dos formas de programar se obtienen al aplicar la expresión: $2!$

De acuerdo con las condiciones de la organización objeto de estudio, existen 9 pedidos a ser programados (ver tabla 32), los cuales después de permutarse equivalen a $9!$ secuencias posibles de programación o individuos. Los tiempos de las operaciones por las cuales pasan cada uno de los pedidos están dados en horas (ver tabla 33). Debido a las razones expresadas, cada forma de ordenar el grupo de 9 pedidos o individuo, conducirá a una respuesta de programación presentada en número de horas.

Con relación a lo arriba mencionado, también se comenta que la compañía programa el sistema productivo en tres alternativas de tiempo por día: día de 8 horas (6 a.m a 2 p.m), día de 16 horas (6 a.m a 2 p.m y 2 p.m a 10 p.m) o día de 24 horas (6 a.m a 2 p.m, 2 p.m a 10 p.m y 10 p.m a 6 a.m) o en dos opciones de tiempo por semana: 6 días (se labora de lunes a sábado) o 7 días (se labora de lunes a domingo). De esta manera, se establece que la respuesta de programación presentada en número horas por un individuo, puede reexpresarse en varias alternativas de tiempo a la semana, es decir, cada individuo puede proyectarse en tres opciones de tiempo al día (8 horas, 16 horas o

24 horas) y asimismo, en dos opciones de tiempo a la semana: 6 días (se labora de lunes a sábado) o 7 días (se labora de lunes a domingo). En la siguiente figura se aprecian las diferentes alternativas de programación posibles de un individuo:

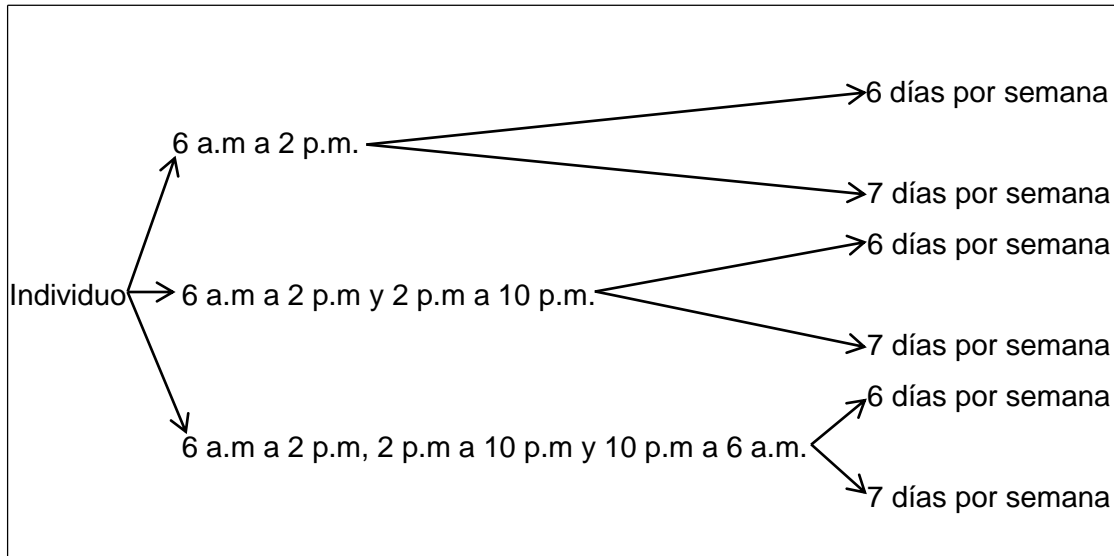


Figura 1. Alternativas de programación de un Individuo.

A partir de la figura 1, se determina que existen 6 alternativas de programación por individuo: 3 formas de programación por día (8 horas, 16 horas o 24 horas), teniendo cada una de ellas la posibilidad de ser proyectada de dos maneras diferentes por semana (6 días o 7 días). A cada una de estas 6 alternativas de programación, debido a su procedencia de un individuo, se le denomina subindividuo. Por tanto, un individuo puede representarse en 6 subindividuos.

Como se observará en el paso 2 de la metodología, en caso de programar en el sistema de producción los seis subindividuos que proceden de un mismo individuo, se obtendrán para cada uno de ellos diferentes valores de penalización por costo de mano de obra directa o por fracción defectuosa. La anterior situación se origina en el comportamiento particular de los valores tomados por el costo de mano de obra (ver tabla 37) o por la fracción defectuosa (ver tabla 40), dependiendo de la hora del día o del día de la semana, en los cuales sea asignado cada pedido.

De acuerdo con lo expresado y considerando a su vez que en el sistema de producción se deberá obtener la secuencia de fabricación de cada subindividuo, se menciona que su

estructura general con fines de programación es la siguiente: “individuo origen”, “posibles turnos de trabajo”, “horas al día” y “labora sin o con dominical”. De esta manera, se aprecia a enseguida, la respectiva estructura general de un subindividuo

Tabla 3. Estructura general de un subindividuo.

Número subindividuo	Individuo Origen	Posibles turnos de trabajo	Horas al día	Labora sin o con dominical
1	9-7-5-4-1-6-2-3-8	6 am a 2 pm	8	Sin laborar domingo
2	9-7-5-4-1-6-2-3-8	6 am a 2 pm - 2 pm a 10 pm	16	Sin laborar domingo
3	9-7-5-4-1-6-2-3-8	6 am a 2 pm - 2 pm a 10 pm - 10 pm a 6 am	24	Sin laborar domingo
4	9-7-5-4-1-6-2-3-8	6 am a 2 pm	8	Laborando domingo
5	9-7-5-4-1-6-2-3-8	6 am a 2 pm - 2 pm a 10 pm	16	Laborando domingo
6	9-7-5-4-1-6-2-3-8	6 am a 2 pm - 2 pm a 10 pm - 10 pm a 6 am	26	Laborando domingo

En la columna “Individuo origen” de la tabla 3, se muestra como ejemplo el individuo: “9-7-5-4-1-6-2-3-8”, el cual proviene de una de las 9! permutaciones ya nombradas. En éste individuo, se interpreta que el “pedido 9” presenta prioridad uno en el orden de programación y así se continúa hasta que al “pedido 8” le corresponde la prioridad número nueve. Para el individuo identificado, se establecen diferentes esquemas de organización por turnos. Estos esquemas se ilustran en las columnas: “Posibles turnos de trabajo” al igual que “horas al día”. Con base en la información de estas columnas, se determina que un individuo puede proyectarse en tres horizontes de tiempo: día de 8 horas (6 a.m a 2 p.m), día de 16 horas (6 a.m a 2 p.m y 2 p.m a 10 p.m) o día de 24 horas (6 a.m a 2 p.m, 2 p.m a 10 p.m y 10 p.m a 6 a.m). Asimismo, en la columna: “labora sin o con dominical”, se indica que el individuo también puede programarse en dos alternativas de tiempo a la semana: 6 días (sin domingo) o siete días (con domingo).

De acuerdo con lo ilustrado, se establece que existen un total de 9! x 6 subindividuos, los cuales se denotarán en adelante como individuos.

La estructura particular de un individuo al igual que su respectivo ejemplo, se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Estructura general de un subindividuo.

Número Campo	Campo 1	Campo 2	Campo 3	Campo 4	Campo 5	Campo 6
Ejemplo	Pedido 9	Pedido 7	Pedido 5	Pedido 4	Pedido 1	Pedido 6
Número Campo	Campo 7	Campo 8	Campo 9	Campo 10	Campo 11	
Ejemplo	Pedido 2	Pedido 3	Pedido 8	6 a.m a 2 p.m	Con domingo	

En esta estructura se observan 11 campos, de los cuales se utilizan nueve para almacenar cada uno de los pedidos. Por ejemplo, en la tabla en mención se establece que al “campo 1” se le relaciona el “pedido 9”, significando que este pedido sería el primero en programarse. Al incrementar el número del campo y avanzar hasta el “campo 9”, se identifica que a este campo le corresponde el “pedido 8”, determinándose para la situación que el pedido considerado debe programarse en novena posición. A su vez en el “campo 10”, se registran los “Turnos de trabajo”, es decir, el número de horas laboradas al día (para el ejemplo mostrado se laborarían 8 horas en el día, se inicia a las 6:00 am y se termina a las 2 pm). Finalmente, el “campo 11” hace referencia a trabajar o no el día domingo, se considera por tanto en dicha posición, el número de días laborados a la semana. Para el ejemplo diseñado, se laborarían 7 días a la semana, debido a que se encuentra registrada la expresión: “con domingo”.

Al contar por tanto con $9! \times 6$ individuos, se genera de forma aleatoria una población inicial integrada por Q individuos. Al respecto, es necesario anotar que en caso de existir individuos repetidos, estos individuos se reemplazan por otros individuos.

El diagrama de flujo correspondiente a la generación de la población inicial de Q individuos se muestra enseguida:

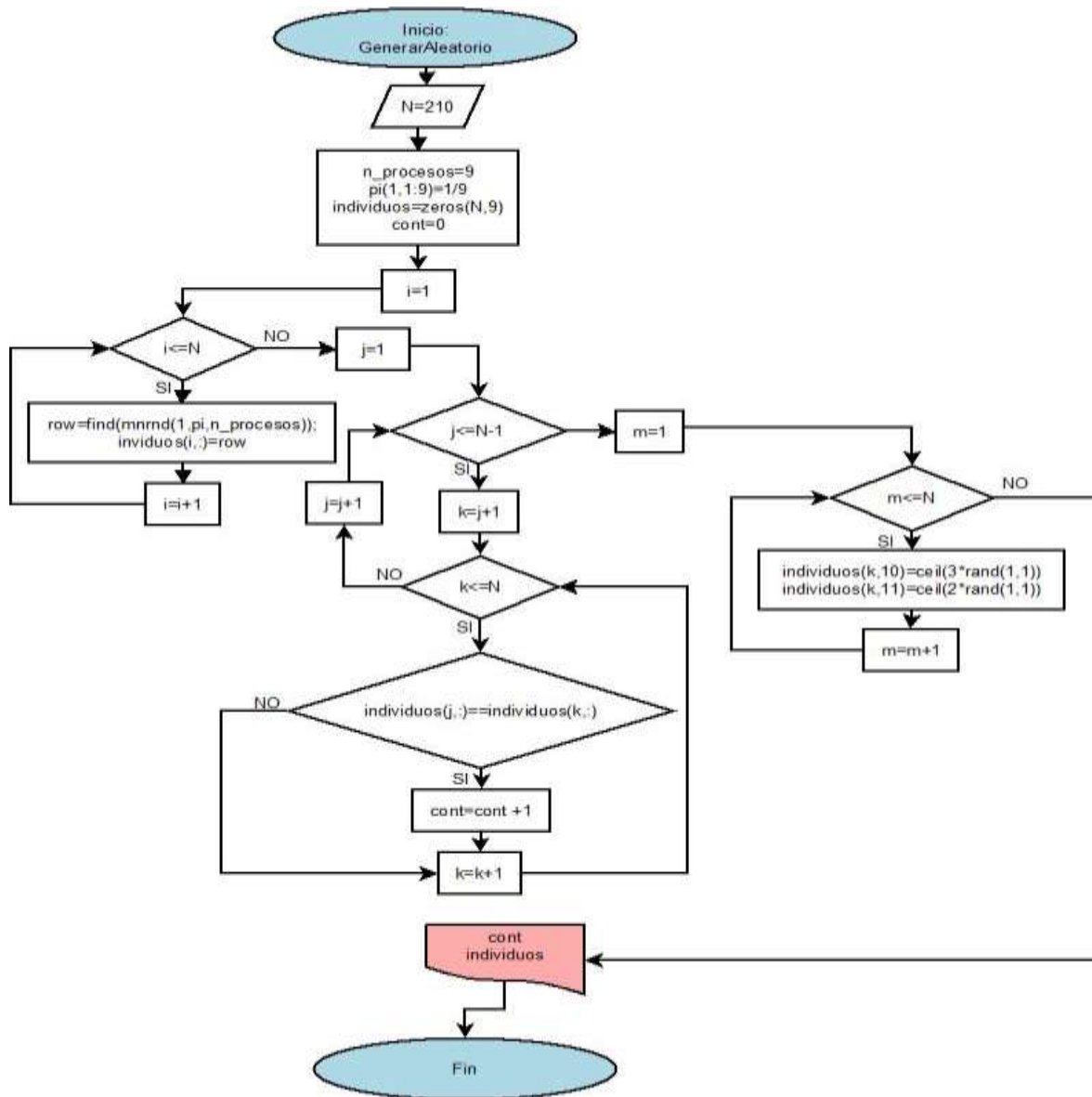


Figura 2. Diagrama de la función GenerarAleatorio().

A continuación se observa el diagrama de flujo correspondiente a la función que permite identificar la existencia de individuos repetidos en una matriz.

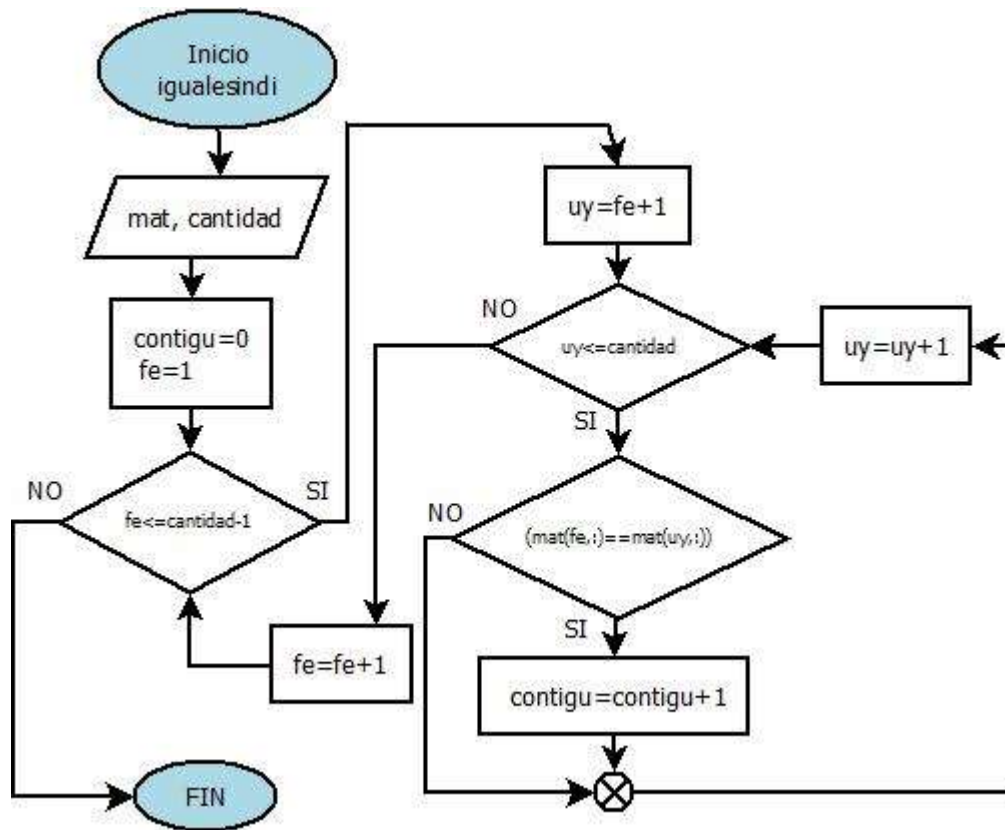


Figura 3. Diagrama de la función igualesindi().

En el anexo 2 (Manual técnico), se observan las caracterizaciones de la funciones “Generar aleatorio” e “igualesindi”

En el anexo 3 (Manual de usuario), se observa el manejo integral del programa por parte del usuario final.

3.2.1.2 Paso 2 Generación y evaluación de las subpoblaciones.

En este paso se generan 3 subpoblaciones, cada una de las cuales es evaluada específicamente en una de las 3 funciones objetivo. Enseguida se describen los procesos correspondientes a la generación y a la evaluación de las subpoblaciones:

3.2.1.2.1 Generación de las subpoblaciones:

Se divide la población inicial o la segunda nueva población en tres subpoblaciones, una para cada objetivo (minimizar tiempo de procesamiento, minimizar costo de mano de

obra, minimizar fracción defectuosa). Cada subpoblación estará conformada por $Q / 3$ individuos. Los individuos de cada subpoblación son evaluados y ordenados de menor valor a mayor valor, de acuerdo con la función objetivo correspondiente. Con posterioridad, se procede a eliminar de cada subpoblación el 20 % de los individuos que presenten los mayores valores.

En el anexo 2 (Manual técnico), se muestra la función que permite dividir la población inicial en tres subpoblaciones (Función Paso2()).

En la figura 16 (anexo 2), se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la función que permite dividir la población inicial en tres subpoblaciones.

En el anexo 3 (Manual de usuario), se observa el manejo integral del programa por parte del usuario final.

3.2.1.2.2 Evaluación de las subpoblaciones.

A continuación se presenta la evaluación de las subpoblaciones, utilizando con este propósito el siguiente orden: se ilustra en primera instancia la evaluación de la función objetivo tiempo de procesamiento; más adelante, se describe la evaluación de la función objetivo penalización por costo de mano de obra directa y, por último, se muestra la evaluación de la función objetivo penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario.

3.2.1.2.2.1 Evaluación de la subpoblación para la función objetivo tiempo de procesamiento.

Para los $Q / 3$ individuos de las tres subpoblaciones se requiere determinar en primera instancia el tiempo de procesamiento (en horas), la función de adaptación general para establecer el tiempo de procesamiento (makespan) se muestra en la ecuación 1:

$$Fitness_{MAKESPAN} = \min \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M P_{ij} \right\} \quad (1)$$

En la ecuación 1, “N” representa el número de pedidos, “M” representa el número de máquinas y “ P_{ij} ” corresponde al tiempo del pedido i en la máquina j .

Los datos para establecer el tiempo de procesamiento, como ya se había mencionado se encuentran registrados en la tablas 32 y 33 de la fase de experimentación.

El tiempo de procesamiento en un sistema Job Shop se determina, de acuerdo con los lineamientos expresados en Domínguez et al (1995).

Con el propósito de ilustrar el cálculo del tiempo de procesamiento, se utiliza el siguiente ejemplo. Dos pedidos deben ser programados en un sistema de manufactura, para cada operación se cuenta con una máquina, los tiempos de fabricación (en horas) con sus respectivas rutas de proceso se presentan a continuación:

Tabla 5. Datos para cálculo de tiempo de procesamiento (ejemplo).

Pedido	Primera Operación	Tiempo de fabricación	Segunda Operación	Tiempo de fabricación	Tercera operación	Tiempo de fabricación
1	B	3	C	4	A	6
2	C	5	A	5	B	2

Con base en la información suministrada en la tabla anterior, se expresa que los pedidos pueden programarse en dos posibles órdenes, así:

Orden uno: Primero pedido “1” y segundo pedido “2”.

Orden dos: Primero pedido “2” y segundo pedido “1”.

Enseguida se muestra la obtención del tiempo de procesamiento, considerando que se programa en primer orden el pedido numerado como “1” y en segundo orden el pedido numerado como “2”. En la tabla 6, se presentan listados por filas los mencionados pedidos, mientras que por columnas se observa la evolución del tiempo de procesamiento (en horas).

Tabla 6. Determinación de tiempo de procesamiento (ejemplo básico: Orden uno).

Hora \ Pedido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	B	B	B	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A							
2								C	C	C	C	C		A	A	A	A	A	B	B

En éste caso el tiempo de procesamiento es de 20 horas.

De manera similar puede obtenerse el tiempo de procesamiento al programar en primer lugar el pedido numerado como “2” y posteriormente el pedido numerado como “1”.

Tabla 7. Determinación de tiempo de procesamiento (ejemplo básico: Orden dos).

Hora \ Pedido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A	B	B								
1	B	B	B			C	C	C	C		A	A	A	A	A	A				

En éste caso el tiempo de procesamiento es de 16 horas.

En el anexo 2 (Manual técnico), se muestra la función correspondiente al cálculo del tiempo de procesamiento (Función cal_time_pro)

En la figura 17 (anexo 2), se muestra el diagrama de flujo correspondiente al cálculo del tiempo de procesamiento.

Una vez obtenido el tiempo de procesamiento de los 70 individuos, se ordenan a nivel ascendente y se procede a eliminar el 20 % de los individuos con mayor valor para esta variable.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo correspondiente al ordenamiento ascendente de las variables analizadas.

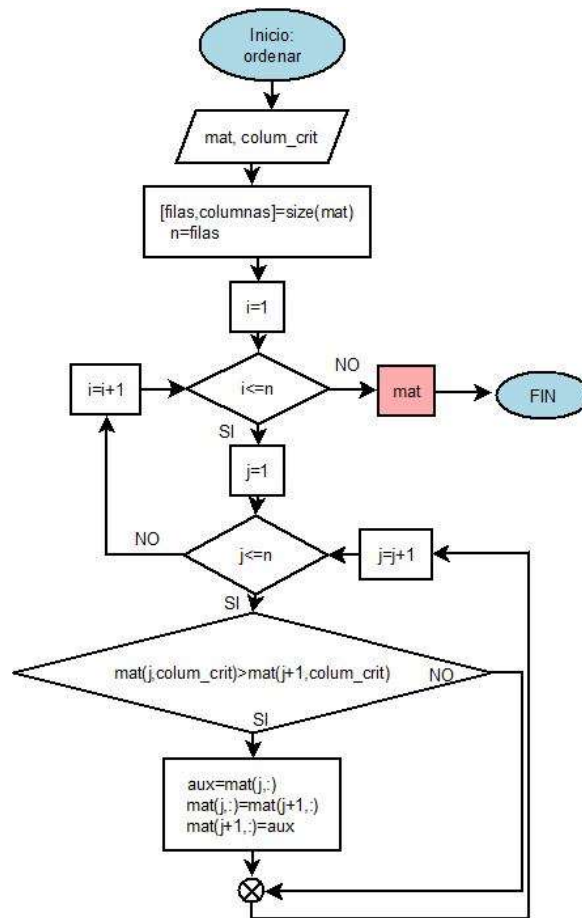


Figura 4. Diagrama de la función ordenar()

En el anexo 2 (Manual técnico), se muestra la caracterización correspondiente a la función ordenar()

En el anexo 3 (Manual de usuario), se observa el manejo integral del programa por parte del usuario final.

3.2.1.2.2.2 Evaluación de la subpoblación para la función objetivo fracción defectuosa generada por la fatiga del operario.

Para la subpoblación en la cual se establece la fracción defectuosa, se utiliza un método de penalización. El método se encuentra basado en la información histórica de la Compañía relacionada con la proporción de producción defectuosa por hora y que a su vez es causada por la fatiga del operario. La información relacionada con la proporción defectuosa por hora, se encuentra registrada en la tabla 40.

Con el objetivo de establecer el valor de penalización por fracción defectuosa, se requiere determinar en primer término el comportamiento de la variable tiempo de proceso (expresado en horas); con posterioridad, se identifica el esquema de organización del sistema de producción (jornadas laborales de 8 horas, de 16 horas o de 24 horas por día); después, a cada hora de la jornada laboral dentro del intervalo de tiempo de procesamiento, se le asigna la respectiva proporción por fracción defectuosa (ver tabla 40); más adelante, este valor se multiplica por 100 generándose el número de puntos que serán aplicados como valor de penalización; por último, los valores de penalización obtenidos por hora, pueden sumarse uno a uno hasta obtener el valor de la penalización total.

La descripción particular del procedimiento anterior se aprecia enseguida:

- Determinación del tiempo de procesamiento: Se obtiene de acuerdo con los ejemplos ilustrados en las tablas 6 y 7.
- Identificación del esquema de organización del sistema de producción (jornadas laborales de 8 horas, de 16 horas o de 24 horas por día).

Para éste efecto, se muestra con fines ilustrativos la siguiente situación (tabla 8), en la cual se listan una serie de pedidos por fila (primer orden en programación: pedido 7, segundo orden en programación: pedido 1 y, así continúa hasta que el último orden en programación corresponde al pedido 6), mientras que por columnas se muestra su evolución en el tiempo (inicio en hora número 1 y fin en hora número 24). En este caso se asume un tiempo de procesamiento de 24 horas. En la tabla 8, las intersecciones entre filas y columnas, son ocupadas por los nombres de las operaciones: "A", "B", "C", "D" y "E".

Tabla 8. Programación de 7 pedidos en 24 horas.

Nº Pedido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
7	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
1	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B						C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
3	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D											
8											B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
9															D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
2	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A													
6	E	E	E	E	E	E	E																		

Las 24 horas de la tabla anterior, pueden ser asignadas a cualquiera de las diferentes jornadas laborales de organización del sistema de producción por día de la compañía, así: 8 horas cada día, 16 horas cada día o 24 horas cada día. De esta manera, un número cualquiera de hora tomado de la tabla 8, corresponderá a determinada hora de determinado día, dependiendo del esquema de organización del sistema de producción que se haya seleccionado. Por ejemplo, en caso de asumir que las 6 a.m son el inicio en tiempo cero de la jornada laboral de cierto día, puede afirmarse al respecto que:

- Al organizar el sistema de producción en jornadas laborales de 8 horas al día (6 a.m a 2 p.m), a la hora 7 de la tabla le corresponde el horario: 12 m a 1 p.m del día uno.
- Al organizar el sistema de producción en jornadas laborales de 16 horas al día (6 a.m a 2 p.m y 2 p.m a 10 p.m), a la hora 12 de la tabla le corresponde el horario: 5 p.m a 6 p.m del turno: 2 p.m a 6 p.m, en el día 1. Asimismo, si el sistema de producción se organiza en jornadas de 8 horas al día, a la hora 12 de la tabla le corresponde el horario 9 a.m a 10 a.m del día 2.
- Al organizar el sistema de producción en jornadas laborales de 24 horas al día (6 a.m a 2 p.m, 2 p.m a 10 p.m y 10 p.m a 6 a.m), a la hora 20 de la tabla le corresponde el horario: 1 a.m a 2 a.m, en el día 2. Asimismo, si el sistema de producción se organiza en jornadas de 16 horas al día, a la hora 20 de la tabla le corresponde el horario 9 a.m a 10 a.m, en el día 2. Finalmente, si el sistema de producción se organizada en jornadas de 8 horas al día, a la hora 20 de la tabla le corresponde el horario 9 a.m a 10 a.m, en el día 3.

De acuerdo con lo anterior y considerando la información de la tabla 8, se observa en la tabla 9, la correspondencia de cada una de las 24 horas con cierta hora del día, cuando el sistema de fabricación se organiza en una de las tres posibles jornadas laborales: 8 horas por día.

Tabla 9. Correspondencia de 24 horas en jornadas laborales de 8 horas por día.

Hora	Día	Hora del día	Hora	Día	Hora del día	Hora	Día	Hora del día
1	1	6 a.m.- 7 a.m.	9	2	6 a.m.- 7 a.m.	17	3	6 a.m.- 7 a.m.
2	1	7 a.m.- 8 a.m.	10	2	7 a.m.- 8 a.m.	18	3	7 a.m.- 8 a.m.
3	1	8 a.m.- 9 a.m.	11	2	8 a.m.- 9 a.m.	19	3	8 a.m.- 9 a.m.
4	1	9 a.m.- 10 a.m.	12	2	9 a.m.- 10 a.m.	20	3	9 a.m.- 10 a.m.
5	1	10 a.m.- 11 a.m.	13	2	10 a.m.- 11 a.m.	21	3	10 a.m.- 11 a.m.
6	1	11 a.m.- 12 m.	14	2	11 a.m.- 12 m.	22	3	11 a.m.- 12 m.
7	1	12 m. – 1 p.m.	15	2	12 m. – 1 p.m.	23	3	12 m. – 1 p.m.
8	1	1 p.m.- 2 p.m.	16	2	1 p.m.- 2 p.m.	24	3	1 p.m.- 2 p.m.

Al comparar la tabla anterior con la tabla 8, se establece la asignación horaria de los diferentes pedidos durante los tres días. Tal es el caso del pedido 7, el cual estaría siendo procesado así: en la operación C de 6 a.m. a 2 p.m del día 1, en la operación C de 6 a.m a 1 p.m del día 2, en la operación A de 1 p.m a 2 p.m del día 2 y, en la operación A de 6 a.m a 2 p.m del día 3.

- Asignación de la respectiva proporción por fracción defectuosa a cada hora de la jornada laboral.

Después de identificar la programación horaria de cada pedido, se puede comparar con el contenido de la tabla 40. En esta tabla, se presenta la fracción defectuosa histórica por hora del día, debido a la fatiga del operario. Es así como, a los pedidos se les asignará la fracción defectuosa correspondiente a cada una de las horas en las cuales, dichos pedidos se encuentren siendo procesados.

Con base en lo expuesto y, al contrastar la programación del pedido 7 con el contenido de la tabla 40, se determinan para este pedido las siguientes fracciones de producción defectuosa por hora:

Tabla 10. Fracción defectuosa por hora para el pedido 7.

Día	Hora del día	Fracción (%)	Día	Hora del día	Fracción (%)	Día	Hora del día	Fracción (%)
1	6 a.m.- 7 a.m.	0	2	6 a.m.- 7 a.m.	0	3	6 a.m.- 7 a.m.	0
1	7 a.m.- 8 a.m.	0	2	7 a.m.- 8 a.m.	0	3	7 a.m.- 8 a.m.	0
1	8 a.m.- 9 a.m.	0	2	8 a.m.- 9 a.m.	0	3	8 a.m.- 9 a.m.	0
1	9 a.m.- 10 a.m.	0	2	9 a.m.- 10 a.m.	0	3	9 a.m.- 10 a.m.	0
1	10 a.m.- 11 a.m.	0,03	2	10 a.m.- 11 a.m.	0,03	3	10 a.m.- 11 a.m.	0,03
1	11 a.m.- 12 m.	0,03	2	11 a.m.- 12 m.	0,03	3	11 a.m.- 12 m.	0,03
1	12 m. – 1 p.m.	0,05	2	12 m. – 1 p.m.	0,05	3	12 m. – 1 p.m.	0,05
1	1 p.m.- 2 p.m.	0,05	2	1 p.m.- 2 p.m.	0,05	3	1 p.m.- 2 p.m.	0,05

- Conversión de la fracción defectuosa en puntos de penalización y obtención del valor total de penalización.

El anterior valor de la fracción defectuosa es multiplicado por 100 y posteriormente sumado. En éste caso, la sumatoria de la fracción defectuosa multiplicada por 100 para el pedido 7, durante los tres días registrados en la tabla 10, es de 48 puntos.

$$48 \text{ puntos} = 100 * (0,03+0,03+0,05+0,05+0,03+0,03+0,05+0,05+0,03+0,03+0,05+0,05)$$

De manera similar se procede con los otros pedidos. Finalmente, se suman los diferentes puntos de penalización, obteniéndose la penalización total por fracción defectuosa.

En la siguiente tabla se muestra la penalización para las primeras 8 horas de labores de la tabla 8, asumiendo que se encuentran organizadas en jornadas laborales de 8 horas cada

día. La penalización por hora de la tabla 11, se establece a partir de los datos ilustrados en la tabla 40.

Tabla 11. Penalización para los pedidos presentados en la tabla 8 en el primer día.

Horario	6 a 7	7 a 8	8 a 9	9 a 10	10 a 11	11 a 12	12 a 1	1 a 2
Fracción defectuosa horaria	0	0	0	0	0,03	0,03	0,05	0,05
Pedidos								
7	0	0	0	0	3	3	5	5
1	0	0	0	0	3	3	5	5
3	0	0	0	0	3	3	5	5
8	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	3	3	5	5
6	0	0	0	0	3	3	5	0
Total (puntos)	0	0	0	0	15	15	25	20

De manera análoga, puede obtenerse la penalización por fracción defectuosa, cuando se decide organizar el sistema de producción en jornadas laborales de 16 horas o de 24 horas cada día. Cabe mencionar que en estos casos, debe utilizarse de manera completa la información registrada en la tabla 40, es decir, sí el sistema de producción se programa en jornadas laborales de 16 horas cada día, debe aplicarse también el valor de la fracción defectuosa correspondiente al intervalo de tiempo 2 p.m a 10 p.m y, dado que tal sistema se estructure en jornadas laborales de 24 horas, debe asimismo, utilizarse el valor de la fracción defectuosa correspondiente al intervalo de tiempo de 10 p.m a 6 a.m.

En el anexo 2 (Manual técnico), se muestra la función correspondiente a la determinación de la penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario (Función `cal_pen_def ()`).

En la figura 18 (anexo 2), se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la determinación de la penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario.

En el anexo 3 (Manual de usuario), se observa el manejo integral del programa por parte del usuario final.

Una vez obtenido el valor de la penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario, se ordenan los datos a nivel ascendente y se procede a eliminar el 20 % de los individuos con mayor valor para esta variable.

3.2.1.2.2.3 Evaluación de la subpoblación para la función objetivo costo de mano de obra directa.

Para la subpoblación en la cual se establece el costo de mano de obra directa, también se utiliza un método de penalización. En éste caso los puntos de penalización se asignan de acuerdo con las siguientes categorías: programa de trabajo diurno, programa de trabajo nocturno (10 pm a 6 am), programa de trabajo diurno en día dominical y programa de trabajo nocturno en día dominical (10 pm a 6 am). A cada uno de estos programas, le corresponde una asignación de puntos de penalización, la cual se encuentra fundamentada en los valores de recargo porcentual sobre el valor del salario en tiempo normal (Ver tabla 37).

Con el objetivo de establecer el valor de penalización por costo de mano de obra directa, se requiere determinar en primer término el comportamiento de la variable tiempo de proceso (expresado en horas); posteriormente, se identifica el esquema de organización del sistema de producción (jornadas laborales de 8 horas, de 16 horas o de 24 horas por día); después para cada intervalo de 8 horas dentro del intervalo de tiempo de procesamiento, se racionaliza la cantidad de personas requeridas, garantizando que cada persona labore la mayor proporción posible de tiempo. Una vez definido el número de personas requeridas por cada intervalo de 8 horas, se multiplica éste valor por el valor de la penalización correspondiente al programa de trabajo (diurno o nocturno en día hábil o en dominical) en el cual clasifique dicho intervalo; finalmente, se obtiene la penalización total por costo mano de obra directa, al sumar la penalización asignada a los diferentes intervalos de 8 horas que integran la jornada laboral.

La descripción particular del procedimiento anterior se aprecia enseguida:

- Determinación del tiempo de procesamiento: Se obtiene de acuerdo con los ejemplos ya mostrados en las tablas 6 y 7.
- Identificación del esquema de organización del sistema de producción (jornadas laborales de 8 horas, de 16 horas o de 24 horas por día).

Con este fin, se recurre a la explicación ya elaborada para la tabla 8, en cuanto a la presunción de un tiempo de procesamiento de 24 horas y a la conformación de las jornadas laborales por día (8 horas, 16 horas o 24 horas).

- Determinación del número de personas requeridas por intervalo de tiempo de 8 horas:

La determinación del número de personas para este intervalo de tiempo, se realiza considerando los siguientes aspectos:

- La jornada de trabajo diaria de una persona es de 8 horas.
- Cada tipo de máquina está en capacidad de realizar sólo un tipo de operación.
- Para cada tipo de operación se cuenta exclusivamente con una máquina.
- Cada máquina durante su operación requiere el seguimiento y control permanente por parte de una persona. De esta manera, una persona no puede atender de manera simultánea varias máquinas.
- El procesamiento de un pedido en una operación no puede interrumpirse. La operación solo se detiene hasta finalizar el pedido que está siendo procesado.
- Un pedido puede quedar en espera para ser procesado una vez culmine una operación.
- Las personas de acuerdo con el programa de polivalencia de la compañía, están en capacidad de realizar las diversas operaciones requeridas. De esta manera, cuando la persona finaliza una operación en un pedido, puede enseguida continuar realizando otra operación sobre el mismo o sobre otro pedido.
- Los tiempos de operación por pedido se encuentran afectados por los factores de eficiencia y de utilización.
- Los tiempos de traslado de las personas al igual que los tiempos de transporte de materiales entre las máquinas no están considerados, como tampoco están considerados los tiempos de preparación requeridos por ciertos pedidos al iniciar una operación. En este sentido, la compañía debe realizar algunos ajustes posteriores a la propuesta general formulada en este proyecto.

Con base en los anteriores elementos, se establece que la cantidad de personas requeridas por intervalo de tiempo de 8 horas puede determinarse, contando el número de pedidos que se encuentran en proceso de manera simultánea en cada hora. En aquella hora en la cual se detecte la existencia de la mayor cantidad de pedidos siendo procesados, esta mayor cantidad indicará de forma equivalente, el número de personas necesarias para ejecutar las operaciones asignadas en un turno de trabajo.

Retomando la información de la tabla 8, puede expresarse que:

- En el primer intervalo de 8 horas (hora 1 a hora 8), se cuenta la existencia de cinco pedidos simultáneos. Los pedidos son: 7, 1, 3, 2, 6. De esta forma, se determina que se requieren cinco personas.
- En el segundo intervalo de 8 horas (hora 9 a hora 16), se aprecia lo siguiente:

Tabla 12. Segundo intervalo (horas 9 a 16).

Nº Pedido	9	10	11	12	13	14	15	16
7	C	C	C	C	C	C	C	A
1	B	B						C
3	D	D	D	D	D	D		
8			B	B	B	B	B	B
9							D	D
2	A	A	A	A				

En la tabla 12, al acumular los pedidos procesados de manera simultánea en cada hora, se encuentra que la mayor cantidad corresponde a cuatro pedidos (7,1,3,2 ó 7,3,8,2 ó 7,1,8,9). De esta forma, se establece como requerimiento para el turno un total de 4 personas. El anterior valor, puede verificarse agrupando los pedidos registrados en la tabla anterior así:

Tabla 13. Agrupación para 4 personas (horas 9 a 16).

Número Persona	Hora Pedido	9	10	11	12	13	14	15	16
	1	7	C	C	C	C	C	C	C
2	1								C
	8	B	B						
3	3	D	D	D	D	D	D		
	9							D	D
4	2	A	A	A	A				
	7								A

Al respecto, se menciona que en el primer intervalo de tiempo no se realizó la anterior verificación, debido a que es fácilmente comprobable sobre la misma tabla 8 que efectivamente se requieren cinco personas.

- En el tercer intervalo de 8 horas (hora 17 a hora 24), se identifica la existencia de cuatro pedidos en procesamiento simultáneo. Los pedidos son: 7, 1, 8, 9. De esta forma, se determina que se requieren cuatro personas.

- Obtención de la penalización por intervalo de tiempo de 8 horas, por jornada laboral y por el total del tiempo de procesamiento.

Una vez definido el número de personas por intervalo de tiempo de 8 horas, se establece la penalización por jornada laboral; este valor de penalización se extrae de la tabla 37. Para el número de personas halladas en las situaciones anteriores (5 personas en el primer intervalo de tiempo, 4 personas en el segundo intervalo de tiempo y 4 personas en el tercer intervalo de tiempo), se mostrará a continuación la forma de obtener el valor de la penalización por costo de mano de obra directa en las diferentes alternativas de jornadas laborales por día:

Tabla 14. Penalización por costo de mano de obra directa en diferentes jornadas laborales.

Número intervalo de tiempo	Jornada laboral por día	Número Personas Requerida	Horario	Número día en tipo de horario	Valor penalización por persona en el tipo de horario para día hábil (puntos)	Valor penalización (número de personas x valor penalización por persona) (puntos)	Valor penalización en la jornada laboral por día (suma de las penalizaciones obtenidas en la misma jornada laboral día) (puntos)
1	6 – 2	5	6 – 2	1	0	5 x 0 = 0	
2	6 – 2	4	6 – 2	2	0	4 x 0 = 0	
3	6 – 2	4	6 – 2	3	0	4 x 0 = 0	0 + 0 + 0 = 0
1	6 -2 y 2- 10	5	6 – 2	1	0	0	
2	6 -2 y 2- 10	4	2 – 10	1	0	0	
3	6 -2 y 2- 10	4	6 – 2	2	0	0	0 + 0 + 0 = 0
1	6 – 2 , 2 – 10 y 10 – 6	5	6 – 2	1	0	0	
2	6 – 2 , 2 – 10 y 10 – 6	4	2 – 10	1	0	0	
3	6 – 2 , 2 – 10 y 10 – 6	4	10 – 6	1	35	140	0 + 0 + 140 = 140

Del contenido de la tabla 14 se puede establecer que si las 24 horas de tiempo de procesamiento se organizan en jornadas laborales de 8 horas por día o de 16 horas por día, el valor de la penalización por costo de mano de obra es de cero puntos y, a su vez, si dicho tiempo de procesamiento se organiza en jornadas laborales de 24 horas por día, el valor de la penalización es de 140 puntos.

De manera similar a lo expresado, se obtiene la penalización por cada jornada laboral que integre el tiempo de procesamiento (en horas), es decir, debido a que el tiempo de

procesamiento (en horas), puede convertirse en su equivalente de jornadas laborales diarias de 8 horas, de 16 horas o de 24 horas; para cada una de estas jornadas laborales puede obtenerse el respectivo valor de penalización. Posteriormente, los valores de penalización de cada jornada laboral se suman entre ellas, obteniéndose el valor correspondiente a la penalización total.

De igual forma, es conveniente comentar que el valor de la penalización para los días festivos (domingos) no se utilizó en los casos mostrados en la tabla 14. Por tanto, si debe laborarse el día domingo, cada séptimo día se aplicarán los respectivos valores de penalización por persona, con base en lo indicado en la tabla 37 (75 puntos de 6 a.m a 10 p.m y 110 puntos de 10 p.m a 6 a.m).

En el siguiente gráfico se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la función *cal_pen_cos()*, la cual permite determinar la penalización por costo de mano de obra.

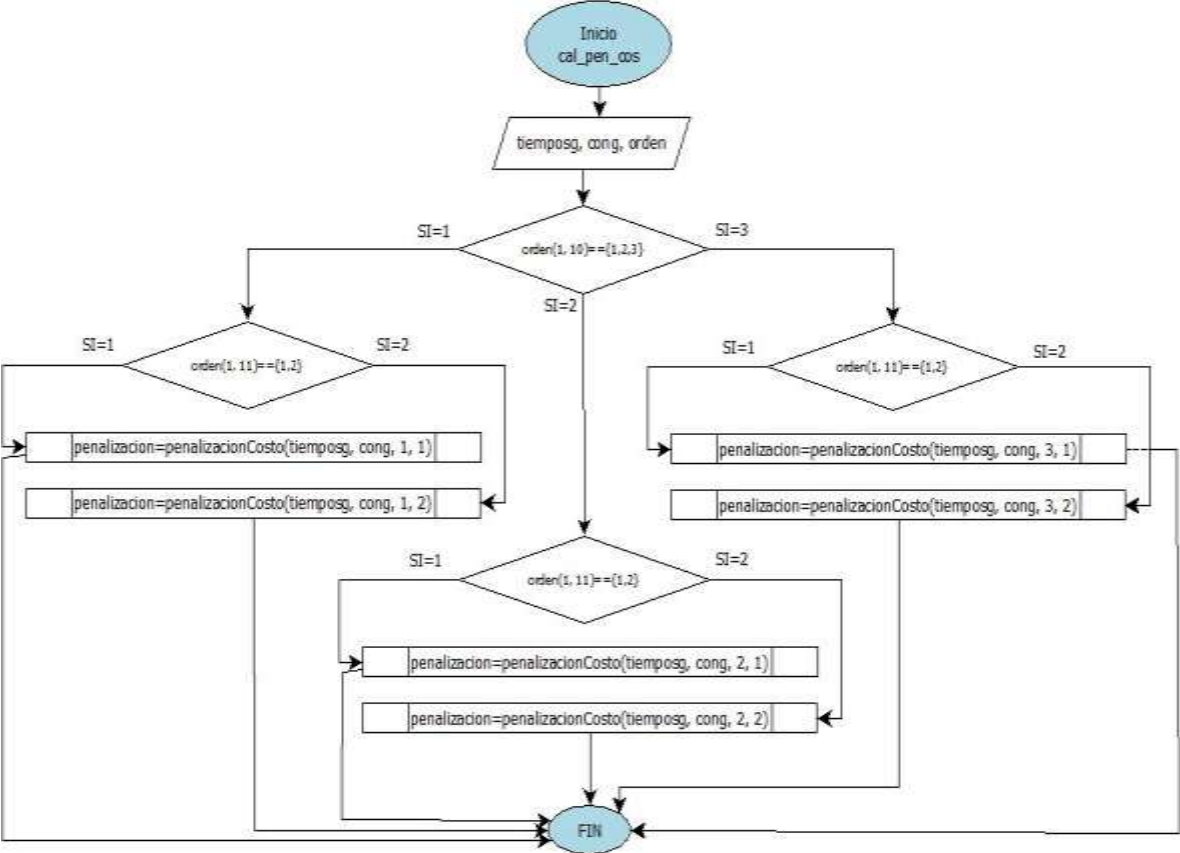


Figura 5. Diagrama de la función *cal_pen_cos()*

En el anexo 2 (Manual técnico), se muestra la función correspondiente a la determinación de la penalización por costo de mano de obra directa (Función *cal_pen_cos()*).

En el anexo 3 (Manual de usuario), se observa el manejo integral del programa por parte del usuario final.

Asimismo, la función que permite determinar la penalización por costo de mano de obra directa (función `cal_pen_cos()`), se apoya en aquella función utilizada para determinar el número de personas por cada intervalo de tiempo de ocho horas (función `num_per()`). A continuación se presenta el diagrama de flujo correspondiente a la función considerada:

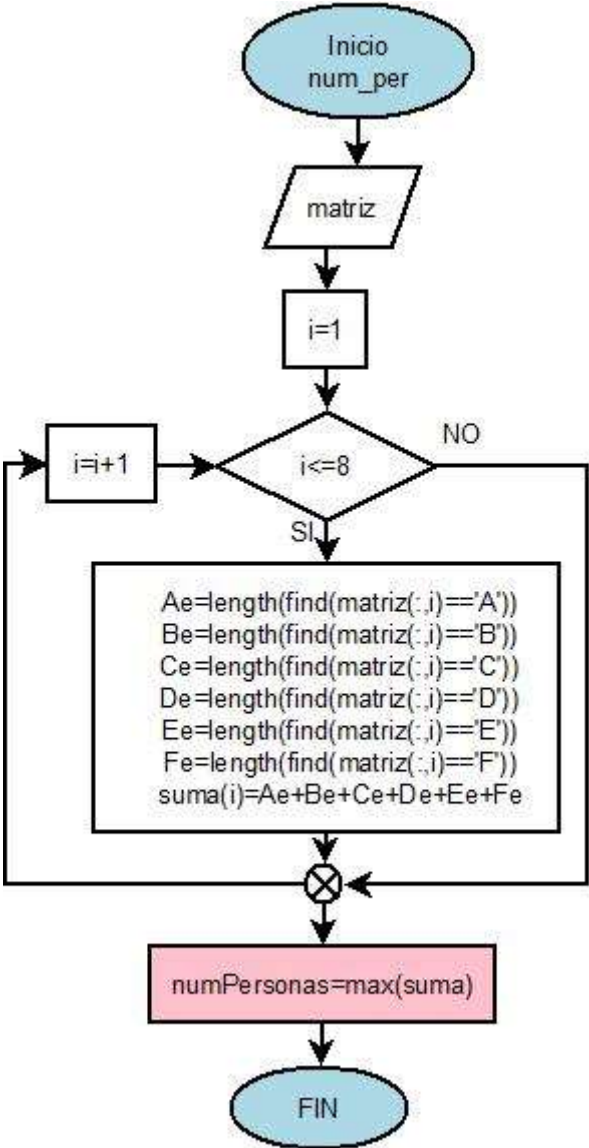


Figura 6. Diagrama para la función `num_per()`

En el anexo 2 (Manual técnico), se muestra la función correspondiente a la determinación de la penalización por costo de mano de obra directa (`num_per()`).

En el anexo 3 (Manual de usuario), se observa el manejo integral del programa por parte del usuario final.

Una vez obtenido el valor de la penalización por costo de mano de obra directa, se ordenan los datos a nivel ascendente y se procede a eliminar el 20 % de los individuos con mayor valor para esta variable. En este momento se cuenta con $0,26667 Q$ Individuos por subpoblación. Al respecto, se hace notar que este valor proviene de realizar la diferencia entre el tamaño de cada subpoblación y la cantidad de individuos eliminados en cada una de tales subpoblaciones ($Q / 3 - 0,2 * Q / 3 = 0,26667 Q$).

3.2.1.3 Paso 3 Conformar la primera nueva población.

Con el fin de integrar la primera nueva población se extraen inicialmente $Q / 6$ individuos de cada subpoblación, enseguida se realiza la operación de cruzamiento; más adelante, se realiza la operación de mutación y con posterioridad, se generan individuos de forma aleatoria. A continuación se describen las anteriores etapas:

3.2.1.3.1 Obtención de $Q / 6$ individuos por cada subpoblación:

Después de eliminar el 20 % de los individuos, se obtienen $0,26667 Q$ individuos por cada subpoblación. Estos $0,26667 Q$ individuos constituyen la base para conformar la primera nueva población.

Cada grupo de $0,26667 Q$ individuos ordenados del menor al mayor valor de cada una de las variables (tiempo de procesamiento, costo y fracción defectuosa), se divide en tres segmentos. Los 2 primeros segmentos están integrados por $0,09 Q$ individuos, mientras que el tercer segmento está conformado por $0,0857 Q$ individuos. De esta manera, de cada segmento de $0,09 Q$ individuos se extraen aleatoriamente $0,057 Q$ individuos, mientras que del segmento de $0,0857 Q$ individuos, se extraen aleatoriamente $0,052 Q$ individuos.

Con base en lo anterior, se establece que el total de individuos seleccionados por grupo es de $Q / 6$ individuos ($0,057 Q$ individuos provenientes de los dos primeros segmentos y $0,052 Q$ individuos provenientes del tercer segmento) y que a su vez, el total de individuos seleccionados de los tres grupos es de $Q / 2$ individuos ($Q / 6$ individuos por grupo). Estos $Q / 2$ individuos constituyen el 50 % de la primera nueva población.

3.2.1.3.2 Operación de cruzamiento en la primera nueva población:

Los anteriores $Q / 2$ individuos se someten a la respectiva operación de cruzamiento, con el propósito de obtener una cantidad adicional de $0,3 Q$ individuos. De esta manera, dicha operación se realiza durante $0,3 Q / 2$ oportunidades, permitiendo identificar los $0,3 Q$ individuos requeridos.

La metodología utilizada para efectuar la operación de cruzamiento, se describe a continuación: se seleccionan aleatoriamente 2 individuos padre de los $Q / 2$ individuos creados hasta el momento, se genera un número aleatorio de 1 a 9, el valor seleccionado se toma como valor para contar posiciones en los dos individuos. De esta manera, en el caso del primer individuo se cuenta dicho valor desde el extremo derecho de la posición nueve hacia la izquierda, mientras que en el caso del segundo individuo se cuenta desde el extremo izquierdo de la posición 1 hacia la derecha. El siguiente gráfico muestra la operación anterior, suponiendo que el número aleatorio seleccionado es cuatro:

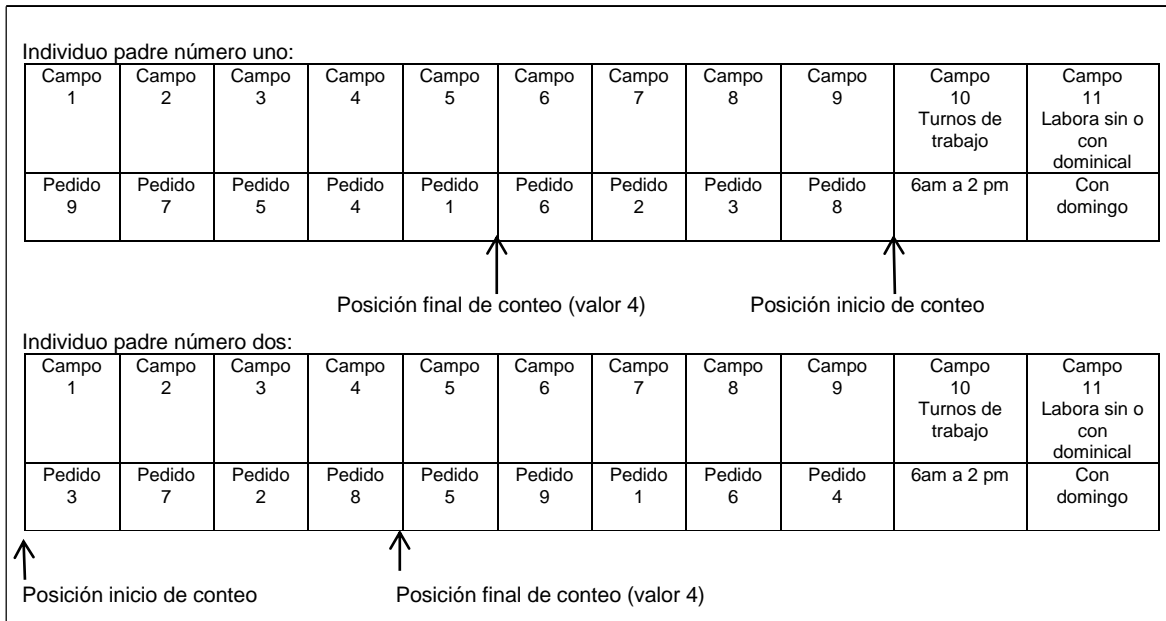


Figura 7. Conteo de posiciones para cruzamiento en individuos padre.

Después de haber señalado una posición en cada individuo, la segunda parte (derecha) del primer individuo pasará a la primera parte del segundo individuo (izquierda); asimismo, la primera parte (izquierda) del segundo individuo pasará a la segunda parte del primer individuo (derecha).

El siguiente gráfico muestra el intercambio de las posiciones anteriores:

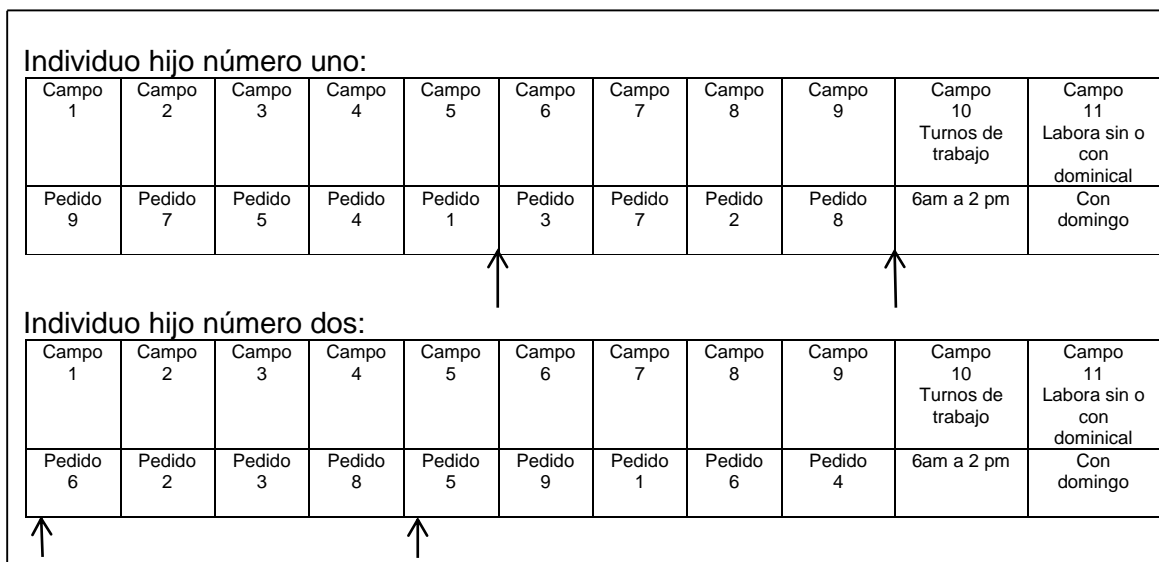


Figura 8. Individuos hijo después de operación de cruzamiento.

En la operación de cruzamiento también deberán intercambiarse obligatoriamente entre los individuos padre, los campos correspondientes al turno y al trabajo dominical (con o sin domingo), es decir, tanto el turno como la labor o no del día domingo correspondientes al primer individuo padre, se trasladan al segundo individuo padre y viceversa. Cuando se detecte que los campos de ambos individuos se encuentren estructurados con el mismo tipo de turno o dominical (con o sin domingo), deberá procederse así:

- En el primer caso, se genera por cada individuo hijo un número aleatorio entre 0 y 1, si el número aleatorio se encuentra de 0 a 1/3, se selecciona la jornada laboral de 6 a.m a 2 p.m, si se encuentra de 1/3 a 2/3 se seleccionan las jornadas laborales 6 a.m a 2 p.m y 2 p.m. a 10 p.m y, si el número aleatorio se encuentra de 2/3 a 1, se seleccionan las jornadas laborales 6 a.m a 2 p.m, 2 p.m a 10 p.m y 10 p.m a 6 a.m.

- En el segundo caso, también se genera por cada individuo un número aleatorio entre 0 y 1, si el número aleatorio se encuentra en el rango 0 a 0,5 se selecciona "sin laborar el día domingo", en caso contrario se selecciona la alternativa "laborar el día domingo".

Una vez se han obtenido los individuos hijo, deberá verificarse que no existan pedidos repetidos entre los campos. En caso de que esta situación llegue a suceder, se toma de manera aleatoria cualquiera de las posiciones en las que se encuentre el pedido repetido, reemplazándose el número de este pedido por el número del pedido que no está siendo considerado.

Después de realizar la operación de cruzamiento, se cuenta con 0,8 Q individuos (Q / 2 provenientes de las tres subpoblaciones iniciales y 0,3 Q obtenidos por cruzamiento). A continuación se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la función que permite realizar la operación de cruzamiento (Función apareamiento()).

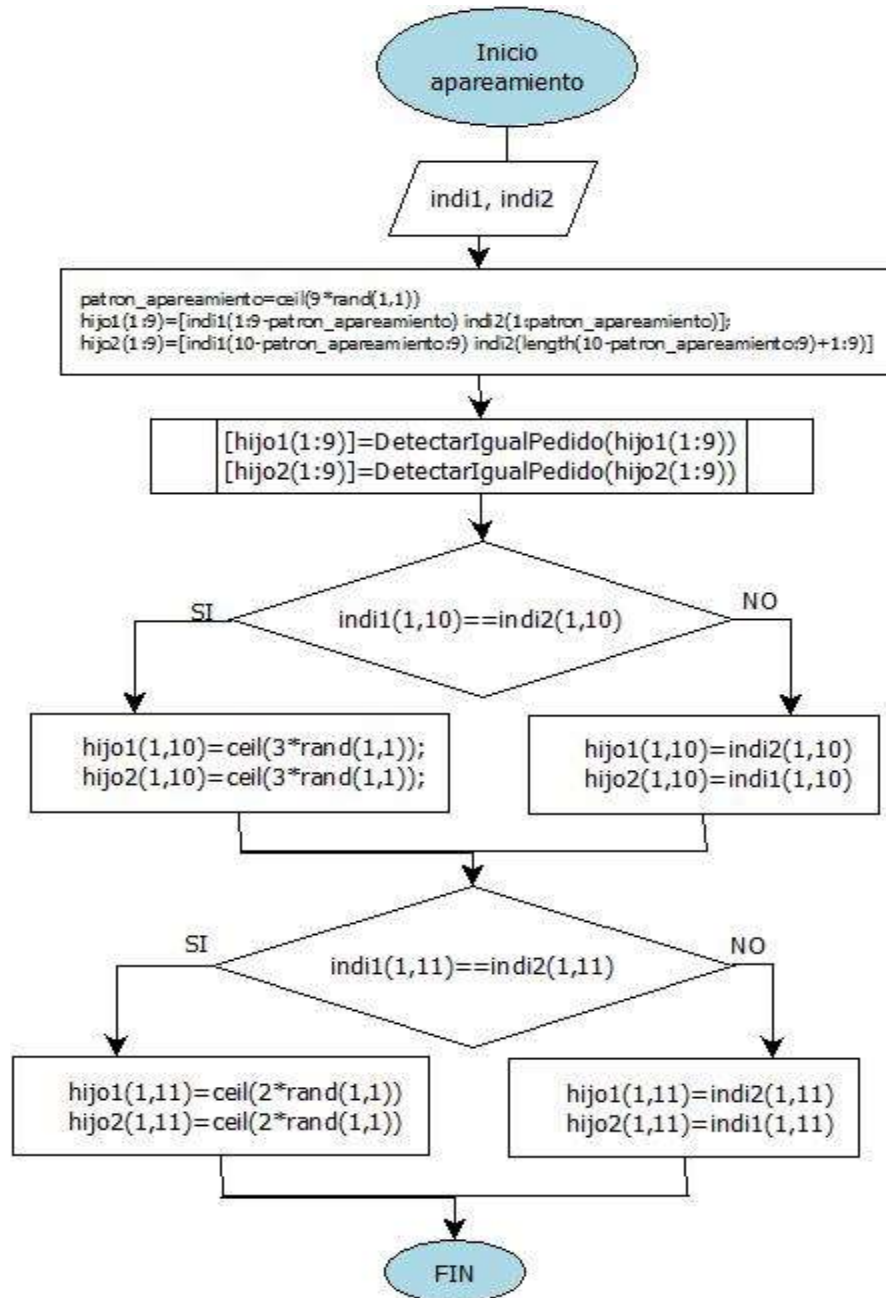


Figura 9. Diagrama de la función apareamiento()

En el anexo 2 (Manual Técnico), se muestra la función correspondiente al cruzamiento de los individuos padre. (Función apareamiento()).

En el anexo 3 (Manual de usuario), se observa el manejo integral del programa por parte del usuario final.

Asimismo, la función que permite realizar la operación de cruzamiento, se complementa entre otras funciones con aquella función que establece si existen pedidos iguales en los individuos hijo (*detectarigualpedido()*). A continuación, se presenta el diagrama de flujo correspondiente a la función considerada:

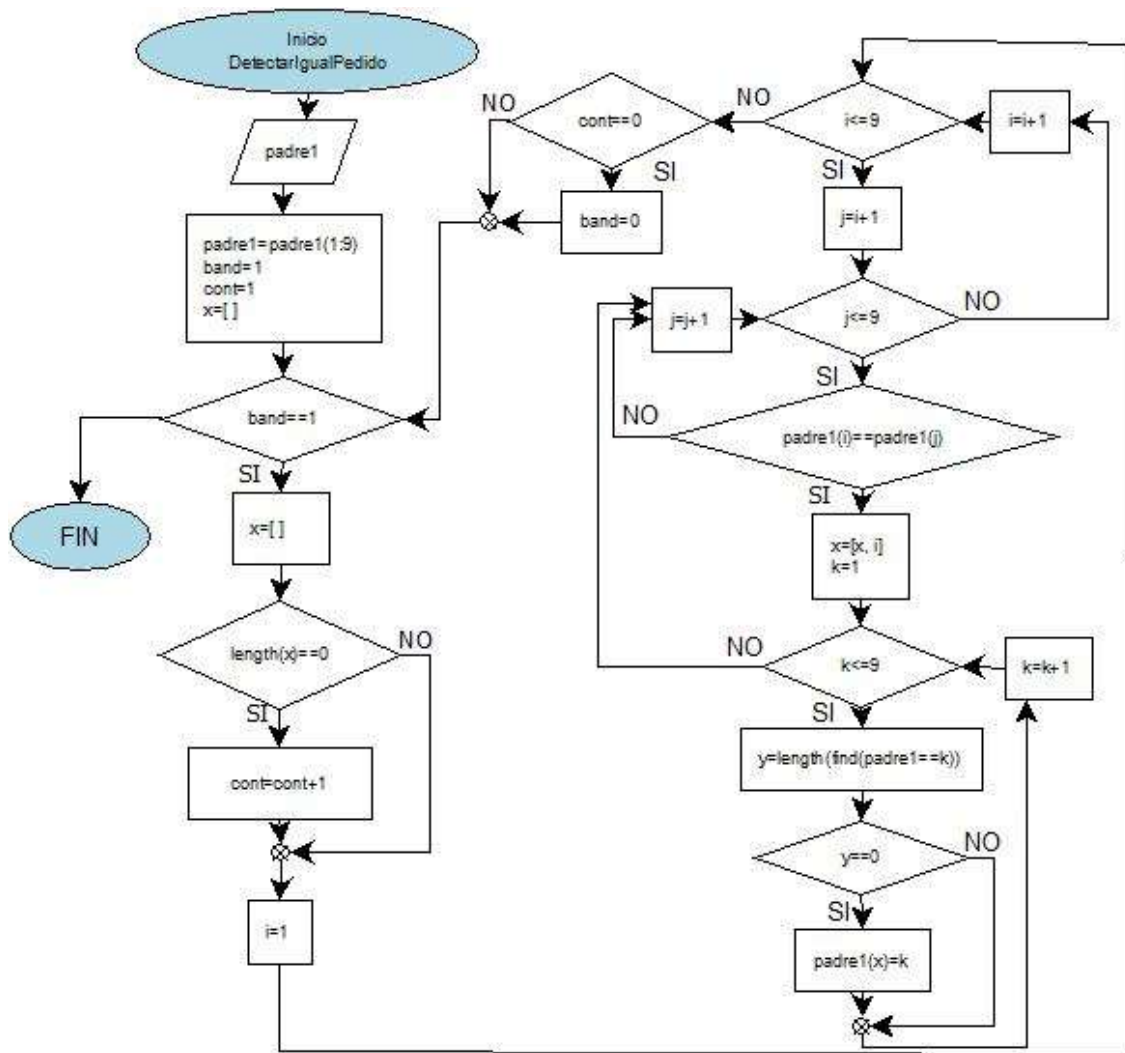


Figura 10. Diagrama de la función *detectarigualpedido()*.

En el anexo 2 (Manual Técnico), se muestra la función correspondiente a la detección de pedidos iguales. (Función *detectarigualpedido()*).

En el anexo 3 (Manual de usuario), se observa el manejo integral del programa por parte del usuario final.

3.2.1.3.3 Operación de mutación en la primera nueva población.

Una vez realizada la operación de cruzamiento se efectúa la operación de mutación. La operación de mutación se ejecuta tomando de manera aleatoria $0,1 Q$ individuos de los $0,8 Q$ individuos existentes. Con este fin, se utiliza la técnica conocida bajo la denominación de troca o swap, es decir, se señalan aleatoriamente dos posiciones del individuo; por tanto, entre las posiciones señaladas se procede a intercambiar los pedidos que cada una de ellas contiene. En el siguiente gráfico se aprecia el mecanismo utilizado para efectuar la operación de mutación:

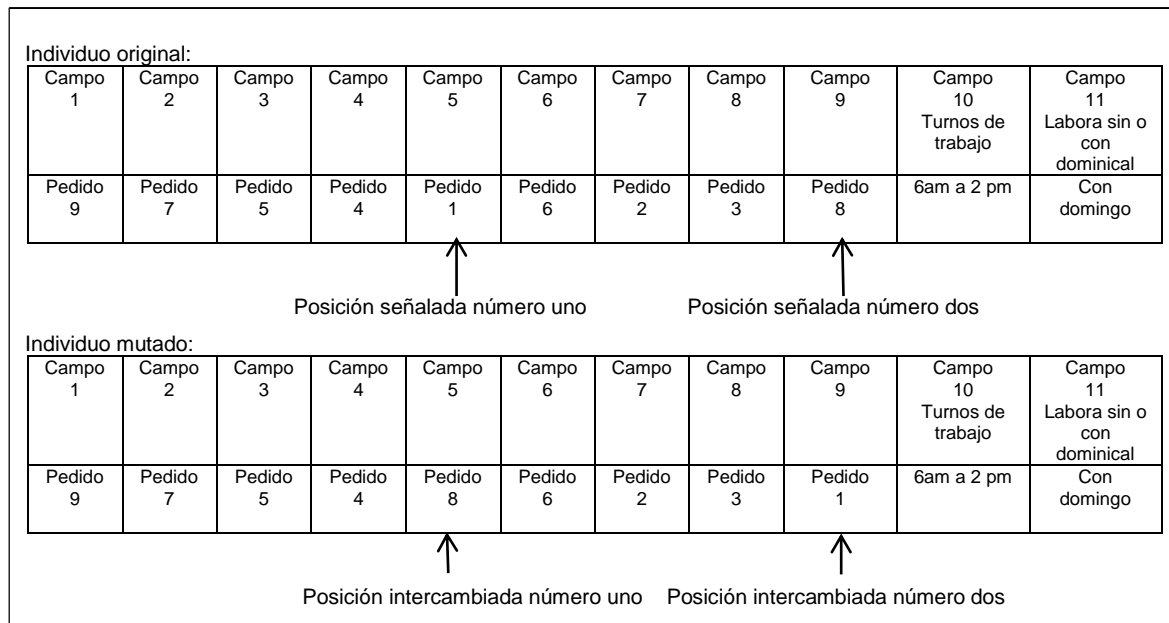


Figura 11. Operación de mutación.

Al realizar la operación de mutación pueden surgir dos aspectos que impiden utilizar la técnica de troca o swap. Estos aspectos se tratarán enseguida:

- El primer aspecto se encuentra relacionado con el hecho de seleccionar para intercambio una posición correspondiente a alguno de los pedidos (campos uno a nueve en la tabla 4) y simultáneamente, una posición que almacene el turno de trabajo o la decisión de laborar o no el día domingo (campos 10 y 11 en la tabla 4). En caso de que

ocurra la anterior situación, no se aplicaría la regla de troca o swap; en su lugar, se actuaría de las siguientes formas:

➤ Si el campo señalado corresponde al turno de trabajo, se realizaría la mutación exclusiva de este campo, de acuerdo con las siguientes reglas: se selecciona un número aleatorio de 0 a 1, si el número aleatorio se encuentra de 0 a 1/3, se selecciona la jornada laboral de 6 a.m a 2 p.m, si se encuentra de 1/3 a 2/3 se seleccionan las jornadas laborales 6 a.m a 2 p.m y 2 p.m. a 10 p.m y, si el número aleatorio se encuentra de 2/3 a 1, se seleccionan las jornadas laborales 6 a.m a 2 p.m, 2 p.m a 10 p.m y 10 p.m a 6 a.m.

➤ Si el campo señalado corresponde a la decisión de laborar o no el día domingo, se realizaría la mutación exclusiva de este campo, de acuerdo con las siguientes reglas: se selecciona un número aleatorio de 0 a 1, si el número aleatorio se encuentra en el rango 0 a 0,5 se selecciona “sin laborar el día domingo”, en caso contrario se selecciona la alternativa “laborar el día domingo”.

- El segundo aspecto se encuentra relacionado con el hecho de seleccionar para intercambio la posición correspondiente al turno de trabajo (campo 10 en la tabla 4) y simultáneamente, la posición que almacena la decisión de laborar o no el día domingo (campo 11 en la tabla 4). En caso de que ocurra la anterior situación, no se aplicaría la regla de troca o swap, en su lugar se realizaría la mutación particular de cada uno de los dos campos siguiendo las reglas ya mencionadas en el primer aspecto.

Después de realizar la operación de mutación se cuenta con $0,9 Q$ individuos ($Q / 2$ individuos provenientes de las 3 subpoblaciones iniciales, $0,3 Q$ individuos provenientes de la operación de cruzamiento y $0,1 Q$ individuos provenientes de la operación de mutación).

En el anexo 2 (Manual Técnico), se muestra la función correspondiente a la mutación de los individuos (Función mutar()).

En la figura 20 (anexo 2), se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la mutación de los individuos.

En el anexo 3 (Manual de usuario), se observa el manejo integral del programa por parte del usuario final.

3.2.1.3.4 Generación aleatoria de individuos en la primera nueva población:

Por último, los $0,9 Q$ individuos creados se complementan con la selección aleatoria de $0,1 Q$ individuos provenientes del universo total de soluciones; se obtiene

consecuentemente un total de Q individuos. De esta manera, queda integrada en su conjunto la primera nueva población.

3.2.1.4 Paso 4 Ordenar por frentes la primera nueva población.

Este paso de la metodología, se realiza por medio de la ejecución de las siguientes etapas:

3.2.1.4.1 Evaluación de las funciones objetivo en la primera nueva población.

En primera instancia se requiere determinar, de acuerdo con el paso 2 de la metodología, los valores correspondientes a las variables: tiempo de procesamiento, penalización por costo de mano de obra directa y penalización por fracción defectuosa, para cada uno de los individuos que integran la primera nueva población.

3.2.1.4.2 Establecer la dominancia por individuo.

En segunda instancia se requiere establecer la dominancia de cada individuo en la primera nueva población (Coello, 2002). De acuerdo con el enfoque del proyecto, se busca la minimización de tres variables; por tanto, puede afirmarse que un primer individuo domina a un segundo individuo, cuando de manera exclusiva los valores tomados por las tres variables en el primer individuo, sean estrictamente menores a los valores tomados por las tres variables en el segundo individuo.

Para ilustrar lo expuesto, se muestra enseguida, un listado de 6 individuos acompañados de los valores correspondientes a tres variables:

Tabla 15. Caso ejemplo para establecer dominancia entre individuos.

Variable Individuo	Valor variable uno	Valor variable dos	Valor variable 3
Individuo uno	1	2	0
Individuo dos	0	1	3
Individuo tres	2	3	1
Individuo cuatro	1	2	4
Individuo cinco	2	3	5
Individuo seis.	3	4	5

En la tabla 15, al comparar los valores tomados por el individuo número uno respecto a los valores tomados por los otros individuos en cada variable, se establecen las siguientes conclusiones:

Tabla 16. Comparación del individuo número uno respecto a los demás individuos.

Individuos comparados	Variable uno	Variable dos	Variable tres	Conclusión respecto a la dominancia entre individuos
Individuo uno respecto al dos	El individuo uno no domina al dos debido a que 1 es mayor a 0.	El individuo uno no domina al dos debido a que 2 es mayor a 1.	El individuo uno domina al dos debido a que 0 es mayor a 3.	Los individuos uno y dos son no dominados entre ellos, debido a que ninguno domina al otro de manera estricta en las tres variables.
Individuo uno respecto al tres	El individuo uno domina al tres debido a que 1 es menor a 2.	El individuo uno domina al tres debido a que 2 es menor a 3.	El individuo uno domina al tres debido a que 0 es menor a 1.	El individuo uno domina al tres, debido a que los valores tomados por las variables en el individuo uno, son estrictamente menores a los valores tomados por las variables en el individuo tres.
Individuo uno respecto al cuatro	El individuo uno no domina al individuo cuatro, debido a que los valores tomados por las variables en ambos individuos son iguales.	El individuo uno no domina al individuo cuatro, debido a que los valores tomados por las variables en ambos individuos son iguales.	El individuo uno domina al cuatro debido a que 0 es menor a cuatro.	Los individuos uno y cuatro son no dominados entre ellos, debido a que ninguno domina al otro de manera estricta en las tres variables.
Individuo uno respecto al cinco	El individuo uno domina al cinco debido a que 1 es menor a 2.	El individuo uno domina al cinco debido a que 2 es menor a 3.	El individuo uno domina al cinco debido a que 0 es menor a 5.	El individuo uno domina al cinco, debido a que los valores tomados por las variables en el individuo uno, son estrictamente menores a los valores tomados por las variables en el individuo cinco.
Individuo uno respecto al seis	El individuo uno domina al seis debido a que 1 es menor a 3.	El individuo uno domina al seis debido a que 2 es menor a 4.	El individuo uno domina al seis debido a que 0 es menor a 5.	El individuo uno domina al seis, debido a que los valores tomados por las variables en el individuo uno son estrictamente menores a los valores tomados por las variables en el individuo seis.

Al evaluar el contenido de la última columna de la tabla 16, se identifica que el individuo número uno es un individuo no dominado, ya que ningún otro individuo lo domina.

Complementariamente, se presentan a continuación de manera resumida, las relaciones de dominancia entre los diferentes individuos registrados en la tabla 15, excluyendo para el caso al individuo número uno.

Tabla 17. Relaciones de dominancia correspondientes a los individuos registrados en la tabla 15.

Individuos comparados	Variable uno	Variable dos	Variable tres	Conclusión respecto a las relaciones de dominancia entre los individuos 2 a 6
2 respecto a 3	2 domina a 3	2 domina a 3	3 domina a 2	son no dominados
2 respecto a 4	2 domina a 4	2 domina a 4	2 domina a 4	2 domina a 4
2 respecto a 5	2 domina a 5	2 domina a 5	2 domina a 5	2 domina a 5
2 respecto a 6	2 domina a 6	2 domina a 6	2 domina a 6	2 domina a 6
3 respecto a 4	3 domina a 4	3 domina a 4	3 domina a 4	3 domina a 4
3 respecto a 5	Igual valor	Igual valor	3 domina a 5	son no dominados
3 respecto a 6	3 domina a 6	3 domina a 6	3 domina a 6	3 domina a 6
4 respecto a 5	4 domina a 5	4 domina a 5	4 domina a 5	4 domina a 5
4 respecto a 6	4 domina a 6	4 domina a 6	4 domina a 6	4 domina a 6
5 respecto a 6	5 domina a 6	5 domina a 6	Igual valor	Son no dominados

De acuerdo con el contenido de las tablas 16 y 17, se muestra enseguida el resumen de dominancia por individuo:

Tabla 18. Resumen de dominancia para las tablas 16 y 17.

Número Individuo	Individuos dominantes	Número individuos dominantes	Número individuo	Individuos dominantes	Número individuos dominantes
1	Ninguno	0	4	2 y 3	2
2	Ninguno	0	5	1, 2 y 4	3
3	1	1	6	1, 2, 3 y 4	4

3.2.1.4.3 Determinar el frente de clasificación de cada individuo.

En tercera instancia se determina el frente al cual pertenece cada individuo.

Con el fin de establecer el número del frente en el cual clasifica cada individuo, debe aplicarse la siguiente expresión:

$$FI(j) = FI(j) + NIDI(j) \quad (2)$$

Donde: FI (j) = Frente correspondiente al individuo (j); NIDI (j): número de individuos que dominan al individuo (j).

De esta forma, la expresión para identificar el valor del frente en el cual clasifica el individuo número uno es:

$$FI(1) = 1 + NIDI(1)$$

También se identificó al analizar la información de la tabla 18 que el individuo número uno es un individuo no dominado, debido a lo cual:

$$NIDI(1) = 0.$$

De lo anterior se obtiene que:

$$FI(1) = 1 + 0$$

$$FI(1) = 1$$

De forma similar al método de asignación del frente en el cual es clasificado el individuo número uno, también pueden obtenerse los números de los frentes en los cuales deben

clasificarse los otros individuos. Para este efecto, se ilustra en la tabla 19 el valor de los frentes calculados:

Tabla 19. Valor del frente por individuo.

Número Individuo	Número individuos dominantes	Número frente	Número individuo	Número individuos dominantes	Número frente
1	0	1	4	2	3
2	0	1	5	3	4
3	1	2	6	4	5

En el anexo 2 (Manual Técnico), se aprecia la función correspondiente a la formación de frentes (Función orgFrentesMoga()).

En la figura 21 (anexo 2), se aprecia el diagrama de flujo correspondiente a la formación de frentes.

En el anexo 3 (Manual de usuario), se observa el manejo integral del programa por parte del usuario final.

3.2.1.5 Paso 5. Conformar la segunda nueva población.

La segunda nueva población se encuentra integrada por Q individuos. Con el propósito de obtener esta segunda nueva población, debe procederse de la siguiente forma:

3.2.1.5.1 Selección de individuos.

Se seleccionan $Q / 2$ individuos de los primeros frentes. Estos $Q / 2$ individuos se toman partiendo con prioridad del primer frente; con posterioridad, se continúa tomando aquellos individuos existentes en el segundo frente; de manera similar, se procede descendiendo por los diversos frentes, hasta que en uno de ellos se supere la cantidad requerida de $Q / 2$ individuos. Respecto a éste último frente, se seleccionan aleatoriamente la cantidad necesaria de individuos que permita completar los $Q / 2$ individuos requeridos para conformar la segunda nueva población.

Un ejemplo de la situación descrita en el párrafo previo, puede observarse en la siguiente tabla. En la tabla se registra una población total de 210 individuos (Q); por tanto, deben seleccionarse 105 individuos (Q/2).

Tabla 20. Distribución de individuos por frente: ejemplo de primera población.

Número Frente	Número Individuos en el frente	Número de individuos acumulados hasta el frente	Número Frente	Número Individuos en el frente	Número de Individuos acumulados hasta el frente
1	69	69	4	27	192
2	55	124	5	14	206
3	41	165	6	4	210

En la tabla 20 se aprecia que al requerirse 105 individuos, se tomarían 69 individuos del primer frente pero al llegar al segundo frente, se acumularían 124 individuos. Este hecho indica que del segundo frente solo deberán tomarse 36 individuos, valor que proviene de la diferencia entre 105 individuos ($Q / 2$) y 69 individuos del primer frente. De esta manera, los 36 individuos que provienen del segundo frente serán seleccionados de forma aleatoria.

3.2.1.5.2 Operación de cruzamiento en la segunda nueva población.

El propósito de la operación se orienta a obtener $0,3 Q$ individuos. En este caso para la primera nueva población se establece la proporción de individuos distribuidos por frente. Posteriormente, esta proporción se multiplica por $0,3 Q$ individuos. El resultado definido, señala el número de individuos que se deberán obtener por cruzamiento aleatorio de los individuos de cada frente. Con el fin de ilustrar lo anterior, se presenta el siguiente ejemplo:

Tamaño de la primera nueva población: 210 individuos.

Cantidad de individuos a obtener por cruzamiento: 63 individuos ($0,3 * 210$ individuos).

Cantidad de individuos en el primer frente: 69 individuos.

Proporción de individuos en el primer frente: $0,3285$ (69 individuos / 210 individuos)

Cantidad de individuos a obtener por cruzamiento en el primer frente = 21 individuos ($0,3285 * 63$).

De esta forma, para el tamaño de población nombrado de 210 individuos, se presenta enseguida: una distribución supuesta de los individuos en 6 frentes, la proporción estimada de individuos por frente y asimismo, la cantidad de individuos que se deberán obtener por cruzamiento aleatorio de aquellos individuos clasificados en cada frente.

Tabla 21. Distribución porcentual de individuos por frente: primera nueva población.

Número Frente	Número Individuos en el frente	Proporción individuos en la población de 210	Número individuos calculados en 63 individuos	Número Frente	Número Individuos en el frente	Proporción individuos en la población de 210	Número individuos calculados en 63 individuos
1	69	0,3285	21	4	27	0,1285	8
2	55	0,2619	17	5	14	0,0666	4
3	41	0,1952	12	6	4	0,01904	1

En la tabla 21 se aprecia que el número de individuos a obtener por cruzamiento aleatorio de los individuos existentes en cada frente son: 21 individuos provenientes de 69 individuos del primer frente, 17 individuos provenientes de 55 individuos del segundo frente, 12 individuos provenientes de 41 individuos del tercer frente, 8 individuos provenientes de 27 individuos del cuarto frente, 4 individuos provenientes de 14 individuos del quinto frente y un individuo proveniente de 4 individuos del sexto frente.

También debe anotarse que el método utilizado para realizar la operación de cruzamiento, corresponde al método descrito en el paso 3 de la metodología.

Finalmente, se comenta que después de efectuar la operación de cruzamiento, se habrán identificado 0,8 Q individuos de la segunda nueva población: Q / 2 individuos procedentes de los primeros frentes y, a su vez 0,3 Q individuos obtenidos por cruzamiento.

3.2.1.5.3 Operación de mutación en la segunda nueva población:

Para realizar la operación de mutación, se toma como base de análisis los 0,8 Q individuos creados hasta el momento. De esta forma, se seleccionan aleatoriamente 0,1 Q individuos del mencionado grupo de 0,8 Q individuos. Una vez definidos los 0,1 Q individuos, se aplica sobre ellos la operación de mutación, de acuerdo con las condiciones descritas en el paso 3 de la metodología.

Asimismo, debe aclararse que al efectuar la operación de mutación, se habrán identificado 0,9 Q individuos de la segunda nueva población: Q / 2 individuos procedentes de los primeros frentes, 0,3 Q individuos obtenidos por cruzamiento y 0,1 Q individuos obtenidos por mutación.

3.2.1.5.4 Generación aleatoria de individuos en la segunda nueva población:

Con éste propósito, se procede a realizar la selección de 0,1 Q individuos, los cuales se toman aleatoriamente del universo de soluciones (9! x 6 individuos). Una vez se ha

efectuado la generación aleatoria de los anteriores individuos, se completa la segunda nueva población. Esta segunda nueva población de tamaño Q, se encuentra integrada así: $Q / 2$ individuos procedentes de los primeros frentes, $0,3 Q$ individuos obtenidos por cruzamiento, $0,1 Q$ individuos obtenidos por mutación y $0,1 Q$ individuos obtenidos por selección aleatoria respecto al total de soluciones.

Después de conformar la segunda nueva población, se repite el ciclo desde el paso número dos hasta el paso número cinco de la metodología. Este ciclo tiene lugar durante R iteraciones.

3.2.1.6 Paso 6. Sistematización de la información.

La sistematización de la información incluye:

- Conformación de los frentes para la población final de respuesta. Estos frentes se estructuran de acuerdo con los lineamientos ilustrados en el paso 4 de la metodología.

- Presentación del listado de 210 individuos.

En este punto se procede a listar los 210 individuos correspondientes a la población final de respuesta, presentándolos desde el menor tiempo hasta el mayor tiempo de procesamiento (en semanas)

- Presentación de los frentes.

Con relación a este punto se muestra la cantidad de individuos existentes por cada frente.

- Presentación de la conformación de los intervalos correspondientes al primer frente

En este caso el equipo de dirección de la compañía procede a definir para cada variable (tiempo de procesamiento en semanas, penalización por costo de mano de obra y penalización por fracción defectuosa), de acuerdo con el contexto de la organización, aquellos intervalos en los cuales serán analizados el conjunto de individuos que conforman el primer frente.

- Sistematización por datos agrupados de los individuos en cada variable.

En este punto se muestra para cada variable, la distribución por intervalos de los individuos que conforman el primer frente. Con este propósito se utiliza la siguiente matriz:

Tabla 22. Matriz distribución de los individuos del frente uno por intervalos (tiempo o costos o fracción defectuosa).

Número Intervalo	Límite Inferior (semanas o puntos)	Límite Superior (semanas o puntos)	Números de los individuos	Frecuencia	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia absoluta (%)
1	a	h				
N	r	z				100
	Total			Sumatoria frecuencia	100	

- Determinación de la pertenencia por individuo en cada intervalo

Como se observa cada intervalo definido para agrupar los datos procedentes de cada función objetivo, está conformado por un conjunto de individuos, es decir, cada intervalo presenta un grupo de soluciones, entre las cuales debe seleccionarse alguna en particular; de esta manera, se procederá a su aplicación en el sistema de producción de la compañía objeto de estudio. Respecto a lo anterior, es necesario mencionar que ciertos individuos se encuentran ubicados cerca al valor promedio del intervalo, mientras que otros se encuentran ubicados cerca a sus valores máximo o mínimo. Es así como dentro del conjunto de individuos que integren un intervalo, se procede a elegir a aquel individuo más cercano a su valor promedio. La consideración realizada, se justifica en el hecho de que el nivel de pertenencia del individuo más cercano al valor promedio del intervalo, es mayor al compararla con el nivel de pertenencia logrado por los demás individuos localizados sobre el mismo intervalo.

Con el fin de establecer el valor de la pertenencia por individuo, se requiere determinar para los intervalos formados por cada función objetivo, en primer término la distancia de cada individuo al valor promedio del intervalo, en segundo término se identifica el valor del radio y finalmente, se obtiene el valor de la pertenencia como tal.

De acuerdo con lo expuesto, se describe enseguida cada una de las mencionadas etapas:

- Determinación de la distancia del individuo al promedio del intervalo.

La distancia del individuo (j) al promedio del intervalo se calcula a partir de las siguientes expresiones:

$$D(X_j)_i = (f_i(x_j) - f_i^{prom})^2 \quad (3)$$

Donde: $D(X_j)_i$ = Distancia cuadrado del individuo al promedio en la función objetivo; X_j = Individuo del intervalo; $f_i(x_j)$ = Valor de la función f_i para el individuo X_j ; f_i^{prom} = Valor promedio encontrado para la función objetivo de un intervalo.

Una vez calculado el valor de la distancia cuadrado del individuo (j) al valor promedio de la variable en el intervalo, se determina la distancia cuadrado del individuo (j) al valor promedio del intervalo.

$$D(X_j) = \sum_{i=1}^M D(X_j)_i \quad (4)$$

Donde: M = Número de funciones objetivo; $D(X_j)$ = Distancia cuadrado del individuo (j) al valor promedio del intervalo; $D(X_j)_i$ = Distancia cuadrado del individuo (j) al promedio en la función objetivo.

Posteriormente, se halla la distancia del individuo (j) al promedio del intervalo, aplicando la siguiente expresión:

$$D(X_j)_{prom} = (D(X_j))^{1/2} \quad (5)$$

Donde: $D(X_j)_{prom}$ = distancia del individuo (j) al promedio del intervalo; $D(X_j)$ = Distancia cuadrado del individuo (j) al valor promedio del intervalo.

Con el fin de ilustrar lo anterior, se presenta enseguida la cuantificación de los valores de la distancia de cada individuo de la tabla 23 respecto al valor promedio del intervalo:

Tabla 23. Distancia de cada individuo respecto al valor promedio del intervalo.

Número Individuo	Valor variable uno	$D(X_j)_1$	Valor variable dos	$D(X_j)_2$	Valor variable tres	$D(X_j)_3$	$D(X_j)$	Distancia al promedio del intervalo
1	1	0,25	2	0,25	0	9	9,5	3,08
2	0	2,25	1	2,25	3	0	4,5	2,12
3	2	0,25	3	0,25	1	4	4,5	2,12
4	1	0,25	2	0,25	4	1	1,5	1,22
5	2	0,25	3	0,25	5	4	4,5	2,12
6	3	2,25	4	2,25	5	4	8,5	2,92
Promedio	1,5		2,5		3			

De manera particular, la cuantificación de la distancia del individuo número uno (tabla 23), respecto al promedio de los valores tomados por los 6 individuos (tabla 23), se ilustra enseguida:

$$f_1^{prom} = (1 + 0 + 2 + 1 + 2 + 3) / 6 = 1,5$$

$$f_2^{prom} = (2 + 1 + 3 + 2 + 3 + 4) / 6 = 2,5$$

$$f_3^{prom} = (9 + 0 + 4 + 1 + 4 + 4) / 6 = 3,0$$

$$D(X_1)_1 = (1 - 1,5)^2 = (-0,5)^2 = 0,25$$

$$D(X_1)_2 = (2 - 2,5)^2 = (-0,5)^2 = 0,25$$

$$D(X_1)_3 = (0 - 3,0)^2 = (-3,0)^2 = 9,00$$

$$D(X_1) = D(X_1)_1 + D(X_1)_2 + D(X_1)_3$$

$$D(X_1) = 0,25 + 0,25 + 9,00 = 9,25$$

$$D(X_1)_{prom} = (D(X_1))^{1/2}$$

$$D(X_1)_{prom} = (9,25)^{1/2}$$

$$D(X_1)_{prom} = 3,08$$

De forma similar, se calculan las distancias de los otros individuos respecto al valor promedio del intervalo.

- Determinación del valor del radio.

El valor del radio corresponde a la mayor distancia de un individuo respecto al valor promedio, es decir, se trata de detectar cual es el individuo que presenta mayor lejanía respecto al valor promedio. Al analizar la información contenida en la tabla 23, se establece que el individuo que presenta mayor lejanía respecto al valor promedio es el individuo número uno. En este caso, la distancia corresponde a un valor de 3,08. Por tanto, el radio toma un valor de 3,08.

- Determinación de la pertenencia de un individuo a un intervalo.

Para establecer el nivel de pertenencia de un individuo al intervalo, se utiliza la siguiente expresión:

$$PI(j) = 1 - \left[\frac{D(X_j)_{prom}}{R} \right] \quad (6)$$

Donde: $PI(j)$ = Pertenencia del individuo J; $D(X_j)_{prom}$ = distancia del individuo (j) al promedio del intervalo; R = Radio.

Con el fin de observar la aplicación de la expresión anterior, enseguida se presenta la determinación de la pertenencia para los diferentes individuos registrados en la tabla 23.

Tabla 24. Pertenencia por individuo.

Número Individuo	1	2	3	4	5	6
Pertenencia (%)	0	31,16	31,16	60,38	31,16	5,19

Respecto a la tabla anterior, a continuación se observa el cálculo de la pertenencia correspondiente al individuo número 4:

$$PI(4) = 1 - (D(X_4)_{prom} / R)$$

$$D(X_4)_{prom} = 1,22 \text{ (tomado de la tabla 23)}$$

$$R = 3,08$$

$$PI(4) = 1 - (1,22 / 3,08)$$

$$PI(4) = 1 - 0,3961$$

$$PI(4) = 0,6038.$$

De acuerdo con lo anterior, puede afirmarse que la pertenencia del individuo 4 al intervalo es de 60,38 %.

Con relación a los datos presentados en la tabla 24, también puede expresarse que el individuo seleccionado es el individuo número 4, debido a que presenta la mayor pertenencia al intervalo.

- Resumen de los individuos con mayor pertenencia por intervalo

Para cada una de las funciones objetivo, deberá tramitarse la siguiente matriz. En esta matriz se detallan los diversos elementos de análisis correspondientes a los individuos con mayor pertenencia por intervalo así:

Tabla 25. Formato Pertenencia de los individuos por función objetivo.

Número Individuo	Valor Tiempo Individuo (semanas)	Número Intervalo	Valor pertenencia Individuo (%)	Valor Costo Individuo (puntos)	Número Intervalo	Valor pertenencia a Individuo (%)	Valor Fracción Individuo (puntos)	Número Intervalo	Valor pertenencia a Individuo (%)

Al diligenciar la anterior tabla, tomando en este caso como ejemplo base el individuo con mayor pertenencia al intervalo número cinco de la función objetivo tiempo de procesamiento, se podría tener la siguiente presentación:

Tabla 26. Pertenencia de los individuos por función objetivo (ejemplo base: tiempo de procesamiento)

Número Individuo	Valor Tiempo Individuo (semanas)	Número Intervalo	Valor pertenencia Individuo (%)	Valor Costo Individuo (puntos)	Número Intervalo	Valor pertenencia Individuo (%)	Valor Fracción Individuo (puntos)	Número Intervalo	Valor pertenencia Individuo (%)
54	4,1875	5	95	0	1	36,10	1404	2	92,78

A partir de la tabla 26 se puede afirmar que: el individuo número 54 tiene una pertenencia al intervalo número cinco de la variable tiempo de procesamiento (expresado en semanas) de 95 %; a su vez, en cuanto a la variable costo de mano de obra directa se ubica en el intervalo número uno con un valor de pertenencia de 36,10 % y, finalmente en cuanto a la variable fracción defectuosa, se ubica en el intervalo número 2 con un valor de pertenencia de 92,78 %.

En la tabla también se observa el valor tomado por el individuo número 54 en cada variable de interés, así: 4,188 semanas de tiempo de procesamiento, 0 puntos por costos de mano de obra directa y 1404 puntos por fracción defectuosa.

3.2.2 Metodología utilizada en el método dos (metodología basada en sumas ponderadas y algoritmos genéticos): Descripción detallada.

3.2.2.1 Paso 7. Generar de manera aleatoria T individuos y obtener el factor de ponderación por individuo.

En este paso se obtienen de manera aleatoria T individuos, de acuerdo con las condiciones de generación descritas en el método uno. Después de seleccionar T individuos, se procede a estimar para cada uno de ellos, el valor correspondiente a la variable denominada factor de ponderación. El factor anterior se establece en primer término, identificando el valor ponderado por individuo en cada función objetivo. Es así como, la expresión que permite establecer el valor de la ponderación del individuo en la función objetivo es:

$$P(X_j)_i = \left[\frac{FP(f_i)}{\sum_{k=1}^M FP(f_k)} \right] \left[\frac{f_i^{max} - f_i(x_j)}{f_i^{max} - f_i^{min}} \right] \quad (7)$$

Donde: f_i^{max} = Valor máximo encontrado para la función en una población; f_i^{min} = Valor mínimo encontrado para la función en una población; $f_i(x_j)$ = Valor de la función f_i para el individuo X_j ; FP = Factor de Ponderación; $FP(f_i)$ = Factor de Ponderación de f_i (este valor es definido por el agente decisor de acuerdo con el tipo de contexto analizado y varía de 0 a 100); $FP(f_k)$ = Factor de Ponderación total (la sumatoria de éste factor es 1); M = Número de Funciones Objetivo; $P(X_j)_i$ = Ponderación del Individuo en la Función Objetivo; X_j = Individuo de la población.

Para el caso de la empresa objeto de estudio, el equipo de dirección de la compañía, decidió asignar igual valor de factor de ponderación $FP(f_i)$ a cada una de las tres funciones objetivo (tiempo de procesamiento en semanas, costos de mano de obra directa y fracción defectuosa). De esta forma, $FP(f_i)$ para cada función objetivo es igual a 33,3333 %.

Con el fin de ilustrar la aplicación de la ecuación número 7, se muestra enseguida el método de cálculo, utilizando para este efecto los datos presentados para la variable uno en la tabla 23.

En este caso se estaría calculando $P(X_1)_1$, es decir, el valor ponderado del individuo número uno en la función objetivo número uno.

Específicamente los valores de cálculo son:

$FP(f_1) = 0,333333$. En este caso el factor de ponderación correspondiente a la función objetivo número uno es de 33,3333 %.

$M = 3$. Existen en total tres funciones objetivos.

$FP(f_k) = 1$. En este caso, el valor de k varía de 1 a M . A su vez, el factor de ponderación de cada función objetivo es de 33,3333 %, por tanto $FP(f_1) + FP(f_2) + FP(f_3) = 1$.

$f_i^{\max} = 3$. Corresponde al máximo valor tomado por una función objetivo en cierto individuo. Para el caso la función objetivo número uno, toma un valor de 3 en el individuo número 6.

$f_i^{\min} = 0$. Corresponde al mínimo valor tomado por una función objetivo en cierto individuo. Para el caso la función objetivo número uno, toma un valor de 0 en el individuo número 2.

$f_i(x_j) = 1$. Corresponde al valor tomado por el individuo número uno (x_1) en la función objetivo número uno (f_1).

De acuerdo con lo anterior:

$$P(X_1)_1 = (0,33333 / 1) * (3 - 1) / (3 - 0)$$

$P(X_1)_1 = 0,2222$. En este caso se indica que la ponderación del individuo número uno en la Función objetivo número uno es de 22,22 %.

De manera similar, se obtiene la ponderación del individuo número uno en las funciones objetivo número dos y número tres. Para el caso de estas dos funciones objetivo:

$$FP(f_2) = 0,333333$$

$$FP(f_3) = 0,333333$$

Es así como:

$$P(X_1)_2 = (0,33333 / 1) * (4 - 2) / (4 - 1) = 0,2222$$

$$P(X_1)_3 = (0,33333 / 1) * (5 - 0) / (5 - 0) = 0,33333$$

Una vez calculados los diferentes valores de $P(X_j)_i$, se obtiene:

$$P(X_j) = \sum_{i=1}^M P(X_j)_i \quad (8)$$

Donde: M = Número de Funciones Objetivo; $P(X_j)$ = Factor de ponderación lineal del individuo "j"; $P(X_j)_i$ = Ponderación del Individuo en la Función Objetivo; X_j = Individuo de la población.

Con el objetivo de ilustrar la aplicación de la ecuación número 8, se muestra enseguida el método de cálculo, utilizando para este efecto los datos correspondientes a la ponderación del individuo 1 tomado de la tabla 23:

$$P(X_1) = P(X_1)_1 + P(X_1)_2 + P(X_1)_3$$

$$P(X_1) = 0,2222 + 0,2222 + 0,3333$$

$$P(X_1) = 0,7777$$

En este caso el factor de ponderación del individuo uno tomado de la tabla 23 es 77,77 %. También, es importante anotar que el factor de ponderación de los otros cinco individuos registrados en la tabla 23 (individuos dos a seis), se obtiene utilizando el método ya descrito para calcular el factor de ponderación correspondiente al individuo número uno. Asimismo, se menciona que una vez determinados los 6 factores de ponderación, debe seleccionarse aquel individuo que presente mayor valor en el comportamiento de esta variable. Desde este paso hasta el paso 16 deben realizarse P iteraciones.

3.2.2.2 Paso 8. Seleccionar los 0,8 T individuos con mayor valor de factor de ponderación, cruzarlos y mutarlos.

Se comparan los T individuos, seleccionándose en este caso los 0,8 T individuos con mayor valor de factor de ponderación. Estos 0,8 T individuos se agrupan en pares de individuos. Los pares de individuos se conforman así: el primer par está constituido por los individuos con mayor y menor valor del factor de ponderación (primero y último), el segundo par está constituido por los individuos con los siguientes valores extremos (segundo y penúltimo), el tercer par está constituido por los individuos con los siguientes valores extremos y así se continuaría hasta integrar el último par. La operación de cruzamiento se realiza de acuerdo con las condiciones descritas en el paso 3 de la metodología, considerando en este caso que tal operación se efectúa con una probabilidad de 95 %, es decir, se genera un número aleatorio entre 0 y 1; si este valor es

menor a 0,95 se ejecuta la operación, de lo contrario se conservan sin alterar los individuos padre. Una vez realizada la operación se obtienen 0,8 T individuos.

En cuanto a la operación de mutación, se menciona que debe ejecutarse de acuerdo con las condiciones descritas en el paso 3 de la metodología. En este caso se toma cada uno de los 0,8 T individuos y se mutan con una probabilidad de 4 %, es decir, se genera un número aleatorio entre 0 y 1, si su valor está entre 0 a 0,04 se efectúa la operación de mutación, en caso contrario no se efectúa la operación considerada. Una vez realizada la operación de mutación se obtienen 0,8 T individuos.

3.2.2.3 Paso 9. Guardar en Q posiciones los mayores valores detectados del factor de ponderación después de realizar P iteraciones.

En este caso, se obtiene el factor de ponderación (ver paso 7 de la metodología) para los 0,8 T individuos identificados a partir de las operaciones de cruzamiento y de mutación. Con base en lo expuesto, aquel individuo que presente el mayor valor ponderado, se selecciona como mejor individuo de la iteración. Una vez definido el anterior individuo, se procede a incluirlo en un listado de Q individuos. Este listado contendrá aquellos individuos, cuyos valores ponderados correspondan a los mayores valores, después de ejecutar las P iteraciones.

A partir de la iteración número $Q + 1$, el valor ponderado correspondiente al individuo elegido, se compara con el menor valor ponderado de los Q individuos existentes en el listado. Dado el caso que el valor ponderado del primero supere el valor ponderado del segundo, se incorpora el primer individuo en dicho listado, procediéndose a eliminar simultáneamente el segundo de los individuos comparados.

Posteriormente, se extraen del universo general de soluciones 0,2 T individuos de manera aleatoria. Estos 0,2 T individuos se complementan con los 0,8 T individuos provenientes de las operaciones de cruzamiento y de mutación (paso 3 de la metodología). Es así como, se identifican de nuevo un total de T individuos.

Después de realizar este paso, se repite desde el paso 7 de la metodología en los aspectos relacionados con la determinación del factor de ponderación.

3.2.2.4 Paso 10. Ordenar los Q individuos de acuerdo con el valor del factor de ponderación por individuo y conformar los frentes.

Los Q individuos que conforman la población final de respuesta, se ordenan a nivel ascendente de menor a mayor valor del factor de ponderación por individuo. Asimismo, se

identifican los respectivos frentes y se sistematiza el frente uno, de acuerdo con lo establecido en el paso 6 de la metodología.

3.2.3 Paso 11. Comparación de métodos.

La comparación de los métodos incluye:

3.2.3.1 Comparación de parámetros.

En este caso se comparan los resultados obtenidos por ambos métodos, utilizando los siguientes parámetros como medio de evaluación: desviación estándar, coeficiente de variación, valor máximo y valor mínimo. La comparación de parámetros permite identificar, cuál de los métodos presenta mayor capacidad de generar diversidad de respuestas.

3.2.3.2 Comparación de individuos con menor valor.

En este caso se analizan los individuos que integran las poblaciones finales obtenidas al aplicar cada método. De acuerdo con el análisis anterior, se procede a seleccionar aquellos individuos cuyo valor sea el menor en cuanto al comportamiento de cada una de las variables analizadas. De esta manera, al realizar la selección pueden surgir las siguientes situaciones:

- En cuanto al método uno:

Dos o más individuos pueden presentar igual valor en cuanto al comportamiento de la variable de interés. En este caso los individuos que presentan igual valor pertenecen al mismo intervalo; por tanto, se selecciona aquel individuo que presente el mayor nivel de pertenencia al intervalo.

- En cuanto al método dos:

Dos o más individuos pueden presentar igual valor en cuanto al comportamiento de la variable de interés. En este caso se selecciona aquel individuo que presente la mayor cercanía al valor ponderado promedio del grupo. El valor correspondiente a la cercanía,

se obtiene restando en valor absoluto cada valor ponderado de cada individuo, respecto al ya mencionado valor ponderado promedio.

Para ilustrar lo descrito en el párrafo previo, se desarrolla el siguiente ejemplo, en el cual se asume que el grupo de cinco individuos presenta el mismo valor en cuanto al comportamiento de la variable objeto de análisis. Asimismo, se establece que el valor ponderado promedio de grupo es 69,209.

Tabla 27. Diferencia respecto al valor ponderado promedio de grupo.

Número Individuo	1	2	3	4	5
Valor ponderado por individuo (%)	78,25	77,34	67,35	63,39	59,71
Diferencia respecto al valor ponderado promedio de grupo en valor absoluto.	9,042	8,131	1,859	5,819	9,499

De manera particular, se muestra enseguida el método de cuantificación correspondiente a algunos de los anteriores resultados:

$$\text{Valor ponderado promedio de grupo} = (78,25+77,34+67,35+63,39+59,71) / 5 = 69,209$$

$$\begin{aligned} \text{Diferencia respecto al valor ponderado promedio de grupo (individuo 3)} &= | 67,35 - 69,209 | \\ &= 1,859 \end{aligned}$$

Con base en la información anterior, se establece que el individuo número tres presenta la mayor cercanía al valor ponderado promedio de grupo.

Una vez se han identificado los individuos de menor valor provenientes de cada método, se procede a registrar la información aplicable en la siguiente matriz:

Tabla 28. Matriz de presentación de métodos considerando los individuos de mínimo valor.

Método	Número individuo	Variable asociada al individuo Número	Tiempo de proceso (horas)	Tiempo de proceso (semanas)	Penalización costo de mano de obra (puntos)	Penalización fracción defectuosa (puntos)
Método uno		Mínimo tiempo				
		Mínimo costo				
		Mínima fracción				
Método dos		Mínimo tiempo				
		Mínimo costo				
		Mínima fracción				

La matriz en la cual se compara la información registrada en la tabla anterior, se presenta enseguida:

Tabla 29. Matriz de comparación porcentual de los individuos de mínimo valor.

Variable comparada	Individuos comparados del método uno y del método dos.	Tiempo Proceso (horas)	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costo mano de obra (puntos)	Penalización fracción defectuosa (puntos)
Mínimo Tiempo de proceso (semanas)	Individuo número a (método 1) e individuo número b (método 2)				
Mínimo costo mano de obra (puntos)	Individuo número c (método 1) e individuo número d (método 2)				
Mínima fracción defectuosa (puntos)	Individuo número e (método 1) e individuo número f (método 2)				

3.2.3.3 Comparación de los individuos de menor valor (método uno) con el individuo de mayor valor en cuanto al comportamiento del factor de ponderación (método dos).

En éste caso se seleccionan aquellos individuos con menor valor de tiempo de procesamiento (en horas y en semanas), en penalización por costos de mano de obra y en penalización por fracción defectuosa provenientes del método uno. De esta forma, se procederá a comparar los anteriores individuos con el individuo de mayor factor de ponderación proveniente del método dos.

Una vez se han identificado los individuos de interés, se procede a registrar la información aplicable en la siguiente matriz:

Tabla 30. Comparación respecto al individuo con mayor valor de factor de ponderación.

Variable comparada	Individuo tomado del método uno	Tiempo Proceso (horas)	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costo mano de obra (puntos)	Penalización fracción defectuosa (puntos)
Mínimo tiempo de proceso (semanas)	Número individuo x				
Mínimo costo mano de obra (puntos)	Número individuo y				
Mínima fracción defectuosa (puntos)	Número individuo z				

3.2.3.4 Comparación del número de frentes encontrado con cada método.

En cuanto a este punto, se busca establecer la capacidad del método para explorar diferentes niveles de individuos dominados.

3.2.3.5 Comparación del número de individuos por intervalo en el frente uno.

En este caso, se busca establecer la capacidad del método de explorar los diferentes intervalos establecidos para cada una de las variables en el frente uno.

3.2.4 Paso 12 Análisis estadístico de los datos y caracterización del individuo de menor tiempo de procesamiento.

Se presenta a continuación en primera instancia el análisis estadístico de los datos. Una vez se compruebe su estabilidad estadística, se procederá a caracterizar el individuo de menor tiempo de procesamiento.

3.2.4.1 Análisis correspondiente a la estabilidad estadística de los datos.

Con este propósito, es necesario efectuar el respectivo análisis anova de un solo factor a cada variable. El anterior análisis, se realizó ejecutando el programa durante 45 oportunidades. De esta manera, en cada ejecución se obtienen 210 individuos; cada individuo cuenta con cuatro valores asociados: tiempo de procesamiento (en horas), tiempo de procesamiento (en semanas), penalización por costo de mano de obra directa y penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario. Es así como para cada ejecución, se obtendrá el promedio de cada variable, considerando para este efecto los 210 individuos que integran cada una de las poblaciones de respuesta.

Desde el punto de vista gráfico, el anterior razonamiento puede visualizarse de la siguiente forma:

Tabla 31. Esquema promedio por variable para cada población.

Número Individuo	Población número Uno				Población número x				Población Número 45			
	Tiempo proceso Horas	Tiempo proceso semanas	Costo mano obra	Fracción defectos					Tiempo proceso horas	Tiempo proceso semanas	Costo mano obra	Fracción defectos
1												
210												
Promedio Variable	A	B	C	D					W	X	Y	Z

De acuerdo con lo anterior, se habrá determinado el promedio de cada variable en cada una de las poblaciones que integran el total de 45 poblaciones. Los mencionados valores promedio se observan en la tabla 31, así:

En cuanto a la variable tiempo de proceso (en horas): del valor A en la población número uno al valor W en la población número 45.

En cuanto a la variable tiempo de proceso (en semanas): del valor B en la población número uno al valor X en la población número 45

En cuanto a la variable penalización por costo de mano directa: del valor C en la población número uno al valor Y en la población número 45.

En cuanto a la variable penalización por fracción defectuosa: del valor D en la población número uno al valor Z en la población número 45.

Los 45 valores promedio obtenidos por cada variable, se distribuirán en 3 tratamientos con quince repeticiones. Una vez organizados los datos en la estructura descrita, se procederá a realizar el análisis de varianza, determinando de esta forma la existencia de estabilidad estadística.

3.2.4.2 Caracterización del individuo con menor tiempo de procesamiento en horas.

La caracterización del individuo con menor tiempo de procesamiento (en horas) se realiza considerando los siguientes elementos: establecer el valor de sus diferentes variables, identificar su comportamiento respecto al tiempo óptimo o subóptimo (expresado en horas) de los pedidos analizados, determinar el método de obtención del tiempo óptimo o subóptimo y por último, establecer su comportamiento respecto a la programación del sistema de producción, utilizando con este propósito una de las reglas tradicionales de programación de producción (programar con prioridad la operación con el tiempo de producción más largo).

4 EXPERIMENTACIÓN

En esta fase se tratarán los siguientes aspectos: el estado del problema actual que debe ser resuelto y a su vez, la presentación de los datos experimentales que permiten aplicar la metodología.

4.1 Estado del problema actual:

En cuanto al estado de la situación actual se abordarán los siguientes elementos: situación inicial, método actual de estimación del tiempo de procesamiento, método actual de estimación del costo de mano de obra directa, método actual de estimación de la fracción defectuosa debida a la fatiga del operario y por último, el resumen correspondiente a los métodos actuales de estimación de las variables de interés:

4.1.1 Situación inicial:

Para éste efecto, se obtuvo la información en una empresa del sector metalmecánico, procediendo a evaluar el producto denominado: “base torre”. La anterior parte, se encuentra localizada en el basamento de las torres de transmisión de energía.

De manera particular, puede afirmarse que el mencionado producto cambia sus especificaciones de acuerdo con: las características espaciales, naturales y artificiales del punto de emplazamiento, el nivel freático, la velocidad regional promedio del viento en las diferentes épocas del año, las condiciones de pluviosidad, la temperatura promedio, la humedad relativa, la altura sobre el nivel del mar, el peso aproximado de la torre y por último, el dimensionamiento geométrico inicial de la torre de transmisión.

A partir de lo expuesto, se establece que tanto las características de cada zona geográfica (topográficas y ambientales), como el diseño estructural de cada torre, inciden en la determinación de las especificaciones de cada tipo de “base torre”. De esta manera, durante la fase de diseño, se identifica consecuentemente la ruta de fabricación que seguirá cada uno de las clases mencionadas de “base torre”.

Respecto a lo anterior, debe anotarse que las rutas de fabricación asignadas a cada tipo de pedido son diferentes, con el propósito de garantizar el cumplimiento de especificaciones y por tanto, de asegurar el apropiado desempeño del producto, en sus condiciones de funcionamiento cotidianas.

Finalmente, se comenta que los centros de fabricación por los cuales circula la base, también son utilizados por otros productos tales como: defensas para carreteras, señales de tránsito, cadenas de bicicleta y asimismo, por algunas partes que integran las torres de transmisión de energía.

4.1.1.1 Método actual de estimación del tiempo de procesamiento.

La compañía no cuenta con un mecanismo formalmente definido para identificar el tiempo de procesamiento. Es así como, después de establecer las diversas rutas de fabricación, el personal de Ingeniería basándose en la observación bajo planos de las “bases”, determina el orden de ingreso de los pedidos a los centros de trabajo. El mencionado orden de programación se encuentra establecido a partir de la complejidad técnica de las partes, por tanto, se asigna con alta prioridad los productos con mayor dificultad en ser manufacturados y con menor prioridad los pedidos de menor complejidad en manufactura. Posteriormente, el mismo equipo de Ingeniería estima un tiempo de procesamiento global (expresado en días), el cual se determina a partir de su experiencia en el manejo de productos similares en la planta de fabricación. El anterior método de estimación, conduce a su vez a que se desconozca el momento en el cual, se desocuparán los recursos en cierta operación. Debido a lo anterior, después de haber concluido el procesamiento de cierto pedido, no es posible preveer la utilización inmediata de dichos recursos, generando tiempos muertos.

En términos generales, puede afirmarse que la empresa desconoce la existencia de los problemas combinatorios, de los cuales se mostró un ejemplo para la determinación del tiempo de procesamiento en las tablas 5, 6 y 7 del paso 2 de la metodología. De esta forma, se concluye que la compañía analizada no ha identificado la necesidad de obtener un plan detallado de producción, cuya respuesta en cuanto a la variable en cuestión sea cercana al valor óptimo o subóptimo esperado.

4.1.1.2 Método actual de estimación del costo de mano de obra directa.

La empresa actualmente define el costo de mano de obra directa de cada programa de producción, a partir del tiempo de procesamiento estimado a nivel general por el personal de Ingeniería. Debido a que este tiempo de procesamiento, se obtiene de forma imprecisa, para la compañía no es posible estimar con exactitud, cuál es el respectivo costo de mano de obra directa. Al respecto, sólo se realiza una estimación global del número de personas que se requieren para el mes. Una vez determinado este número de personas, se procede a multiplicar la cantidad hallada por el valor del salario mensual.

A partir de lo descrito en el párrafo anterior, se establece que la Organización objeto de estudio, desconoce la naturaleza combinatoria del problema. Al respecto, se parte de un único programa de producción definido de forma empírica, al cual se le asignan posteriormente costos globales de mano de obra.

A su vez, es necesario anotar que de acuerdo con el enfoque del presente proyecto, se pretenden explorar diferentes alternativas de programas de producción, estableciendo con base en lo descrito en el paso 2 de la metodología, las respectivas penalizaciones por costo de mano de obra directa.

4.1.1.3 Método actual de estimación de la fracción defectuosa debida a la fatiga del operario.

La empresa ha documentado la información histórica horaria de la fracción defectuosa que se genera en el sistema de fabricación; sin embargo, esta información no puede compararse con el tiempo de procesamiento global de los pedidos, debido a que esta última variable como ya se ha expesado, no se proyecta a nivel horario.

De acuerdo con lo anterior, la empresa en la actualidad establece la fracción defectuosa, a partir de la revisión, tanto de los requerimientos técnicos como del volumen de fabricación, correspondientes a pedidos similares que han sido procesados previamente. Para estos pedidos, se evalúa cuál ha sido la fracción defectuosa. Posteriormente, los valores detectados se promedian y aplican como fracción defectuosa del nuevo pedido.

A su vez, es conveniente expesar que de acuerdo con el enfoque del presente proyecto, se pretenden explorar diferentes alternativas de programas de producción, estableciendo con base en lo descrito en el paso 2 de la metodología, las respectivas penalizaciones por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario.

4.1.1.4 Resumen correspondiente a los métodos actuales de estimación de las variables de interés:

A continuación se presenta por etapas, el resumen correspondiente a los métodos que actualmente utiliza la empresa, con el propósito de establecer el valor correspondiente a las variables de interés:

- Determinar las características topográficas y ambientales de la zona de emplazamiento de la torre de transmisión.
 - Determinar el peso y diseño aproximado de la torre de transmisión.
 - Determinar las especificaciones técnicas del producto “base torre”.
 - Definir la ruta de fabricación para el producto “base torre”.
 - Definir la priorización del programa de producción, de acuerdo con la complejidad técnica de los productos.
- Determinar el tiempo de procesamiento global de un grupo de pedidos, de acuerdo con la información histórica del tiempo de procesamiento registrada para grupos de pedidos similares.
 - Determinar el número de personas requeridas para el siguiente mes.
 - Obtener el valor del salario mensual para el número de personas requeridas.
 - Determinar la fracción defectuosa debida a la fatiga del operario, de acuerdo con la similitud de ciertos pedidos procesados previamente en la planta de fabricación.

4.2 Desarrollo experimental para la aplicación de la metodología.

Enseguida se muestra la descripción de la etapa experimental, de acuerdo con los pasos presentados en la metodología:

4.2.1 Paso uno de la metodología. Caracterización general del problema y generación de la población inicial (Experimentación)

A continuación se describe el desarrollo experimental del paso uno.

- Caracterización general del problema (Experimentación).

En total se cuenta con 9 pedidos. A estos pedidos se les asignan los números del 1 al 9. Cada pedido es procesado en 6 centros de trabajo. Los nombres de los centros de trabajo son: A, B, C, D, E y F. Los pedidos siguen diferentes rutas de fabricación. A continuación se presenta la ruta de proceso de cada pedido. En la intersección entre fila y columna, se encuentra el nombre del centro de manufactura por el cual pasa el pedido.

Tabla 32. Ruta de manufactura por pedido.

Pedido	Ruta de manufactura						Pedido	Ruta de manufactura					
1	B	C	F	D	E	A	6	E	C	B	F	A	D
2	A	D	C	E	F	B	7	C	A	D	F	E	B
3	D	C	A	F	B	E	8	B	F	E	C	A	D
4	B	F	E	D	A	C	9	D	E	F	B	C	A
5	C	B	F	A	E	D							

De la tabla anterior, se interpreta por ejemplo que al pedido número uno, le corresponde la siguiente ruta de fabricación:

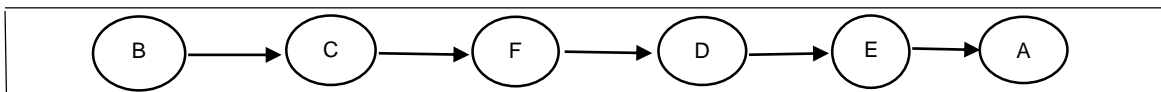


Figura 12. Ruta de fabricación pedido uno.

En cada centro de trabajo se cuenta con una máquina.

Las rutas de manufactura y sus tiempos de fabricación (en horas) por pedido son:

Tabla 33. Rutas y tiempos de fabricación por pedido (en horas).

Pedidos	Rutas y tiempos de fabricación											
1	B	10	C	14	F	10	D	18	E	10	A	11
2	A	12	D	11	C	12	E	14	F	10	B	15
3	D	14	C	12	A	11	F	10	B	12	E	13
4	B	11	F	15	E	15	D	15	A	10	C	17
5	C	9	B	9	F	14	A	12	E	14	D	12
6	E	7	C	10	B	12	F	16	A	12	D	10
7	C	15	A	12	D	18	F	16	E	18	B	15
8	B	14	F	15	E	17	C	15	A	16	D	14
9	D	12	E	17	F	19	B	14	C	12	A	17

De acuerdo con la información de la tabla 33, se establece que el pedido número uno tarda en fabricación: 10 horas en la operación B, 14 horas en la operación C, 10 horas en la operación F, 18 horas en la operación D, 10 horas en la operación E y 11 horas en la operación A.

- Generación de la población inicial (Experimentación)

Los 9 pedidos definidos en la tabla 32, pueden programarse considerando a la vez, tanto las respectivas variaciones de tiempo al día (8 horas, 16 horas o 24 horas) como también las correspondientes variaciones de días a la semana (6 días o 7 días). Es así como, se establece el universo de soluciones, cuyo total de individuos asciende a: $9! \times 6$ individuos. Respecto al anterior universo de soluciones, se procede a extraer aleatoriamente Q individuos. Al generar la población inicial se verifica que los Q individuos sean diferentes entre ellos. En la tabla 4, se muestra la estructura e interpretación particular de un individuo proveniente del universo de soluciones.

De manera específica, al generar la población se toma como referente aquellos pedidos que se encuentran registrados en la tabla 32. Por tanto, se podría identificar entre los posibles órdenes de fabricación, la siguiente secuencia de pedidos: 3 – 7 – 8 – 1 – 4 – 9 – 5 – 2 – 6, en cualquiera de sus variaciones de tiempo al día o de tiempo a la semana.

4.2.2 Paso 2. Generación y evaluación de las subpoblaciones (Experimentación).

A continuación se describe el desarrollo experimental del paso dos:

4.2.2.1 Generación de las subpoblaciones (Experimentación).

La subpoblación de tamaño Q , se divide en tres subpoblaciones de tamaño $Q / 3$. Cada subpoblación se evalúa posteriormente, en una de las tres funciones objetivo: tiempo de proceso, penalización por costo de mano de obra o penalización por fracción defectuosa.

4.2.2.2 Evaluación de las subpoblaciones (Experimentación).

Cada uno de los $Q / 3$ individuos que integran una subpoblación, se evalúan en una función objetivo en particular. Para este efecto, se procede de la siguiente forma:

4.2.2.2.1 Determinación del tiempo de procesamiento en la primera subpoblación.

En primer término es conveniente mencionar que el método de cuantificación de esta variable, se ejemplificó en las tablas 5, 6 y 7 del paso 2 de la metodología.

En cuanto a la secuencia de pedidos mostrada en la generación de la población inicial (3 – 7 – 8 – 1 – 4 – 9 – 5 – 2 – 6), se asume que esta secuencia corresponde a una de las Q / 3 secuencias, de las cuales se requiere establecer el valor de la variable tiempo de procesamiento.

La secuencia de pedidos en cuestión, debe interpretarse con el propósito de estimar el tiempo de procesamiento de la siguiente forma: El pedido 3 se programa con prioridad uno, el pedido 7 se programa con prioridad dos, el pedido 8 se programa con prioridad tres, el pedido 1 se programa con prioridad cuatro, el pedido 4 se programa con prioridad cinco, el pedido 9 se programa con prioridad seis, el pedido cinco se programa con prioridad siete, el pedido dos se programa con prioridad 8 y, finalmente el pedido seis se programa con prioridad nueve.

A su vez, considerando para la secuencia de pedidos: 3 – 7 – 8 – 1 – 4 – 9 – 5 – 2 – 6, la información registrada en la tabla 33, se establece el siguiente plan detallado de producción para las primeras 24 horas laborales:

Tabla 34. Programación de la secuencia: 3 – 7 – 8 – 1 – 4 – 9 – 5 – 2 – 6 en 24 horas.

Nº Pedido	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
3	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
7																								
8	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
1															B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
4																								
9															D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
5	C	C	C	C	C	C	C	C	C															
2	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A												
6	E	E	E	E	E	E	E																	

En la tabla 34, se aprecia que el pedido 7 no está programado durante las primeras 24 horas. Este hecho sucede debido a que el pedido 3 tiene prioridad sobre el pedido 7, por tanto; la programación de una operación correspondiente al pedido 7, no puede implicar el aumento del tiempo de procesamiento del pedido tres. Específicamente, al programar el pedido 7 desde el instante “cero” en su primera operación “C”, cuya duración es de 15 horas, ocasionaría la necesidad de desplazar para un momento posterior del tiempo esta

misma operación en el pedido tres, lo cual incrementaría el tiempo de procesamiento del pedido prioritario. Se establece a partir de lo expresado que el pedido 7, sólo podrá iniciar su procesamiento hasta que el pedido 3 finalice la operación “C” en el minuto 29.

También debe mencionarse respecto a la tabla 34 que el pedido 4 no se programa durante las 24 primeras horas de actividad, debido a motivos similares a los expresados en el párrafo previo para el pedido 7.

Asimismo, se comenta que la programación presentada en la tabla 34 continúa hasta el instante en el cual, se haya finalizado el procesamiento de los diversos pedidos. De esta forma, el tiempo de procesamiento corresponderá al mayor tiempo de procesamiento de cualquiera de los pedidos. Con relación a lo anterior, se identifica el siguiente comportamiento para la secuencia analizada:

Tabla 35. Tiempo final de proceso en la secuencia: 3 – 7 – 8 – 1 – 4 – 9 – 5 – 2 – 6.

Nº Pedido	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196
3																			
7																			
8																			
1																			
4																			
9	C	C	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
5	E	E	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D					
2																			
6																			

Al observar el contenido de la tabla 35 se determina que el pedido número 9 presenta el mayor tiempo de procesamiento. Este tiempo de procesamiento es de 196 horas. Por tanto, a la secuencia de pedidos bajo análisis (3 – 7 – 8 – 1 – 4 – 9 – 5 – 2 – 6), le corresponde consecuentemente un tiempo de procesamiento de 196 horas.

De igual manera, el tiempo de procesamiento obtenido para el orden de programación: 3 – 7 – 8 – 1 – 4 – 9 – 5 – 2 – 6, debe complementarse con la información registrada en los campos 10 y 11 del individuo (tabla 4), es decir, debe complementarse tanto con la jornada laboral del día (8 horas, 16 horas y 24 horas) como con el número de días a la semana (6 días o 7 días).

Respecto a lo anterior, para el tiempo de procesamiento de 196 horas, se presentan enseguida las diferentes alternativas de respuesta (tiempo de procesamiento expresado en semanas), de acuerdo con el número total de horas a laborar por semana (jornada laboral del día multiplicado por el número de días laborados por semana).

Tabla 36. Tiempo de procesamiento expresado en semanas para 196 horas.

Jornada laboral por día (horas por día)	Número de días a la semana (días por semana)	Total de horas laboradas por semana (horas por semana)	Tiempo de procesamiento (en semanas)
8	6	8 h / d x 6 d / sem = 48	196 h / 48 h / sem = 4,08
16	6	96	2,04
24	6	144	1,36
8	7	56	3,5
16	7	112	1,75
24	7	168	1,17

También es necesario comentar que los otros individuos ($Q / 3 - 1$) de la subpoblación, deben analizarse bajo el procedimiento anteriormente descrito.

Por último, se menciona que después de evaluados los $Q / 3$ individuos, deben ordenarse de manera ascendente, de acuerdo con el comportamiento de esta variable. Una vez ordenados de manera ascendente, se elimina el 20 % de los individuos con mayor valor en la subpoblación. Se obtienen por tanto, $0,26667 Q$ individuos.

4.2.2.2 Determinación de la penalización por costo de mano de obra directa:

Los ejemplos en los cuales se muestra el método de cálculo de la penalización por costos de mano de obra directa, fueron registrados en la tabla 14 del paso 2 de la metodología.

La información utilizada para obtener la penalización por costos mano de obra se relaciona en la tabla 37. Los datos correspondientes a aquellas ponderaciones que permiten determinar el nivel salarial como valor adicional al costo del salario en tiempo normal, se tomaron del código laboral (Legis, 2013).

Tabla 37. Ponderaciones sobre el tiempo normal y penalización.

Programación de trabajo	Ponderación adicional al costo en tiempo normal	Penalización (Puntos)	Horario
Diurno.	0	0	6 am a 10 pm
Nocturno.	0,35	35	10 pm a 6 am
Dominical diurno.	0,75	75	6 am a 10 pm
Dominical nocturno.	1,10	110	10 pm a 6 am

Con el propósito de establecer el valor de la penalización por costo de mano de obra directa, se requiere elaborar previamente el plan detallado de producción.

En este caso, se compara el plan detallado de producción registrado en la tabla 34 para la secuencia 3 – 7 – 8 – 1 – 4 – 9 – 5 – 2 – 6, con la penalización definida por costo de mano de obra de la tabla 37.

Específicamente, al comparar las 24 horas laborales de la tabla 34 con los datos de la tabla 37, se determina la conveniencia de segmentar el periodo de 24 horas en intervalos de tiempo de 8 horas. De esta forma, para cada intervalo de tiempo, se asignará la

respectiva penalización por costo de mano de obra. Asimismo, cuando se comparan los intervalos de 8 horas con el contenido de la tabla 37, se identifica la necesidad de diferenciar los tipos de horario: diurno, nocturno, en día hábil y en dominical. Es así como, el análisis de las variaciones descritas, conduce a mostrar los siguientes casos:

- Penalización del costo de mano de obra para el caso de día hábil:

El valor correspondiente a la penalización por costo de mano obra directa, en esta situación es el siguiente:

Tabla 38. Penalización por costo de mano de obra directa para los pedidos de la tabla 34 (caso: día hábil).

Tipo de jornada laboral	Número Intervalo de 8 horas	Horario	Número de personas	penalización Intervalo (puntos)	Total penalización Intervalo (puntos)	Total penalización por jornada (puntos)
8 horas cada día.	1	6 a.m – 2 p.m	5	0	$5 * 0 = 0$	0 + 0 + 0 = 0
	2	6 a.m – 2 p.m	4	0	0	
	3	6 a.m – 2 p.m	4	0	0	
16 horas cada día.	1	6 a.m – 2 p.m	5	0	0	0
	2	2 p.m – 10 p.m	4	0	0	
	3	6 a.m – 2 p.m	4	0	0	
24 horas cada día.	1	6 a.m – 2 p.m	5	0	0	140
	2	2 p.m – 10 p.m	4	0	0	
	3	10 p.m – 6 a.m	4	35	140	

- Penalización del costo de mano de obra directa para los casos: día hábil con dominical o día dominical.

El valor correspondiente a la penalización por costo de mano obra directa, en esta situación es el siguiente:

Tabla 39. Penalización por costo de mano de obra directa para la tabla 34 (caso: día hábil con dominical o día dominical).

Tipo de jornada laboral	Ejemplo de día	Horario	Número de personas	Penalización Intervalo (puntos).	Total penalización Intervalo (puntos)	Total penalización por jornada (puntos)
8 horas cada día.	Viernes	6 a.m – 2 p.m	5	0	$5 * 0 = 0$	300
	Sábado	6 a.m – 2 p.m	4	0	0	
	Domingo	6 a.m – 2 p.m	4	75	300	
16 horas cada día.	Sábado	6 a.m – 2 p.m	5	0	0	300
	Sábado	2 p.m – 10 p.m	4	0	0	
	Domingo	6 a.m – 2 p.m	4	75	400	
24 horas cada día	Domingo	10 p.m – 6 a.m	5	110	550	1.150
	Domingo	6 a.m – 2 p.m	4	75	300	
	Domingo	2 p.m – 10 p.m	4	75	300	

Respecto a las tablas 38 y 39, debe mencionarse que sus resultados son parciales. Dado el caso que quiera obtenerse el puntaje total, debe realizarse el análisis correspondiente para las 196 horas reportadas como tiempo de procesamiento en la tabla 35.

Por último, se menciona que después de evaluados los Q / 3 individuos, deben ordenarse de manera ascendente, de acuerdo con el comportamiento de esta variable. Una vez

ordenados de manera ascendente, se elimina el 20 % de los individuos con mayor valor en la subpoblación. Se obtienen por tanto, 0,26667 Q individuos.

4.2.2.2.3 Determinación de la penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario:

Los ejemplos en los cuales se muestra el método de cálculo de la penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario, fueron registrados en la tabla 11 del paso 2 de la metodología.

Los datos relacionados con la fracción defectuosa causada por la fatiga del operario a lo largo de la jornada laboral y los puntos de penalización equivalentes se presentan en la tabla 40. La información correspondiente a la fracción defectuosa fue sistematizada y suministrada por la dirección de operaciones de la Compañía.

Tabla 40. Fracción defectuosa causada por la fatiga del operario y penalización.

Horario	Fracción defectos	Penalización (puntos)	Horario	Fracción Defectos	Penalización (puntos)
06:00 am a 08:00 am	0	0	06:00 pm a 08:00 pm	0,04	4
08:00 am a 10:00 am	0	0	08:00 pm a 10:00 pm	0,08	8
10:00 am a 12:00 am	0,03	3	10:00 pm a 12:00 am	0	0
12:00 am a 02:00 pm	0,05	5	12:00 am a 02:00 am	0,02	2
02:00 pm a 04:00 pm	0	0	02:00 am a 04:00 am	0,06	6
04:00 pm a 06:00 pm	0,01	1	04:00 am a 06:00 am	0,1	10

Con el fin de establecer el valor de la penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario, se requiere elaborar previamente el plan detallado de producción.

En este caso, se compara el plan detallado de producción registrado en la tabla 34 para la secuencia 3 – 7 – 8 – 1 – 4 – 9 – 5 – 2 – 6, con la penalización definida por fracción defectuosa de la tabla 40.

Al realizar la comparación anterior, se identifica la necesidad de evaluar el comportamiento de cada pedido en cada hora del día, debido a que la fracción defectuosa presenta diversos incrementos al transcurrir cada hora de la jornada laboral. A su vez, los pedidos de la tabla 34, pueden programarse en tres posibles alternativas de jornada laboral por día: 8 horas, 16 horas y 24 horas. De esta manera, tanto el análisis de la variación correspondiente a la fracción defectuosa por cada hora del día como la existencia de diferentes escenarios de jornada laboral, conducen a establecer los valores de penalización mostrados en los siguientes casos:

- Penalización de la fracción defectuosa para la información presentada en la tabla 35, dado que el sistema productivo se haya organizado en jornadas laborales de 8 horas por día.

Con este propósito, se presenta en primera instancia para cada hora del día dentro del horizonte de programación de 24 horas, su ubicación en un día en particular y, asimismo, su equivalencia horaria durante el día analizado:

Tabla 41. Equivalencia horaria para jornadas laborales de 8 horas en 24 horas.

DIA 1																
Número hora	1		2		3		4		5		6		7		8	
Hora equivalente	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	1	1	2
am-m-pm	am	am	am	am	am	am	am	am	am	am	am	m	m	pm	Pm	pm
DIA 2																
Número hora	9		10		11		12		13		14		15		16	
Hora equivalente	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	1	1	2
am-m-pm	am	am	am	am	am	am	am	am	am	am	am	m	m	pm	Pm	pm
DIA 3																
Número hora	17		18		19		20		21		22		23		24	
Hora equivalente	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	1	1	2
am-m-pm	am	am	am	am	am	am	am	am	am	am	am	m	m	pm	Pm	pm

A continuación, se compara la información horaria de la tabla 41, con la información correspondiente a la penalización por fracción defectuosa horaria registrada en la tabla 40. De esta manera, el resultado de la comparación, se asigna a cada hora del plan detallado de la tabla 34. Al respecto, cabe aclarar que el resultado establecido se considera como valor correspondiente a la penalización horaria por fracción defectuosa. Una vez se ha realizado la asignación mencionada, se obtiene la siguiente matriz:

Tabla 42. Penalización fracción defectuosa de la tabla 34 para jornada de 8 horas por día.

Pedido N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Pedido 3	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Penalizac	0	0	0	0	3	3	5	5	0	0	0	0	3	3	5	5	0	0	0	0	3	3	5	5	
Pedido 7																									
Penalizac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedido 8	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
Penalizac	0	0	0	0	3	3	5	5	0	0	0	0	3	3	5	5	0	0	0	0	3	3	5	5	
Pedido 1															B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Penalizac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	0	0	0	3	3	5	5	
Pedido 4																									
Penaliz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedido 9															D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
Penalizac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	0	0	0	3	3	5	5	
Pedido 5	C	C	C	C	C	C	C	C	C																
Penaliz	0	0	0	0	3	3	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedido 2	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A													
Penalizac	0	0	0	0	3	3	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedido 6	E	E	E	E	E	E	E																		
Penalizac	0	0	0	0	3	3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Después de obtener el valor de la penalización por hora, se suman los puntos hallados. Es así como se establece la penalización total. En este caso el valor de la penalización total por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario es de 191 puntos.

Con relación a lo anterior, también debe anotarse que el valor de la penalización se obtiene de manera definitiva, al evaluar las 196 horas que conforman el plan detallado de producción.

- Penalización de la fracción defectuosa para la información presentada en la tabla 34, dado que el sistema productivo se haya organizado en jornadas laborales de 16 horas por día.

A continuación se presenta la equivalencia entre el número de cada hora y la hora correspondiente del día:

Tabla 43. Equivalencia horaria para jornadas laborales de 16 horas en 24 horas.

DIA 1																
Número hora	1		2		3		4		5		6		7		8	
Hora equivalente	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	1	1	2
am-m-pm	am	am	Am	am	am	am	Am	am	am	am	am	m	m	pm	Pm	pm
DIA 2																
Número hora	9		10		11		12		13		14		15		16	
Hora equivalente	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10
am-m-pm	pm	pm	Pm	pm	pm	pm	pm	pm	pm	pm	pm	pm	pm	pm	Pm	pm
DIA 3																
Número hora	17		18		19		20		21		22		23		24	
Hora equivalente	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	1	1	2
am-m-pm	am	am	Am	am	am	am	am	am	am	am	am	m	m	pm	Pm	pm

Una vez se compara la información horaria de la tabla 43, con la información de penalización por fracción defectuosa registrada en la tabla 40, se obtiene la siguiente matriz:

Tabla 44. Penalización fracción defectuosa de la tabla 34 para jornada de 16 horas por día.

Pedido N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Pedido 3	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Penalizac	0	0	0	0	3	3	5	5	0	0	1	1	4	4	8	8	0	0	0	0	3	3	5	5	
Pedido 7																									
Penalizac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedido 8	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
Penalizac	0	0	0	0	3	3	5	5	0	0	1	1	4	4	8	8	0	0	0	0	3	3	5	5	
Pedido 1																	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Penalizac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	5	5	
Pedido 4																									
Penaliz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedido 9																		D	D	D	D	D	D	D	D
Penalizac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	5	5	
Pedido 5	C	C	C	C	C	C	C	C	C																
Penaliz	0	0	0	0	3	3	5	5	0								0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedido 2	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A													
Penalizac	0	0	0	0	3	3	5	5	0	0	1	1					0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedido 6	E	E	E	E	E	E	E																		
Penalizac	0	0	0	0	3	3	5	0									0	0	0	0	0	0	0	0	0

En este caso el valor de la penalización total por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario es de 193 puntos.

- Penalización de la fracción defectuosa para la información presentada en la tabla 34, dado que el sistema productivo se haya organizado en jornadas laborales de 24 horas por día.

A continuación se presenta la equivalencia entre el número de cada hora y la hora correspondiente del día:

Tabla 45. Equivalencia horaria para jornadas laborales de 24 horas en 24 horas.

DIA 1																	
Número hora	1		2		3		4		5		6		7		8		
Hora equivalente	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	1	1	2	
am-m-pm	am	am	Am	am	am	am	am	am	am	am	am	m	m	pm	Pm	pm	
DIA 2																	
Número hora	9		10		11		12		13		14		15		16		
Hora equivalente	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	
am-m-pm	pm	pm	Pm	pm	pm	pm	pm	pm	pm	pm	pm	pm	pm	pm	Pm	pm	
DIA 3																	
Número hora	17		18		19		20		21		22		23		24		
Hora equivalente	10	11	11	12	12	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	
am-m-pm	pm	pm	Pm	pm	pm	am	am	am	am	am	am	am	am	am	Am	am	

Una vez se compara la información horaria de la tabla 45, con la información de penalización por fracción defectuosa registrada en la tabla 40, se obtiene la siguiente matriz:

Tabla 46. Penalización fracción defectuosa de la tabla 34 para jornada de 24 horas por día.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Pedido 3	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Penalizac	0	0	0	0	3	3	5	5	0	0	1	1	4	4	8	8	0	0	2	2	6	6	10	10	
Pedido 7																									
Penalizac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedido 8	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
Penalizac	0	0	0	0	3	3	5	5	0	0	1	1	4	4	8	8	0	0	2	2	6	6	10	10	
Pedido 1																	B	B	B	B	B	B	B	B	B
Penalizac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	6	6	10	10	
Pedido 4																									
Penaliz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedido 9																	D	D	D	D	D	D	D	D	D
Penalizac	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	6	6	10	10	
Pedido 5	C	C	C	C	C	C	C	C	C																
Penaliz	0	0	0	0	3	3	5	5	0								0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedido 2	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A													
Penalizac	0	0	0	0	3	3	5	5	0	0	1	1					0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pedido 6	E	E	E	E	E	E	E																		
Penalizac	0	0	0	0	3	3	5	0									0	0	0	0	0	0	0	0	0

En este caso el valor de la penalización total por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario es de 273 puntos.

Por último, se menciona que después de evaluados los Q / 3 individuos, deben ordenarse de manera ascendente, de acuerdo con el comportamiento de esta variable. Una vez ordenados de manera ascendente, se elimina el 20 % de los individuos con mayor valor en la subpoblación. Se obtienen por tanto, 0,26667 Q individuos.

4.2.3 Paso 3. Conformar la primera nueva población (Experimentación)

En este caso se procede de acuerdo con lo señalado en la metodología. Por tanto, se ejecutan las operaciones de selección, cruzamiento y mutación sobre los individuos elegidos de cada subpoblación hasta obtener una población de tamaño Q. En términos generales el proceso realizado sobre los 0,26666 Q individuos que se obtienen de cada subpoblación, es el siguiente:

Tabla 47. Descripción de las operaciones para conformar la primera nueva población.

Operación	Insumo	Descripción general de la operación	Salida
Selección	Tres subpoblaciones de tamaño $0,266667 Q$.	Se divide cada subpoblación en tres segmentos. Posteriormente, se realiza una selección aleatoria uniforme de individuos de cada segmento. Es así como, se obtiene de cada subpoblación otra subpoblación más pequeña de tamaño $0,166667 Q$. Estas tres subpoblaciones de tamaño $0,16666 Q$, se fusionan formando una subpoblación de tamaño $Q / 2$.	Subpoblación de tamaño $Q / 2$
Cruzamiento	Subpoblación de tamaño $N/2$.	Se realiza la operación de cruzamiento tomando de forma aleatoria los individuos que integran la población de tamaño $Q / 2$. Los individuos obtenidos por cruzamiento ($0,3 Q$), se fusionan con los individuos padre conformando una nueva subpoblación de tamaño $0,8Q$.	Subpoblación de tamaño $0,8 Q$.
Mutación	Subpoblación de tamaño $0,8 Q$.	Se realiza la operación de mutación tomando de forma aleatoria $0,1Q$ individuos de aquellos individuos que conforman la subpoblación de tamaño $0,8 Q$. De esta manera, los $0,1 Q$ individuos obtenidos, se fusionan con la anterior subpoblación de tamaño $0,8 Q$, formando una nueva subpoblación de tamaño $0,9 Q$.	Subpoblación de tamaño $0,9 Q$.
Selección aleatoria.	Universo de soluciones $9 \times 6!$	Se realiza una selección aleatoria del universo de soluciones, obteniéndose $0,1 Q$ individuos.	$0,1 Q$ individuos seleccionados aleatoriamente.
Fusión de individuos	Subpoblación de tamaño $0,9 N$ e individuos seleccionados aleatoriamente.	Los individuos seleccionados aleatoriamente ($0,1 Q$ individuos) se fusionan con la subpoblación de tamaño $0,9N$, obteniéndose la población de tamaño N .	Población de tamaño N .

El proceso anterior presentado a nivel gráfico se observa de la siguiente manera:

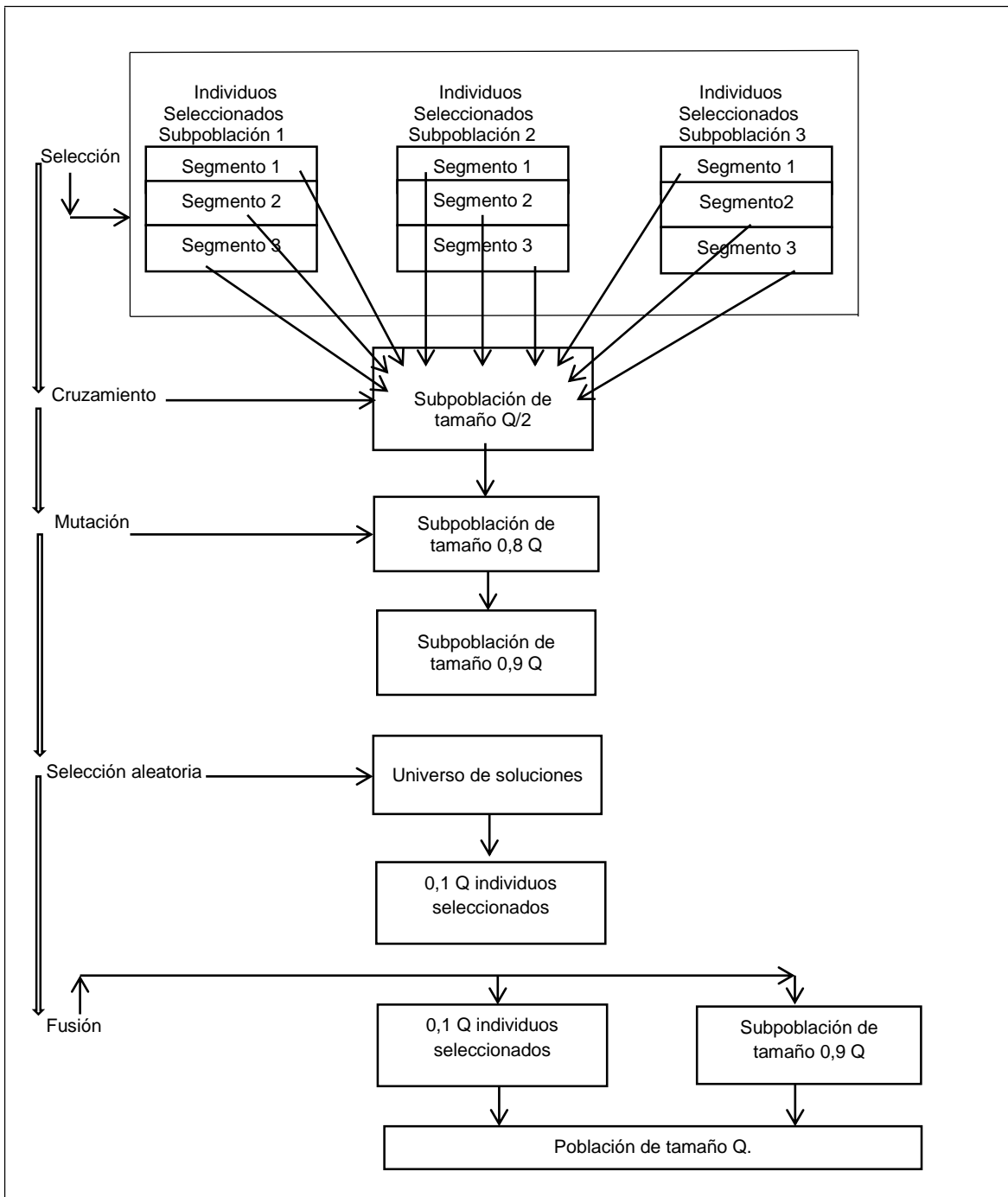


Figura 13. Procedimiento de obtención de la primera nueva población.

4.2.4 Paso 4. Ordenar por frentes la primera nueva población (Experimentación)

La anterior población de tamaño Q , se ordena por frentes de acuerdo con lo señalado en la metodología. Para este efecto se evalúa la primera nueva población en cada función objetivo, posteriormente se realiza el análisis de dominancia y finalmente, se obtienen los frentes.

4.2.5 Paso 5. Conformar la segunda nueva población (Experimentación)

La segunda nueva población se obtiene siguiendo los lineamientos indicados en la metodología. Para el caso, se toman los Q individuos de la primera nueva población ordenados por frentes; de esta manera, se procede a aplicar sobre dichos individuos las operaciones de selección, cruzamiento y mutación. Enseguida se muestra en términos generales el proceso correspondiente:

Tabla 48. Descripción de las operaciones para conformar la segunda nueva población.

Operación	Insumo	Descripción general de la operación	Salida
Selección	Primera nueva población de tamaño Q ordenada por frentes.	Se seleccionan $Q / 2$ individuos, priorizando en la selección aquellos individuos que ocupan los primeros frentes.	Subpoblación de tamaño $Q / 2$
Cruzamiento	Primera nueva población de tamaño Q ordenada por frentes.	En primera instancia se determina la proporción de individuos por frente respecto al total de Q individuos. Esta proporción se aplica a $0,3 Q$ individuos. El resultado establecido indica la cantidad de individuos que deben obtenerse del cruzamiento aleatorio de los individuos del frente. Se procede enseguida a realizar la operación de cruzamiento, de tal forma que se obtenga la cantidad de individuos hijo esperados por frente.	$0,3 Q$ individuos.
Primera fusión	Subpoblación de tamaño $Q / 2$ y $0,3 Q$ individuos provenientes de la operación de cruzamiento.	Posteriormente se agrupa la subpoblación de tamaño $Q / 2$ con los $0,3 Q$ individuos cruzados, identificándose la subpoblación de tamaño $0,8 Q$.	Subpoblación de tamaño $0,8 Q$.
Mutación	Subpoblación de tamaño $0,8 Q$.	Se realiza la operación de mutación tomando de forma aleatoria $0,1 Q$ individuos de aquellos individuos que conforman la subpoblación de tamaño $0,8 Q$. De esta manera, los $0,1 Q$ individuos obtenidos, se fusionan con la anterior subpoblación de tamaño $0,8 Q$, formando una nueva subpoblación de tamaño $0,9 Q$.	Subpoblación de tamaño $0,9 Q$.
Selección aleatoria.	Universo de soluciones $9 \times 6!$	Se realiza una selección aleatoria del universo de soluciones, obteniéndose $0,1 Q$ individuos.	$0,1 Q$ individuos seleccionados aleatoriamente.
Fusión de individuos	Subpoblación de tamaño $0,9 Q$ e individuos seleccionados aleatoriamente.	Los individuos seleccionados aleatoriamente ($0,1 Q$ individuos) se fusionan con la subpoblación de tamaño $0,9 Q$, obteniéndose la población de tamaño Q .	Población de tamaño Q .

El proceso anterior a nivel gráfico se observa de la siguiente forma:

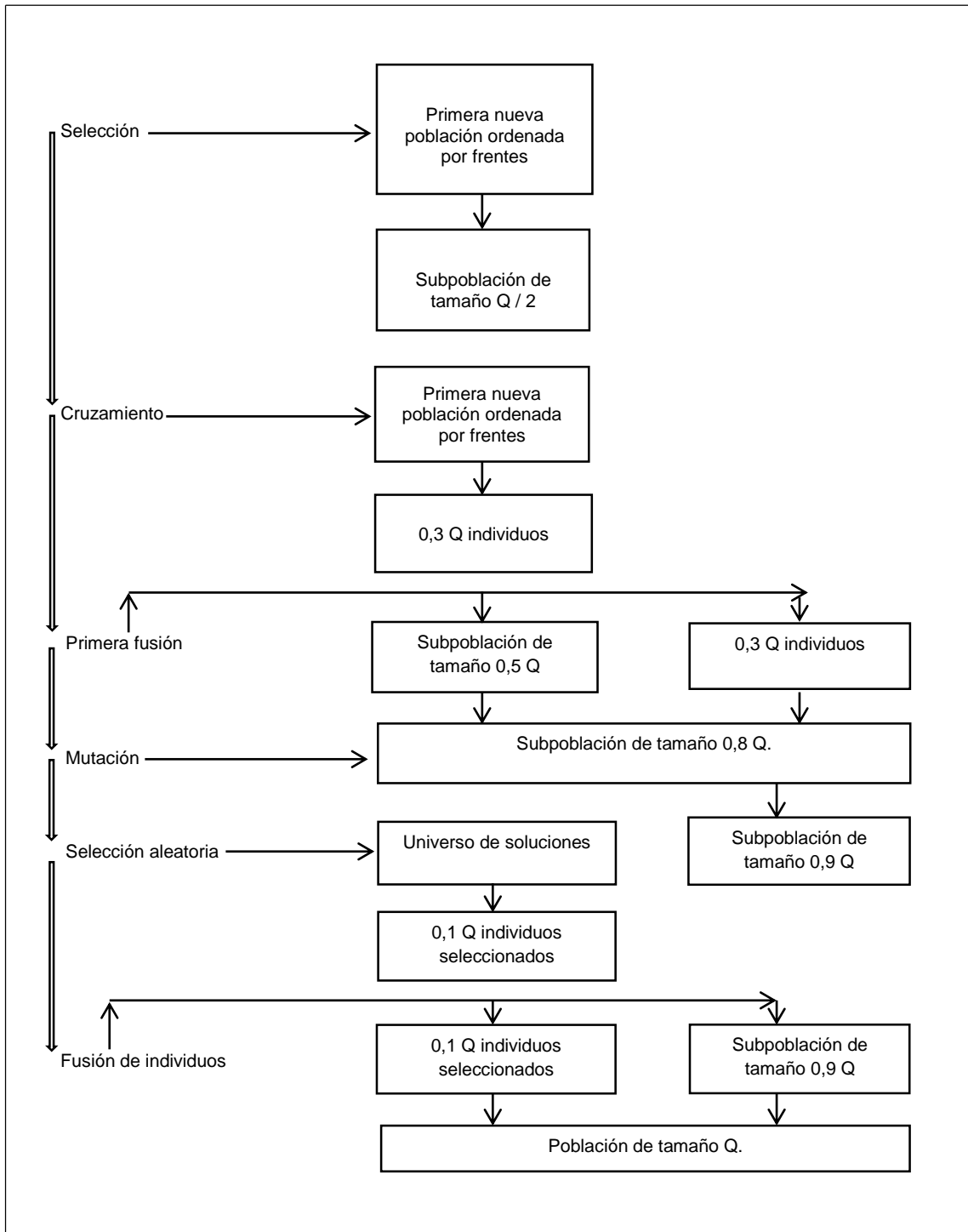


Figura 14. Procedimiento de obtención de la segunda nueva población.

4.2.6 Paso 6 a Paso 12 de la experimentación.

Este numeral incluye los siguientes aspectos:

- Paso 6. Sistematización de la información.

Para la segunda nueva población obtenida en la última iteración, se realizan los análisis señalados en la metodología.

- Paso 7. Generar de manera aleatoria T individuos y obtener el factor de ponderación por individuo (método dos).

Para cada grupo de T individuos se establece el valor del factor de ponderación. Este valor se determina de acuerdo con las expresiones registradas en el paso 7 de la metodología. Al estimar el valor del factor, se considera que las funciones objetivo presentan el mismo nivel de importancia ($FP(f_i) = 0,3333$), de acuerdo con lo definido por el equipo de dirección de la compañía.

- Paso 8. Selección de 0,8 T individuos con mayor valor de factor de ponderación, cruzarlos y mutarlos (métodos dos).

Una vez evaluados los T individuos, se seleccionan los 0,8 T individuos que presentan mayor valor de factor de ponderación. Para los 0,8 T individuos evaluados, se realizan las respectivas operaciones de cruzamiento y mutación. Se obtienen por tanto 0,8 T individuos hijo.

- Paso 9. Guardar en Q posiciones los mayores valores detectados de factores de ponderación después de realizar P iteraciones.

De cada grupo de 0,8 T individuos seleccionados, se toma aquel que posea el mayor valor del factor de ponderación. Este valor se compara con el menor valor del factor de ponderación existente en una lista que se encuentra integrada por Q individuos. De esta manera, los Q individuos constituyen un conjunto de individuos preseleccionados como individuos de mayor valor en cuanto al comportamiento del factor considerado. Dado el caso que el factor de ponderación del individuo seleccionado sea mayor que el factor de ponderación del individuo del listado, se procede a agregar el primero y a su vez a retirar el segundo del listado en mención.

- Paso 10. Ordenar los Q individuos de acuerdo con el valor del factor de ponderación por individuo y conformar los frentes.

Los Q individuos seleccionados se ordenan por frentes. De esta manera, se identifican los individuos no dominados. Estos individuos, se comparan posteriormente con los individuos no dominados que a su vez provienen de la aplicación del método uno.

- Paso 11. Comparación de resultados.

Los individuos identificados por medio de la aplicación de ambos métodos, se comparan a nivel de: variabilidad, número de frentes, número de individuos por intervalo y asimismo, los valores mínimos correspondientes a las diversas variables.

- Paso 12. Análisis estadístico de los datos y caracterización del individuo de menor tiempo de procesamiento.

En este caso, se realiza análisis de varianza de un solo factor a la población final de respuesta identificada por medio de la aplicación del método uno. De igual forma, se caracteriza aquel individuo que genere el menor tiempo de procesamiento (expresado en horas).

5 RESULTADOS

Los resultados se presentan de la siguiente forma, en primer término se ilustran los resultados relacionados con el método uno; posteriormente, se muestran los resultados relacionados con el método dos; más adelante se presenta la comparación de los resultados de ambos métodos y finalmente, se muestra tanto el análisis de varianza como la caracterización del individuo con menor tiempo de procesamiento proveniente del método uno.

5.1 Análisis método uno (método híbrido entre los algoritmos Vega y Moga).

Al aplicar a la situación planteada en la experimentación (numeral 2.3.2), los aspectos descritos en la metodología a nivel detallado (método uno), se obtienen los siguientes resultados:

5.1.1 Pasos 1 a 6: Identificación de la población final de respuesta.

En la tabla 49 se muestra el resumen de resultados correspondiente a la población final de respuesta, la cual se obtuvo después de aplicar las diferentes fases del método uno. De esta forma, la tabla resumen presenta los siguientes elementos: aquellos individuos que se referencian en etapas posteriores del proyecto y, a su vez el valor de los parámetros utilizados para establecer el comportamiento de la mencionada población (promedio, desviación estándar y coeficiente de variación).

Tabla 49. Resumen población resultado (método uno).

Número Individuo	Tiempo de proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo de proceso (semanas)	Penalización por costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)
1	159	24	7	0,9464	2.380	2.258
2	159	24	7	0,9464	2.415	2.241
3	181	24	7	1,0774	3.420	2.225
9	216	24	7	1,2857	2.980	2.236
10	189	24	6	1,3125	1.085	2.239
19	159	16	6	1,6563	0	1.819
20	189	16	7	1,6875	750	1.806
21	189	16	7	1,6875	525	1.816
22	191	16	7	1,7054	750	1.815
24	198	16	7	1,7679	600	1.814

Tabla 49. Resumen población resultado (método uno).

Número Individuo	Tiempo de proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo de proceso (semanas)	Penalización por costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)
35	224	16	6	2,3333	0	1.872
36	224	16	6	2,3333	0	1.819
41	256	16	6	2,6667	0	1.827
43	184	8	7	3,2857	900	1.412
44	159	8	6	3,3125	0	1.411
46	201	8	7	3,5893	825	1.399
48	189	8	6	3,9375	0	1.407
49	189	8	6	3,9375	0	1.388
51	197	8	6	4,1042	0	1.399
52	198	8	6	4,1250	0	1.400
53	234	8	7	4,1786	975	1.380
54	201	8	6	4,1875	0	1.404
57	203	8	6	4,2292	0	1.413
62	228	8	6	4,7500	0	1.394
63	239	8	6	4,9792	0	1.410
64	242	8	6	5,0417	0	1.424
65	245	8	6	5,1042	0	1.424
80	211	24	6	1,4653	1.085	2.232
100	204	24	7	1,2143	3.050	2.253
120	212	16	7	1,8929	525	1.845
140	191	16	7	1,7054	600	1.865
160	203	16	7	1,8125	600	1.856
180	271	16	7	2,4196	675	1.819
200	236	16	7	2,1071	750	1.837
210	263	24	6	1,8264	1.120	2.270
Promedio	212,0619			2,0377	1.284,3333	1.955,9810
Desviación estándar	20,7254			1,0366	1.168,1081	306,9532
Coficiente Variación	0,0977			0,5087	0,9095	0,1569

En la tabla 87 del anexo 4, se presenta integralmente la población final que se obtuvo por medio de la aplicación del método uno.

5.1.2 Paso 6. Sistematización de la información (Resultados).

En este paso se obtienen los siguientes aspectos: la cantidad de individuos por frente, la conformación de los intervalos correspondientes al primer frente, la sistematización de los

individuos y por último, el resumen de los individuos con mayor pertenencia a cada intervalo. Es así como, se presenta en primer término la cantidad de individuos por frente mientras que posteriormente, se muestra de manera unificada los otros aspectos nombrados.

5.1.2.1 Cantidad de individuos por frente (Resultados):

A partir de la información registrada en la tabla anterior y de acuerdo con lo establecido en el paso 6 de la metodología, se establece la siguiente clasificación general de individuos por frentes.

Tabla 50. Cantidad de individuos por frente.

Número Frente	Cantidad Individuos	Número Frente	Cantidad Individuos	Número Frente	Cantidad Individuos	Número Frente	Cantidad Individuos
1	68	10	2	20	1	33	1
2	29	11	7	21	1	34	1
3	25	12	2	24	3	35	1
4	11	13	2	25	4	37	1
5	13	14	1	26	1	62	1
6	7	15	4	27	1		
7	9	16	1	28	1		
8	2	17	2	30	1		
9	5	19	1	32	1		

5.1.2.2 Sistematización detallada (Resultados).

De acuerdo con la información ilustrada en la tabla 49, se extrae el primer frente, el cual contiene los individuos no dominados. De ésta manera, se procede a analizar los 68 individuos clasificados en dicho frente. Este análisis se realizará considerando los siguientes elementos: se muestra en primera instancia para cada una de las tres variables la clasificación por intervalos; posteriormente, se ilustra la sistematización por datos agrupados; más adelante, se presentan los individuos con mayor pertenencia a cada intervalo y, finalmente se describe el comportamiento integral de los individuos con mayor pertenencia de cada variable. A continuación se especifica el proceso en mención:

5.1.2.2.1 Análisis de los datos correspondientes al primer frente tomando como criterio de clasificación la variable: tiempo de procesamiento en semanas.

Con el propósito de sistematizar la información relacionada con el primer frente, el equipo de dirección de la compañía realizó la clasificación por intervalos de los datos de la variable tiempo de procesamiento. Para éste efecto, dicho equipo de dirección se reunió

en dos sesiones. En la primera sesión analizaron los datos y definieron a nivel general en qué circunstancias usarían cierto tipo de datos. Con base en lo anterior cada participante, debía preparar para una segunda sesión la clasificación de los datos por intervalos, acompañando la categorización de la respectiva justificación. En la segunda sesión cada uno de los mencionados participantes ilustró su sistema de clasificación a los demás integrantes del equipo de dirección. De ésta forma, se generó un intercambio de opiniones, lo cual condujo finalmente a lograr consenso, respecto a la clasificación por intervalos de la información suministrada (datos de la variable tiempo de proceso).

Con relación al anterior procedimiento, debe aclararse que en las dos sesiones fueron analizadas de forma simultánea las tres variables: tiempo de proceso (en semanas), penalización por costo de mano de obra directa y penalización por fracción defectuosa causada por la fatiga del operario. De forma específica, la clasificación obtenida para la variable tiempo de procesamiento y su respectiva justificación se presentan enseguida:

Tabla 51. Intervalos para el tiempo de procesamiento (en semanas).

Número Intervalo	Límite Inferior (semanas)	Límite Superior (semanas)	Justificación del intervalo	Descripción general
1	0,94	1,5	En este caso se busca realizar entregas rápidas, debido a que los clientes de acuerdo con sus necesidades particulares, pueden requerir atención inmediata. Asimismo, existen periodos económicos caracterizados por el crecimiento permanente de la demanda. En la situación anterior coexisten una gran variedad de compromisos, a pesar de lo cual el plan de entregas debe ejecutarse cumpliendo las fechas previamente establecidas.	Tiempo de proceso bajo.
2	1,5	2,2	En este caso se busca realizar entregas rápidas pero con menor grado de agilidad respecto a aquellas entregas definidas para el intervalo número uno. A su vez, existen periodos de crecimiento económico permanente con algunas épocas de estabilización. Durante estos periodos, se debe mantener un apropiado nivel de servicio para los diversos pedidos que integren el programa oficial de producción.	Tiempo de proceso medio bajo.
3	2,2	3	En éste caso el nivel de pedidos urgentes que requieren los clientes se reduce de manera significativa. Asimismo, los periodos económicos presentan estabilidad estructural, lo cual conduce a que se realicen pocos cambios en los programas de producción.	Tiempo de proceso medio.
4	3	3,9	En éste caso, los periodos económicos presentan épocas de estabilidad y de decrecimiento alternado. Lo anterior conduce a que el programa de producción se ajuste al comportamiento real del mercado, sin que exista para la situación bajo análisis ningún tipo de prioridad que deba atenderse de forma inmediata.	Tiempo de proceso medio alto.
5	3,9	5,2	En éste caso, los periodos económicos presentan características de recesión; por tanto, la asignación de los recursos utilizados en la ejecución del programa de producción, conduce a que se obtengan tiempos de entrega significativamente altos. Respecto a lo anterior, cabe aclarar que los mencionados tiempos de entrega, también corresponden a las necesidades de entrega de las compañías cliente.	Tiempo de proceso alto.

A partir de los anteriores intervalos, se obtiene la siguiente distribución de los datos correspondientes al tiempo de procesamiento (en semanas) para los 68 individuos que integran el primer frente.

Tabla 52. Distribución de los individuos del frente uno por intervalos (tiempo de proceso).

Número Intervalo	Límite Inferior (semanas)	Límite Superior (semanas)	Números de individuos	Frecuencia	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia absoluta (%)
1	0,94	1,5	1 al 16	16	23,53	23,53
2	1,5	2,2	17 al 33	17	25	48,53
3	2,2	3	34 al 42	9	13,24	61,76
4	3	3,9	43 al 47	5	7,35	69,12
5	3,9	5,2	48 al 68	21	30,88	100
	Total			68	100	

De acuerdo con la información anterior, se procede a determinar el individuo de mayor pertenencia de cada intervalo (paso 6 de la metodología). Con este objetivo, para el conjunto de individuos que se clasifican en cada uno de tales intervalos, se establece el valor promedio de las variables analizadas, así:

Tabla 53. Promedio de cada variable por intervalo (tiempo de proceso).

Número Intervalo	Promedio tiempo proceso (semanas)	Promedio penalización por costos de mano de obra (puntos)	Promedio penalización por fracción defectuosa (puntos)	Número Intervalo	Promedio tiempo proceso (semanas)	Promedio penalización por costos de mano de obra directa (puntos)	Promedio penalización por fracción defectuosa (puntos)
1	1,2347	2.008,44	2.210,25	4	3,4696	720	1.402,20
2	1,8576	361,76	1.816,12	5	4,4976	46,43	1.405,52
3	2,4375	0	1.828				

Tomando como base el valor de los promedios anteriores y, utilizando a su vez la ecuación número 6 del paso 6 de la metodología, se procede a establecer la pertenencia de los individuos clasificados en cada intervalo. Es así como, se muestran a continuación los resultados de los individuos con mayor pertenencia por intervalo:

Tabla 54. Pertenencia del individuo por intervalo (tiempo de proceso en semanas).

Número intervalo	1	2	3	4	5
Número Individuo	1	21	41	46	54
Valor pertenencia (%)	73,46	57,97	97,67	85,41	95

Con el propósito de evidenciar la forma de obtener el valor de la pertenencia, se aprecia a continuación el método de cálculo correspondiente al individuo número uno del primer intervalo.

De acuerdo con lo anterior, se identifica en primera instancia el valor del radio (mayor distancia al promedio del intervalo). En este caso, se encontró que el valor del radio es generado por el individuo número tres.

Particularmente, el individuo número tres presenta el siguiente comportamiento: 1,0773 semanas de tiempo de procesamiento, 3.420 puntos por penalización en costo de mano

de obra directa y 2.225 puntos por penalización en fracción defectuosa. De manera específica, el valor del radio para el individuo número tres, se obtuvo así:

$$\text{Radio} = ((1,2347 - 1,0773)^2 + (2.008,4375 - 3420)^2 + (2210,25 - 2225)^2)^{1/2} = 1.411,64$$

Posteriormente, se obtiene el valor de pertenencia, cuyo valor para el individuo uno proviene de aplicar la siguiente expresión:

$$\text{Pertenencia Individuo uno} = 1 - (\text{distancia individuo uno al promedio} / R)$$

La distancia del individuo uno a los valores promedio, se calcula de la misma manera en la cual se obtiene el valor del radio.

$$\text{Pertenencia Individuo uno} = 1 - (374,6182 / 1.411,64) = 0,7346.$$

De forma similar a la anteriormente descrita, se procede con los otros intervalos. Asimismo, se observan a continuación los individuos por medio de los cuales se obtuvo el valor del radio en cada intervalo, acompañados de sus respectivos valores del radio:

Tabla 55. Individuos con sus respectivos valores de radio (variable: Tiempo de procesamiento).

Número Intervalo	Número Individuo	Valor radio	Número Intervalo	Número Individuo	Valor radio
1	3	1.411,6396	4	44	720,0538
2	20	388,3671	5	53	988,9220
3	35	44			

5.1.2.2.2 Análisis de los datos correspondientes al primer frente tomando como criterio de clasificación la variable: penalización por costos de mano de obra directa.

Con el propósito de sistematizar la información relacionada con el primer frente, el equipo de dirección de la compañía realizó la clasificación de los datos de penalización por costos de mano de obra directa, siguiendo el procedimiento ya descrito para la variable tiempo de procesamiento.

La clasificación obtenida para la variable penalización por costos de mano de obra directa y su respectiva justificación se presentan enseguida:

Tabla 56. Intervalos para la penalización por costos de mano de obra directa (puntos).

Número Intervalo	Límite Inferior (puntos)	Límite Superior (puntos)	Justificación del intervalo	Descripción general
1	0	0	En éste caso se busca reducir los costos de mano de obra, con el propósito de incrementar el flujo de efectivo al igual que mantener o incrementar el nivel de rentabilidad de la compañía.	Costo de mano de obra bajo
2	0	600	En éste caso se busca mantener los niveles de flujo de efectivo en la compañía.	Costo de mano de obra medio bajo
3	600	1.300	El costo a nivel medio no se propone como una meta particular de la compañía, básicamente se observa como una consecuencia de organizar el sistema de producción para atender los requerimientos de entrega correspondientes a la demanda de mercado. Cuando la empresa bajo ciertas circunstancias decide trabajar con un costo de mano de obra de nivel medio, corre el riesgo de reducir de manera significativa tanto su flujo de efectivo como su nivel de rentabilidad.	Costo de mano de obra medio
4	1300	2.300	El costo a nivel medio alto no se propone como una meta particular de la compañía, se entiende como la consecuencia de implementar algunos requerimientos de difícil logro relacionados con el cubrimiento de los niveles de demanda. Cuando la empresa bajo ciertas circunstancias decide trabajar con un costo de mano de obra de nivel medio alto, corre el riesgo de reducir de manera drástica tanto su flujo de efectivo como su nivel de rentabilidad.	Costo de mano de obra medio alto
5	2300	3.420	El costo a nivel alto no se propone como una meta específica de la organización, se interpreta como la consecuencia de implementar algunos requerimientos de muy difícil logro relacionados con el cubrimiento de los niveles de demanda. Cuando la empresa bajo ciertas circunstancias decide trabajar con un costo de mano de obra de nivel alto, corre el riesgo de reducir de manera muy drástica tanto su flujo de efectivo como su nivel de rentabilidad.	Costo de mano de obra alto

A partir de los anteriores intervalos, se obtiene la siguiente distribución de los datos correspondientes a la variable penalización por costos de mano de obra (puntos) para los 68 individuos que integran el primer frente:

Tabla 57. Distribución de los individuos del frente uno por intervalos (penalización por costos de mano de obra directa).

Número Intervalo	Límite Inferior (puntos)	Límite Superior (puntos)	Números de individuos	Frecuencia	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia absoluta (%)
1	0	0	16, 28 al 42, 44, 48 al 52 y 54 al 68	37	54,41	54,41
2	0	600	17, 18, 21, 26, 27, 24.	6	8,82	63,23
3	600	1.300	16, 23, 20, 22, 25, 46, 43, 45, 47, 53, 10 al 15 y 4	17	25	88,23
4	1.300	2.300	0	0	0	88,23
5	2.300	3.420	1, 2, 9, 7, 6, 5, 8 y 3	8	11,77	100
	Total			68	100	

En la tabla anterior el orden en el cual se listan los individuos en la columna: Números de individuos, es ascendente, es decir, se inicia con el individuo que presenta menor valor de penalización y va aumentando hasta el individuo que muestra el mayor valor de penalización.

De acuerdo con la información registrada en la tabla 57, se procede a determinar el individuo de mayor pertenencia a cada intervalo (paso 6 de la metodología); con este propósito, para el conjunto de individuos que clasifican en cada uno de dichos intervalos, se obtiene el valor promedio de las variables analizadas, así:

Tabla 58. Promedio de cada variable por intervalo (penalización por costos de mano de obra directa).

Número Intervalo	Promedio tiempo proceso (semanas)	Promedio penalización por costos de mano de obra (puntos)	Promedio penalización por fracción defectuosa (puntos)	Número Intervalo	Promedio tiempo proceso (semanas)	Promedio penalización por costos de mano de obra directa (puntos)	Promedio penalización por fracción defectuosa (puntos)
1	3,5036	0	1.586,4595	4	Cero Ind	Cero Ind	Cero Ind
2	1,744	537,5	1.822,1666	5	1,1183	2.970	2.230,25
3	2,1189	933,8235	1.867,2352	-	-	-	-

Tomando como base el valor de los promedios anteriores y, utilizando a su vez la ecuación 6 del paso 6 de la metodología, se procede a identificar la pertenencia de los individuos clasificados en cada intervalo. Es así como, se muestran a continuación los resultados de los individuos con mayor pertenencia por intervalo:

Tabla 59. Pertenencia del individuo por intervalo (penalización por costos de mano de obra directa).

Número intervalo	1	2	3	4	5
Número Individuo	64	21	22	0 Individuo	9
Valor pertenencia (%)	43,1	77,89	60,92	0 Individuo	98,05

El método de obtención del valor de la pertenencia, corresponde al método ya descrito para el individuo uno de la variable tiempo de procesamiento.

A su vez, se aprecian a continuación los individuos por medio de los cuales se obtuvo el valor del radio, acompañados de sus respectivos valores del radio: 4

Tabla 60. Individuos con sus respectivos valores de radio (variable: Penalización por costos de mano de obra directa)

Número Intervalo	Número Individuo	Valor radio	Número Intervalo	Número Individuo	Valor radio
1	35	285,5429	4	Cero Individuos	Cero Individuos
2	24	63,03130	5	1	590,6522
3	53	488,9764			

5.1.2.2.3 Análisis de los datos correspondientes al primer frente tomando como criterio de clasificación la variable: penalización por fracción defectuosa.

Con el propósito de sistematizar la información relacionada con el primer frente, el equipo de dirección de la compañía realizó la clasificación de los datos de penalización por fracción defectuosa, siguiendo el mismo procedimiento ya descrito para la variable tiempo de procesamiento.

La clasificación obtenida para la variable penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario y su respectiva justificación se presentan enseguida:

Tabla 61. Intervalos para la penalización por fracción defectuosa (puntos).

Número Intervalo	Límite Inferior (puntos)	Límite Superior (puntos)	Justificación del intervalo	Descripción general
1	1.380	1.400	En este caso se busca obtener en el contexto de la compañía, un nivel de fracción defectuosa que genere el menor impacto posible en el programa de producción, como en el comportamiento de los costos operativos.	Fracción defectuosa baja.
2	1.400	1.550	En este caso se busca obtener en el contexto de la compañía, un nivel de fracción defectuosa que disminuya la posibilidad de realizar cambios al programa de producción establecido.	Fracción defectuosa media baja.
3	1.550	1.700	La fracción defectuosa a nivel medio no se propone como una meta particular de la compañía, básicamente se observa como una consecuencia de organizar el sistema de producción para implementar los requerimientos de entrega correspondientes a la demanda de mercado. Cuando la empresa bajo ciertas circunstancias decide trabajar con una fracción defectuosa en nivel medio, corre el riesgo de reducir de manera significativa los siguientes aspectos: el flujo de efectivo, la rentabilidad y la satisfacción del cliente.	Fracción defectuosa en nivel medio.
4	1.700	1.900	La fracción defectuosa en nivel medio alto no se propone como una meta particular de la compañía, se entiende como la consecuencia de implementar algunos requerimientos de difícil logro relacionados con el cubrimiento de los niveles de demanda. Cuando la empresa bajo ciertas circunstancias decide trabajar con una fracción defectuosa en nivel medio alto, corre el riesgo de reducir de manera drástica los siguientes aspectos: el flujo de efectivo, la rentabilidad y la satisfacción del cliente.	Fracción defectuosa en nivel medio alto.
5	1.900	2.258	La fracción defectuosa en nivel alto no se propone como una meta particular de la compañía, se entiende como la consecuencia de implementar algunos requerimientos de muy difícil logro relacionados con el cubrimiento de los niveles de demanda. Cuando la empresa bajo ciertas circunstancias decide trabajar con una fracción defectuosa en nivel alto, corre el riesgo de reducir muy drásticamente los siguientes aspectos: el flujo de efectivo, la rentabilidad y la satisfacción del cliente.	Fracción defectuosa en nivel alto.

A partir de los anteriores intervalos, se obtiene la siguiente distribución de los datos correspondientes a la penalización por fracción defectuosa (puntos) para los 68 individuos que integran el primer frente:

Tabla 62. Distribución de los individuos del frente uno por intervalos (penalización por fracción defectuosa).

Número Intervalo	Límite Inferior (puntos)	Límite Superior (puntos)	Números de individuos	Frecuencia	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia absoluta (%)
1	1.380	1.400	53, 49, 47, 50, 62, 59, 46, 51, 60, 45, 52.	11	16,28	16,28
2	1.400	1.550	58, 55, 54, 48, 63, 66, 44, 43, 57, 68, 56, 61, 67, 64, 65.	15	22,06	38,24
3	1.550	1.700	0 individuos	0	0	38,24
4	1.700	1.900	30, 33, 42, 26, 20, 25, 29, 27, 23, 24, 38, 22, 21, 32, 16, 19, 30, 39, 34, 31, 41, 40, 37, 18, 28, 17, 35.	27	39,71	77,94
5	1.900	2.258	8, 7, 3, 6, 15, 9, 14, 5, 10, 2, 12, 13, 11, 1, 4	15	22,06	100
	Total			68	100	

En la tabla anterior, el orden en el cual se listan los individuos en la columna: Números de individuos, es ascendente, es decir, se inicia con el individuo que presenta menor valor de penalización y va aumentado hasta el individuo que muestra el mayor valor de penalización.

De acuerdo con la información de la tabla 62, se procede a determinar el individuo de mayor pertenencia a cada intervalo (paso 6 de la metodología); con este propósito, para el conjunto de individuos que clasifican en cada uno de tales intervalos, se obtiene el valor promedio de las variables analizadas, así:

Tabla 63. Promedio de cada variable por intervalo (penalización por fracción defectuosa).

Número Intervalo	Promedio tiempo proceso (semanas)	Promedio penalización por costos de mano de obra (puntos)	Promedio penalización por fracción defectuosa (puntos)	Número Intervalo	Promedio tiempo proceso (semanas)	Promedio penalización por costos de mano de obra directa (puntos)	Promedio penalización por fracción defectuosa (puntos)
1	4,0806	334,0909	1.394,00	4	2,0347	252,78	1.820,19
2	4,4607	60	1.412,87	5	1,222	2.097,33	2.236,33
3	Sin individ	Sin individ	Sin individ				

Tomando como base el valor de los promedios anteriores y, utilizando a su vez la ecuación 6 del paso 6 de la metodología, se procede a establecer la pertenencia de los individuos clasificados en cada intervalo. Es así como, se muestran a continuación los resultados de los individuos con mayor pertenencia por intervalo:

Tabla 64. Pertenencia del individuo por intervalo (penalización por fracción defectuosa).

Número intervalo	1	2	3	4	5
Número Individuo	62	57	Cero individ	36	1
Valor pertenencia (%)	47,88	92,86	Cero individ	49,18	78,56

El método de obtención del valor de la pertenencia, corresponde al método de obtención ya descrito para el individuo uno de la variable tiempo de procesamiento.

A su vez, se aprecian a continuación los individuos por medio de los cuales se obtuvo el valor del radio, acompañados de sus respectivos valores del radio:

Tabla 65. Individuos con sus respectivos valores de radio (variable: Penalización por fracción defectuosa).

Número Intervalo	Número Individuo	Valor radio	Número Intervalo	Número Individuo	Valor radio
1	53	641,0619	4	20	497,4246
2	43	840,0012	5	3	1.322,7152
3	Cero Individuos	-			

5.1.2.2.4 Resumen de los individuos con mayor pertenencia.

El resumen de los individuos con mayor pertenencia, se ilustra considerando en primer término, la variable tiempo de procesamiento (en semanas), en segundo término la variable penalización por costo de mano de obra directa y, finalmente la variable penalización por fracción defectuosa.

- Resumen de los individuos con mayor pertenencia en cuanto a la variable: tiempo de procesamiento (en semanas).

Enseguida se muestra el resumen de los individuos con mayor pertenencia en cada intervalo para la variable tiempo de procesamiento.

Tabla 66. Pertenencia de los individuos para la variable tiempo de procesamiento.

Número Individuo	Valor Tiempo Individuo (semanas)	Número Intervalo	Valor pertenencia Individuo (%)	Valor Costo Individuo (puntos)	Número Intervalo	Valor pertenencia Individuo (%)	Valor Fracción Individuo (puntos)	Número Intervalo	Valor pertenencia Individuo (%)
1	0,9464	1	73,46	2.380	5	0,00	2.258	5	78,57
21	1,6875	2	57,97	525	2	77,89	1.816	4	45,27
41	2,6667	3	97,67	0	1	15,76	1.827	4	49,16
46	3,5893	4	85,41	825	3	1,69	1.399	1	23,42
54	4,1875	5	95,00	0	1	36,10	1.404	2	92,78

De acuerdo con la tabla anterior, se concluyen los siguientes aspectos:

➤ Si la empresa desea realizar entregas rápidas (intervalo número uno de la variable tiempo) debe programar su sistema de producción con el individuo número uno, lo cual consecuentemente generará alta penalización por costo mano de obra (intervalo número cinco de la variable costo) al igual que alta penalización por fracción defectuosa (intervalo número cinco de la variable fracción defectuosa).

Respecto al análisis anterior cabe aclarar que en cuanto a la variable costo, el individuo uno presenta baja pertenencia al intervalo correspondiente. Asimismo, su valor de penalización a nivel de la variable considerada (2380 puntos) es inferior al promedio del intervalo (2970 puntos), por lo cual se determina que el individuo uno se encuentra entre el intervalo cuatro (costo medio alto) y cinco (costo alto).

➤ Si la empresa debido a su entorno económico desea realizar entregas en un nivel medio bajo de tiempo (intervalo número dos de la variable tiempo), debe organizar su sistema de producción de acuerdo con los aspectos definidos para el individuo 21. Este individuo a su vez va a generar una penalización correspondiente a un nivel medio bajo de costos (intervalo 2) y asimismo, a un nivel medio alto de fracción defectuosa (intervalo 4).

➤ Si la empresa debido a su entorno económico desea realizar entregas con un nivel medio de rapidez (intervalo número tres de la variable tiempo), debe organizar su sistema de producción de acuerdo con los aspectos definidos para el individuo 41. Este individuo a su vez va a generar una penalización correspondiente a un nivel de costos bajo (intervalo 1) y asimismo, a un nivel medio alto de fracción defectuosa (intervalo 4).

Respecto a lo mencionado cabe expresar que en cuanto a la variable costo, el individuo 41 presenta baja pertenencia. Asimismo, su valor de penalización a nivel de la variable considerada (0 puntos) es igual al promedio del intervalo (0 puntos), por lo cual se establece que dicho individuo se encuentra efectivamente en el intervalo 1 del costo (nivel bajo).

➤ Si la empresa debido a su entorno económico desea realizar entregas con un nivel medio alto de tiempo, debe programar su sistema productivo de acuerdo con lo indicado por el individuo 46 (intervalo 4 de la variable tiempo). Este individuo a su vez va a generar una penalización correspondiente a un nivel medio de costos (intervalo 3) y asimismo, a un nivel bajo de fracción defectuosa (intervalo 1).

Respecto al análisis anterior cabe aclarar que en cuanto a la variable costo, el individuo 46 presenta baja pertenencia. Asimismo, su valor de penalización a nivel de la variable

considerada (825 puntos) es inferior al promedio del intervalo (933,8 puntos), por lo cual se determina que el individuo 46 se encuentra entre el intervalo dos (costo medio bajo) y tres (costo medio).

➤ Si la empresa debido a su entorno económico desea realizar entregas con un nivel de tiempo alto, debe programar su sistema productivo de acuerdo con lo indicado por el individuo 54 (intervalo 5 de la variable tiempo). Este individuo a su vez generará una penalización correspondiente a un nivel bajo de costos (intervalo 1) y asimismo, a un nivel medio bajo de fracción defectuosa (intervalo 2).

- Resumen de los individuos con mayor pertenencia en cuanto a la variable: Penalización por costo de mano de obra directa.

A continuación se muestra el resumen de los individuos con mayor pertenencia en cada intervalo para la variable penalización por costos de mano de obra directa.

Tabla 67. Pertenencia de los individuos para la variable penalización por costos de mano de obra directa.

Número Individuo	Valor Tiempo Individuo (semanas)	Número Intervalo	Valor pertenencia Individuo (%)	Valor Costo Individuo (puntos)	Número Intervalo	Valor pertenencia Individuo (%)	Valor Fracción Individuo (puntos)	Número Intervalo	Valor pertenencia Individuo (%)
64	5,0417	5	94,62	0	1	43,10	1.424	2	92,73
21	1,6875	2	57,97	525	2	77,89	1.816	4	45,27
22	1,7054	2	0,03	750	3	60,92	1.815	4	0,04
9	1,2857	1	31,15	2.980	5	98,05	2.236	5	33,27

De acuerdo con la tabla anterior, se concluyen los siguientes aspectos:

➤ Si la empresa desea realizar un estricto control a los costos de producción por mano de obra directa, debe programar su sistema productivo de acuerdo con lo indicado por el individuo 64 (intervalo 1 de la variable costo). Este individuo a su vez va a generar un tiempo alto de fabricación (intervalo cinco) y una penalización por fracción defectuosa que se ubica en el nivel medio bajo (intervalo dos).

➤ Si la empresa desea realizar un control significativo a los costos de producción por mano de obra directa, debe programar su sistema productivo de acuerdo con lo indicado por el individuo 21 (intervalo 2 de la variable costo). Este individuo a su vez va a generar un tiempo de procesamiento medio bajo (intervalo dos) al igual que un nivel medio alto de fracción defectuosa (intervalo 4).

Los intervalos medio, medio alto y alto de la variable penalización por costo de mano de obra directa no se analizan, debido a que se interpretan como una consecuencia de organizar el sistema productivo para atender la demanda de mercado. Al respecto, no es procedente expresar que la compañía desea generar costos de mano de obra directa de tipo: medio, medio alto o alto.

- Resumen de los individuos con mayor pertenencia en cuanto a la variable: Penalización por fracción defectuosa debido a la fatiga del operario.

A continuación se muestra el resumen de los individuos con mayor pertenencia en cada intervalo, para la variable penalización por fracción defectuosa debido a la fatiga del operario.

Tabla 68. Pertenencia de los individuos para la variable penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario.

Número Individuo	Valor Tiempo Individuo (semanas)	Número Intervalo	Valor pertenencia Individuo (%)	Valor Costo Individuo (puntos)	Número Intervalo	Valor pertenencia Individuo (%)	Valor Fracción Individuo (puntos)	Número Intervalo	Valor pertenencia Individuo (%)
62	4,7500	5	94,85	0	1	32,60	1.394	1	47,88
57	4,2292	5	94,94	0	1	39,25	1.413	2	92,86
36	2,3333	3	79,54	0	1	18,56	1.819	4	49,18
1	0,9464	1	73,46	2.380	5	0.00	2.258	5	78,57

De acuerdo con la tabla anterior, se concluyen los siguientes aspectos:

➤ Si la empresa desea generar un nivel mínimo de defectuosos en el proceso de fabricación como consecuencia de la fatiga del operario, debe programar su sistema productivo de acuerdo con lo indicado por el individuo 62 (intervalo 1 de la variable fracción defectuosa). A este individuo le corresponde un alto nivel de tiempo de procesamiento (intervalo cinco) al igual que un bajo nivel de penalización por costo de mano de obra (intervalo 1).

Respecto a lo mencionado cabe manifestar que en cuanto a la variable costo, el individuo 62 presenta baja pertenencia. Asimismo, su valor de penalización a nivel de la variable considerada (0 puntos) es igual al promedio del intervalo (0 puntos), por lo cual se establece que dicho individuo se encuentra efectivamente en el intervalo 1 del costo (nivel bajo).

➤ Si la empresa desea generar un nivel medio bajo de defectuosos en el proceso de fabricación como consecuencia de la fatiga del operario, debe programar su sistema productivo de acuerdo con lo indicado por el individuo 57 (intervalo 2 de la variable fracción defectuosa). A este individuo le corresponde un alto nivel de tiempo de procesamiento (intervalo cinco) al igual que un bajo nivel de penalización por costo de mano de obra (intervalo 1).

Respecto a lo mencionado es necesario afirmar que en cuanto a la variable costo, el individuo 57 presenta baja pertenencia. Asimismo, su valor de penalización a nivel de la variable considerada (0 puntos) es igual al promedio del intervalo (0 puntos), por lo cual se establece que dicho individuo se encuentra efectivamente en el intervalo 1 del costo (nivel bajo).

Al igual que en la variable penalización por costo de mano de obra directa, en este caso los intervalos medio, medio alto y alto de la variable penalización por fracción defectuosa no se analizan, debido a que se interpretan como una consecuencia de organizar el sistema productivo para atender la demanda de mercado. Al respecto, no es procedente expresar que la compañía desea generar un nivel de fracción defectuosa de tipo: medio, medio alto o alto.

5.2 Análisis método dos (método híbrido entre algoritmos genéticos y sumas ponderadas).

Al aplicar a la situación planteada en la experimentación (numeral 2.3.2), los aspectos descritos en la metodología (método dos), se obtienen los siguientes resultados:

5.2.1 Pasos 7 a 10: Identificación de la población final de respuesta después de aplicar el respectivo procedimiento.

En la tabla 69 se muestra el resumen de resultados correspondiente a la población final de respuesta, la cual se obtuvo después de aplicar las diferentes fases del método dos. De esta forma, el resumen presenta los siguientes elementos: aquellos individuos que se referencian en etapas posteriores del proyecto y, a su vez el valor de los parámetros

utilizados para establecer el comportamiento de la mencionada población (promedio, desviación estándar y coeficiente de variación).

Tabla 69. Resumen de la población resultado (método dos).

Número Individuo	Tiempo Proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)	Valor Ponderado (%)
1	181	16	6	1,8854	0	1.809	66,6667
2	182	16	6	1,8958	0	1.807	66,7036
3	198	16	6	2,0625	0	1.777	67,1436
7	170	8	6	3,5417	0	1.409	78,7566
10	181	8	6	3,7708	0	1.397	77,1457
19	186	8	6	3,8750	0	1.388	76,6820
20	187	8	6	3,8958	0	1.424	73,7257
22	187	8	6	3,8958	0	1.403	75,3166
24	187	8	6	3,8958	0	1.385	76,6802
35	191	8	6	3,9792	0	1.418	73,2638
36	191	8	6	3,9792	0	1.396	74,9305
43	192	8	6	4,0000	0	1.396	74,7014
44	192	8	6	4,0000	0	1.395	74,7772
46	193	8	6	4,0208	0	1.413	73,1844
48	194	8	6	4,0417	0	1.399	74,0159
49	195	8	6	4,0625	0	1.407	73,1808
52	196	8	6	4,0833	0	1.412	72,5729

Continuación tabla 69.

Número Individuo	Tiempo Proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)	Valor Ponderado (%)
53	196	8	6	4,0833	0	1.410	72,7244
54	196	8	6	4,0833	0	1.405	73,1032
57	197	8	6	4,1042	0	1.408	72,6468
62	198	8	6	4,1250	0	1.409	72,3420
63	198	8	6	4,1250	0	1.408	72,4177
64	198	8	6	4,1250	0	1.407	72,4935
65	198	8	6	4,1250	0	1.400	73,0238
70	199	8	6	4,1458	0	1.421	71,2038
101	204	8	6	4,2500	0	1.369	73,9977
120	207	8	6	4,3125	0	1.388	71,8710
140	213	8	6	4,4375	0	1.402	69,4359
180	220	8	6	4,5833	0	1.395	68,3625
200	229	8	6	4,7708	0	1.422	64,2552
210	236	8	6	4,9167	0	1.400	64,3182
Promedio	205,9048			4,2317	0	1.415,4	70,6838
Desviación estándar	13,4634			0,4685	0	65,5427	3,1917
Coefficiente Variación	0,0654			0,1107	0/0	0,0463	0,0452

En la tabla 88 del anexo 5, se presenta integralmente la población final que se obtuvo por medio de la aplicación del método uno.

5.2.2 Paso 6. Sistematización de la información.

En este paso se obtienen los siguientes aspectos: la cantidad de individuos por frente, la conformación de los intervalos correspondientes al primer frente y la sistematización de los individuos. De esta forma, se presenta en primer término la cantidad de individuos por frente mientras que posteriormente, se muestra de manera unificada los otros aspectos nombrados.

5.2.2.1 Cantidad de individuos por frente a partir de la información registrada en la tabla 69.

A partir de la información registrada en la tabla 69 (método dos) y de acuerdo con lo establecido en el paso 4 de la metodología, se debe obtener la clasificación general por frentes. Con relación a lo mencionado, se expresa que al analizar la estructura de los frentes en la población final de respuesta, se identifica la existencia de un solo frente, el cual está integrado por 210 individuos.

5.2.2.2 Conformación de los intervalos correspondientes al primer frente y sistematización de los individuos como datos agrupados.

El análisis del único frente, se realizará a través de la sistematización por datos agrupados para cada una de las tres variables. De esta manera, se utilizarán los intervalos ya establecidos en el método uno (ver tablas 51, 56 y 61).

- Análisis de los datos correspondientes al primer frente tomando como criterio de clasificación la variable: tiempo de procesamiento en semanas.

En la siguiente tabla, se muestra la sistematización por datos agrupados correspondiente a la población obtenida al aplicar el método dos. Se considera en este caso como criterio de clasificación el tiempo de procesamiento:

Tabla 70. Distribución de los individuos del frente uno por intervalos (tiempo de procesamiento en semanas – método dos).

Límite inferior (semanas)	Límite superior (semanas)	Números de individuos en el intervalo	Frecuencia	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia absoluta (%)
0,94	1,5	0	0	0	0
1,5	2,2	1 al 6	6	2,86	2,86
2,2	3,0	0	0	0	2,86
3,0	3,9	7 al 24	18	8,57	11,43
3,9	5,2	25 al 210	186	88,57	100
Total			210	100	

- Análisis de los datos correspondientes al primer frente tomando como criterio de clasificación la variable: penalización por costo de mano de obra directa.

Al respecto se comenta que a la totalidad de individuos provenientes del método dos, se les asignó una penalización de cero puntos. Debido a lo anterior, los 210 individuos clasifican en este caso en el intervalo número uno, cuyos límites tanto inferior como superior presentan un valor de “cero puntos” para la variable bajo análisis.

- Análisis de los datos correspondientes al primer frente tomando como criterio de clasificación la variable: penalización por fracción defectuosa generada por la fatiga del operario.

En la siguiente tabla, se muestra la sistematización por datos agrupados de la población obtenida al aplicar el método dos. Se considera en este caso como criterio de clasificación la variable penalización por fracción defectuosa.

Tabla 71. Distribución de los individuos del frente uno por intervalos (penalización por fracción defectuosa – método dos).

Límite inferior (Puntos)	Límite superior (Puntos)	Números de individuos en el intervalo	Frecuencia	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia absoluta (%)
1.380	1.400	101, 12, ..., 23, 44, ... 208, 210.	77	36,66	36,66
1.400	1.550	96, 80, ..., 47, 53, ... 144, 102.	127	60,47	97,13
1.550	1.700	0	0	0	97,13
1.700	1.900	5, 3, ... 2, 1.	6	2,87	100
1.900	2.258	0	0	0	100
Total			210	100	

En la tabla anterior, el orden en el cual se listan los individuos en la columna: Números de individuos, es ascendente, es decir, se inicia con el individuo que presenta menor valor de penalización y va aumentado hasta el individuo que muestra el mayor valor de penalización.

5.3 Paso 11. Comparación de métodos.

Al aplicar a la situación planteada en la experimentación (numeral 2.3.2), los aspectos descritos en la metodología (comparación de métodos), se obtienen los siguientes resultados:

5.3.1 Comparación de los parámetros arrojados por los métodos.

Se presentan enseguida los parámetros (promedio, desviación estándar, coeficiente de variación), al igual que los valores mínimos y máximos arrojados por cada método.

Tabla 72. Comparación de los parámetros arrojados por los métodos uno y dos.

Variables	Método uno				Método dos			
	Tiempo Proceso (horas)	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costos mano obra	Penalización Fracción defectuosa	Tiempo proceso (horas)	Tiempo de Proceso (semanas)	Penalización costos mano obra	Penalización fracción defectuosa
Promedio	212.0619	2.0377	1284.3333	1955.9810	205.9048	4.2317	0	1415.4000
Desviación Estándar	20.7254	1.0366	1168.1081	306.9532	13.4634	0.4685	0	65.5427
Coficiente Variación	0.0977	0.5087	0.9095	0.1569	0.0654	0.1107	0/0	0.0463
Mínimo	159	0.9464	0	1380	170	1.8854	0	1369
Máximo	276	5.1458	3570	2326	236	4.9167	0	1809

Al evaluar la tabla anterior, se determina que los valores tomados por la desviación estándar, por el coeficiente de variación y por los valores máximos, son mayores al comparar el “método uno” respecto al “método dos”. Con base en lo expuesto, se establece que el primer método identifica con mayor certeza la variabilidad inherente a las variables analizadas. Con relación a lo anterior se aprecia que:

- El coeficiente de variación del método uno supera al coeficiente de variación del método dos, así: en 49,38 % en cuanto a la variable tiempo de proceso (en horas), en 359,5 % en cuanto a la variable tiempo de proceso (en semanas) y en 238,9 % en cuanto a la variable penalización por fracción defectuosa causada por la fatiga del operario
- En cuanto a la variable penalización por costo de mano de obra directa, el coeficiente de variación del método uno es de 90,95 %, mientras que el coeficiente de variación del método dos, no muestra ninguna evidencia de cambio (0/0).

5.3.2 Comparación de los individuos de mínimo valor para las variables analizadas.

A continuación se muestra la comparación entre los métodos uno y dos, considerando en cada caso, aquellos individuos que arrojan el comportamiento de mínimo valor para las variables de interés.

Tabla 73. Comparación de métodos considerando los individuos de mínimo valor.

Método	Número individuo	Variable asociada al individuo Número	Tiempo de proceso (horas)	Tiempo de proceso (semanas)	Penalización costo de mano de obra (puntos)	Penalización fracción defectuosa (puntos)
Método uno	1	Mínimo tiempo	159	0,9464	2.380	2.258
	64	Mínimo Costo	242	5,0417	0	1.424
	53	Mínima Fracción	234	4,1786	975	1.380
Método dos	1	Mínimo tiempo	181	1,8854	0	1.809
	70	Mínimo Costo	199	4,1458	0	1.421
	101	Mínima Fracción	204	4,25	0	1.369

De acuerdo con lo observado en la tabla anterior, al comparar el método uno con el método dos, se evidencia el siguiente comportamiento:

Tabla 74. Comparación porcentual de los individuos de mínimo valor.

Variable comparada	Individuos comparados del método uno y del método dos.	Tiempo Proceso (horas)	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costos de mano de obra (puntos)	Penalización fracción defectuosa (puntos)
Mínimo Tiempo de proceso (semanas)	1 (método 1) y 1 (método 2)	El método 1 presenta un tiempo inferior en 13,83 % al compararlo con el método dos.	El método 1 presenta un tiempo inferior en 99,21 % al compararlo con el método dos.	El método 1 supera al método 2 en 2.380 puntos.	El método 2 presenta una penalización inferior en 24,82 % al compararlo con el método 1.
Mínimo costo de mano de obra (puntos)	64 (método 1) y 70 (método 2)	El método 2 presenta un tiempo inferior en 21,61 % al compararlo con el método uno.	El método 2 presenta un tiempo inferior en 21,61 % al compararlo con el método uno.	Ambos métodos presentan igual desempeño.	El método 2 presenta una penalización inferior en 0,21 % al compararlo con el método 1.
Mínima fracción defectuosa (puntos)	53 (método 1) y 101 (método 2)	El método 2 presenta un tiempo inferior en 14,71 % al compararlo con el método uno.	El método 1 presenta un tiempo inferior en 1,71 % al compararlo con el método dos.	El método 1 supera al método 2 en 975 puntos.	El método 2 presenta una penalización inferior en 0,8 % al compararlo con el método 1.

Respecto a la tabla anterior, se efectúan los siguientes comentarios:

- El individuo de mínimo costo proveniente del método 1 (individuo 64), corresponde al individuo que presenta el mayor valor de pertenencia al primer intervalo de la variable “penalización por costo de mano de obra directa”. La anterior aclaración se realiza, debido a que el individuo 64 comparte con otros individuos del primer intervalo, el mismo valor de penalización por costo de mano de obra directa.
- El individuo de mínimo costo proveniente del método 2 (individuo 70), corresponde al individuo que presenta la mayor cercanía al valor ponderado promedio dentro de un conjunto de individuos. Este conjunto de individuos comparte el mismo valor en cuanto a la penalización por costo de mano de obra directa (cero puntos). Al respecto, es necesario anotar que la totalidad de individuos arrojados como respuesta por el método dos, muestran una penalización por costo de mano de obra directa de cero puntos.

Es así como, se ilustra enseguida el valor de la cercanía para el individuo 70 (métodos dos). Para este efecto, se utilizan los lineamientos definidos en el paso 7 de la metodología:

Valor ponderado del individuo 70 : 0,7120379

Valor ponderado promedio de grupo: 0,7124236

Valor cercanía del individuo 70 : 0,0003857

- Al comparar los individuos provenientes de ambos métodos cuyos valores de tiempo de procesamiento (en semanas) son los menores detectados, se encuentra que el individuo procedente del método dos (individuo número 1), supera en desempeño al individuo procedente del método uno (individuo número 1), en cuanto al comportamiento de las variables penalización por costo de mano de obra directa al igual que penalización por fracción defectuosa. Lo anterior sucede debido a que el método dos, no está en capacidad de reconocer como mejores individuos, las soluciones relacionadas con la programación de las operaciones durante 24 horas al día, 7 días a la semana. De esta manera, se concluye que el método dos limita el campo global de soluciones.

También se expresa que bajo el método uno se obtiene como una solución posible el individuo 19; este individuo muestra el siguiente comportamiento: 159 horas – 1,6563 semanas – 0 puntos por penalización en costos de mano de obra y 1819 puntos por penalización en cuanto a fracción defectuosa. El anterior comportamiento es similar al comportamiento del individuo uno del método dos. Dado el caso de suponer que el individuo 19 del método uno haga parte de la población estructurada a partir de la aplicación del método dos, se encontraría que su valor de ponderación es de 66,66 %, valor que supera el valor ponderado de 64,323 % correspondiente al individuo 1 (método dos).

- A pesar de que al comparar los individuos de mínimo valor de penalización por costo de mano de obra directa provenientes de ambos métodos (individuo 64 – método 1- e individuo 70 - método 2 -), se podría concluir que el método 2 supera al método uno, cabe aclarar que ningún individuo del método 2 identifica los valores extremos detectados por el individuo 64 del método 1. La característica relacionada con la detección de diversos valores propia del método uno, se ratifica al evaluar el individuo 52 proveniente de este método. El individuo 52 presenta valores similares (198 horas, 4.125 semanas, 0 puntos por penalización de mano de obra y 1400 puntos por penalización de fracción defectuosa), pero de mejor desempeño que aquellos establecidos en el individuo 70 del método dos. De igual manera, al considerar el supuesto de que el individuo 52 del método

uno hace parte de la población final de respuesta del método dos, se establece que su valor ponderado es de 73,023 %, es decir, muestra mejor comportamiento que el valor ponderado correspondiente al individuo 70 del método dos (71,204 %).

- En cuanto a la comparación de los individuos de valor mínimo correspondientes a la variable penalización por fracción defectuosa provenientes de ambos métodos (individuo 53 – método 1 – e individuo 101 – método 2 -), se aclara que si bien el método dos supera el desempeño del método uno, el método dos como ya se había mencionado no permite detectar valores extremos de las soluciones como si lo hace el método uno. A su vez, se comenta que el individuo 49 del método uno (189 horas – 3,9375 semanas – 0 puntos por penalización de mano de obra y 1.388 puntos por penalización de fracción defectuosa) presenta un comportamiento similar al individuo 101 del método dos y, en caso de suponer que el individuo considerado fuera una de las soluciones encontradas al aplicar el método dos, su valor ponderado sería de 75,99 %, el cual supera el valor ponderado del individuo 101 del método dos (73,99%).

5.3.3 Comparación del “método 1” respecto al individuo con mayor ponderación obtenido a través de la aplicación del “método 2”.

A continuación se presenta el individuo con mayor valor de ponderación obtenido por medio de la aplicación del “método dos”.

Tabla 75. Individuo con mayor valor de ponderación obtenido por el método dos.

Número Individuo	Tiempo de proceso (horas)	Tiempo de proceso (semanas)	Penalización Costo de mano de obra (puntos)	Penalización fracción defectuosa (puntos)	Factor Ponderado (%)
7	170	3,542	0	1.409	78,76

Al comparar el anterior individuo con los individuos de valor mínimo provenientes del método uno se encuentra que:

Tabla 76. Comparación de los individuos del método 1 con el individuo de mayor ponderación del método 2.

Variable comparada	Individuo tomado del método uno	Tiempo Proceso (horas)	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costo de mano de obra (puntos)	Penalización fracción defectuosa (puntos)
Mínimo Tiempo de proceso (semanas)	1	El método uno presenta un tiempo inferior en 6,92 % al compararlo con el método dos.	El método uno presenta un tiempo inferior en 274,26 % al compararlo con el método dos.	El método dos presenta una penalización inferior en 2380 puntos al compararlo con el método uno.	El método dos presenta una penalización inferior en 60,25 % al compararlo con el método uno.
Mínimo costo mano de obra directa (puntos)	64	El método dos presenta un tiempo inferior en 42,35 % al compararlo con el método uno.	El método dos presenta un tiempo inferior en 42,34 % al compararlo con el método uno.	Ambos métodos presentan igual desempeño.	El método dos presenta una penalización inferior en 1,065 % al compararla con el método uno.
Mínima Fracción defectuosa (puntos)	53	El método dos presenta un tiempo inferior en 37,65 % al compararlo con el método uno.	El método dos presenta un tiempo inferior en 17,97 % al compararlo con el método uno.	El método dos presenta una penalización inferior en 975 puntos al compararlo con el método uno.	El método uno presenta una penalización inferior en 2,1 % al compararla con el método dos.

De acuerdo con la tabla anterior, se observa que el método uno al compararlo con el método dos, presenta solamente mejor desempeño en algunas variables; sin embargo, al analizar de manera integral los individuos provenientes del método uno, se determina el siguiente comportamiento por variable en el individuo número 44:

Tabla 77. Individuo del método uno de similar comportamiento al individuo de mayor valor ponderado del método dos.

Número Individuo (método uno)	Tiempo de proceso (horas)	Tiempo de proceso (semanas)	Penalización por costo de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)
44	159	3,3125	0	1.411

Respecto a la tabla 77 al comparar el individuo 44 del método uno con el individuo número 7 del método dos, se encuentra que: el tiempo de proceso (en horas) del primero es inferior al tiempo de proceso (en horas) del segundo en 6,91 %, el tiempo de proceso (en semanas) del primero es inferior al tiempo de proceso (en semanas) del segundo en 6,92 %, no presentan diferencia en el comportamiento de la variable penalización por costos de mano de obra directa y en cuanto al comportamiento de la variable penalización por fracción defectuosa, la penalización del segundo es inferior a la penalización del primero en 0,14 %. A su vez, cuando se realiza el supuesto de considerar que el individuo 44 hace parte también de la población final de respuesta del método dos, se establece que su valor ponderado es de 81,12 %, es decir, muestra mejor comportamiento que el valor ponderado correspondiente al individuo 7 del método dos.

De manera complementaria, se insiste en que el método 2 no está en capacidad de identificar los valores extremos detectados por el método uno; este es el caso del individuo 64 proveniente del método uno, para el cual los valores obtenidos en las variables: tiempo de proceso (en horas y en semanas), no se encuentran en el conjunto de resultados arrojados por el método dos.

5.3.4 Comparación del número de frentes encontrados al aplicar cada método.

Para realizar la comparación del número de frentes encontrados al aplicar cada método, se presentarán en primera instancia los frentes identificados por medio de la aplicación del método uno, en segunda instancia se presentarán los frentes identificados por medio de la aplicación del método dos y, por último se establecerá la respectiva conclusión.

- Presentación porcentual de los individuos por frente en el método uno.

Enseguida se presenta la distribución porcentual de los 210 individuos en los diversos frentes que fueron generados por medio de la aplicación del método uno.

Tabla 78. Distribución porcentual de individuos por frente (método uno).

Número Frente	Distribución Porcentual (%)	Número Frente	Distribución Porcentual (%)	Número Frente	Distribución Porcentual (%)	Número Frente	Distribución Porcentual (%)
1	32,38	10	0,95	20	0,4	33	0,4
2	13,80	11	3,33	21	0,4	34	0,4
3	11,90	12	0,95	24	1,43	35	0,4
4	5,23	13	0,95	25	1,9	37	0,4
5	6,19	14	0,4	26	0,4	62	0,4
6	3,33	15	1,9	27	0,4		
7	4,29	16	0,4	28	0,4		
8	0,95	17	0,95	30	0,4		
9	2,38	19	0,4	32	0,4		

- Presentación porcentual de los individuos por frente en el método dos.

Respecto al método dos, se comenta que solo se identifica un frente, el cual agrupa el 100 % de los datos.

Al comparar este comportamiento con el contenido de la tabla anterior, se establece que el método uno supera el desempeño del método dos, debido a los siguientes hechos: identifica 32 niveles, concentra el 32,28 % de los individuos en el primer frente, obtiene una participación porcentual promedio de individuos por frente de 3,12 %, establece 0,4

% como menor valor de participación porcentual de individuos por frente y por último, asigna el 80,45 % de los individuos a los nueve primeros frentes.

5.3.5 Comparación de los individuos por intervalo en el frente uno.

Al evaluar las tablas 52, 57 y 62, se observa que los individuos del frente uno, obtenidos por medio de la aplicación del método uno, se distribuyen de forma aleatoria en los diferentes intervalos que representan el comportamiento de cada una de las variables, exceptuando los siguientes casos:

- No se cuenta con individuos en el intervalo número cuatro de la variable penalización por costo de mano de obra directa (nivel medio alto de la variable costo de mano de obra).
- No se cuenta con individuos en el intervalo número tres de la variable penalización por fracción defectuosa (nivel medio de la variable penalización por fracción defectuosa).

Asimismo, al evaluar las tablas 70 y 71, se observa que los individuos del frente uno, obtenidos por medio de la aplicación del método dos:

- No tienen ninguna representación en el primer intervalo de la variable tiempo de procesamiento (entregas rápidas o tiempo de procesamiento bajo).
- Se concentran en 88,8 % en el intervalo número cinco de la variable tiempo de procesamiento (entregas tardías o tiempo de procesamiento alto).
- Se concentran en el 100 % de los casos, en el intervalo número uno de la variable penalización por costos de mano de obra directa (control estricto de costos o bajo costo de mano de obra directa).
- Se concentran respectivamente en 36,66 % y en 60,47 % en los intervalos número 1 y número 2 de la variable penalización por fracción defectuosa (nivel bajo y medio bajo de la fracción defectuosa).
- No tienen ninguna representación en los intervalos número 3 y número 5 de la variable penalización por fracción defectuosa (niveles medio y alto de la fracción defectuosa).

De acuerdo con lo anterior, se establece que el método uno supera el desempeño del método dos, debido a que el primero explora una mayor variedad de contextos de

decisión, mientras que el segundo prioriza la reducción tanto del costo de mano de obra como de la fracción defectuosa, lo cual genera a su vez tiempos de proceso significativamente altos.

5.4 Otros elementos relacionados con el método uno.

Al aplicar a la situación planteada en la experimentación (numeral 2.3.2), los aspectos descritos en la metodología (otros aspectos relacionados con el método uno), se obtienen los siguientes resultados:

5.4.1 Paso 12. Análisis estadístico de los datos y Caracterización del individuo de menor tiempo de procesamiento.

Para este caso, se obtiene en primer término el análisis de varianza, con el fin de evaluar la estabilidad estadística de los datos. Una vez, se comprueba que los datos arrojados por el programa son estadísticamente iguales, se procede a caracterizar el individuo con menor tiempo de procesamiento (en horas).

5.4.1.1 Análisis de varianza:

Para evaluar la estabilidad estadística de los datos, se revisó en primera instancia el comportamiento normal de los residuales del error. Con este propósito, se procedió de la siguiente manera:

- Se agruparon en tres tratamientos los datos correspondientes a 45 poblaciones. De esta forma, en cada tratamiento se asignan quince poblaciones. Cada población está compuesta por "Q" individuos. De acuerdo con lo anterior, a cada tratamiento le corresponden $15 \times Q$ individuos.
- Se obtiene el promedio del total de datos que integran las 45 poblaciones, es decir, se obtiene el promedio de $45 \times Q$ individuos.
- Se establece la diferencia del promedio de los $45 \times Q$ individuos respecto al valor tomado por cada uno de los individuos. Estos valores constituyen los residuales a ser analizados.

- Se determina la estadística descriptiva para los anteriores residuales, obteniéndose entre otros parámetros el coeficiente de asimetría y la curtosis. Para este efecto, los valores calculados respectivamente son:
0,30289567 y 0,44400891 (Variable tiempo de procesamiento en horas).
0,32341985 y 0,38500891 (Variable tiempo de procesamiento en semanas).
0,29638722 y 0,49523651 (Variable penalización por costo de mano de obra).
0,26647639 y 0,52365135 (Variable penalización por fracción defectuosa).
- Se determina el valor de la prueba de Jarque-Bera a partir de los valores de coeficiente de asimetría y de curtosis establecidos en el punto anterior. El valor calculado para la prueba de Jarquebera en este caso es:
4,9361118 (Variable tiempo de procesamiento en horas).
4,9580427 (Variable tiempo de procesamiento en semanas).
5,2206064 (Variable penalización por costo de mano de obra).
4,8846822 (Variable penalización por fracción defectuosa).
- Se determina el valor de la probabilidad de la prueba chi cuadrado a partir del valor de la prueba de Jarque-Bera para dos grados de libertad (coeficiente de asimetría y curtosis). Es así como se establece que el valor de la prueba chi cuadrado es:
8,48 % (Variable tiempo de procesamiento en horas).
8,38 % (Variable tiempo de procesamiento en semanas).
7,35 % (Variable penalización por costo de mano de obra).
8,69 % (Variable penalización por fracción defectuosa).
- Se compara el valor de la prueba chi cuadrado con un valor de 5 %. De esta manera, se determina que el comportamiento de los residuales del error se ajustan a comportamiento normal, dado que el valor de la prueba chi cuadrado sea superior a 5 %. A partir de lo expuesto, se establece que efectivamente los residuales del error se ajustan a comportamiento normal, los valores de las pruebas chi cuadrado para las cuatro variables son superiores a 5 %.

Una vez se comprueba que los residuales del error se ajustan a comportamiento normal, se procede a realizar el análisis de varianza, utilizando para el efecto un nivel de confianza de 95 %. Con este propósito, se tomaron los valores promedio de las 45 poblaciones para las diferentes variables de interés.

De acuerdo con lo anterior, a continuación se presenta por cada variable la síntesis de resultados, mientras que con posterioridad se ilustra la respectiva conclusión general.

- Variable Tiempo de procesamiento en horas:

Enseguida se aprecia la información base correspondiente para tres tratamientos con 15 repeticiones en cada tratamiento:

Tabla 79. Datos base: tiempo de procesamiento (en horas).

Repeticiones	Tratamiento uno	Tratamiento dos	Tratamiento tres
1	210,3857	210,4476	212,2714
2	210,7143	211,4810	210,6429
3	211,5190	210,6857	212,1667
4	212,6857	213,1952	211,9333
5	209,8667	210,6048	210,8619
6	208,2238	211,9714	212,0619
7	212,4286	212,0476	209,9952
8	210,8524	209,9905	210,2952
9	211,0619	211,0333	211,7714
10	212,0143	212,0810	211,5476
11	210,8524	209,7571	211,5095
12	213,2857	211,1381	210,1952
13	212,0905	212,9667	210,5000
14	211,8857	211,1905	209,6714
15	210,3143	213,0667	212,2238
Suma	3.168,1810	3.171,6571	3.167,6476
Promedio	211,2121	211,4438	211,1765
Varianza	1,6195	1,1875	0,8198

A continuación se observa la información correspondiente al análisis de varianza:

Tabla 80. Análisis de varianza para la variable tiempo de proceso (en horas).

Origen de la Variación	Suma cuadrados	Grados Libertad	Promedio cuadrados	F	P	F crítico
Entre grupos	0,6321	2	0,3161	0,2614	0,7712	3,2199
Dentro de grupos	50,7743	42	1,2089			
Total	51,4064	44				

- Variable: Tiempo de procesamiento (en semanas)

Enseguida se aprecia la información base correspondiente para tres tratamientos con 15 repeticiones en cada tratamiento:

Tabla 81. Datos base: tiempo de procesamiento (en semanas)

Repeticiones	Tratamiento uno	Tratamiento dos	Tratamiento tres
1	2,0113	1,9599	1,9640
2	2,0277	2,0410	1,9114
3	1,9718	2,0347	1,9573
4	2,0897	1,9385	2,0222
5	2,0176	2,0668	2,0465
6	1,9627	2,0882	2,0377
7	1,9630	2,1200	1,9796
8	1,9748	2,0109	2,1105
9	1,9884	2,0896	2,0902
10	2,0903	1,9894	2,0315
11	2,0699	1,9982	2,0953
12	2,1287	2,1778	1,9663
13	2,1743	1,9407	2,0122
14	2,0834	1,9425	1,9653
15	2,0854	2,0641	2,1361
Suma	30,6392	30,4624	30,3263
Promedio	2,0426	2,0308	2,0218
Varianza	0,0043	0,0051	0,0043

A continuación se observa la información correspondiente al análisis de varianza:

Tabla 82. Análisis de varianza para la variable tiempo de proceso (en semanas).

Origen de la Variación	Suma cuadrados	Grados libertad	Promedio cuadrados	F	P	F crítico
Entre grupos	0,003280	2	0,001640	0,359009	0,7005	3,2199
Dentro de grupos	0,191890	42	0,004569			
Total	0,195170	44				

- Variable: Penalización por costo de mano de obra directa.

Enseguida se aprecia la información base correspondiente para tres tratamientos con 15 repeticiones en cada tratamiento:

Tabla 83. Datos base: costo de mano de obra directa.

Repeticiones	Tratamiento uno	Tratamiento dos	Tratamiento tres
1	1.224,40	1.266,86	1.395,81
2	1.252,79	1.259,86	1.250,31
3	1.164,07	1.198,10	1.261,10
4	1.193,40	1.264,71	1.207,29
5	1.293,76	1.246,86	1.249,26
6	1.189,10	1.187,02	1.284,33
7	1.333,21	1.190,74	1.298,74
8	1.400,40	1.183,79	1.122,98
9	1.118,98	1.223,86	1.190,81
10	1.144,74	1.294,55	1.182,95
11	1.239,14	1.270,36	1.267,52
12	985,21	1.223,14	1.154,45
13	1.182,05	1.287,17	1.208,83
14	1.143,76	1.124,60	1.138,48
15	1.213,40	1.269,93	1.204,00
Suma	18.078,43	18.491,52	18.416,86
Promedio	1.205,23	1.232,77	1.227,79
Varianza	9.433,79	2.287,05	4.941,61

A continuación se observa la información correspondiente al análisis de varianza:

Tabla 84. Análisis de varianza costo de mano de obra directa.

Origen de la Variación	Suma cuadrados	Grados libertad	Promedio cuadrados	F	P	F crítico
Entre grupos	6.461,26	2	3.230,63	0,5817	0,5634	3,2199
Dentro de grupos	23.3274,2	42	5.554,15			
Total	23.9735,5	44				

- Variable: Penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario: Enseguida se aprecia la información base correspondiente para tres tratamientos con 15 repeticiones en cada tratamiento:

Tabla 85. Datos base: análisis de varianza en fracción defectuosa.

Repeticiones	Tratamiento uno	Tratamiento dos	Tratamiento tres
1	1.960,18	1.980,04	1.980,98
2	1.943,20	1.953,58	1.983,61
3	1.978,51	1.953,45	1.969,45
4	1.954,97	1.984,80	1.969,38

Tabla 85. Datos base: análisis de varianza en fracción defectuosa.(cont)

Repeticiones	Tratamiento uno	Tratamiento dos	Tratamiento tres
5	1.952,91	1.941,69	1.962,24
6	1.958,07	1.940,84	1.955,98
7	1.990,78	1.928,65	1.967,75
8	1.979,17	1.955,67	1.945,68
9	1.964,47	1.937,87	1.934,50
10	1.932,20	1.964,79	1.970,46
11	1.946,09	1.974,63	1.934,60
12	1.915,73	1.899,46	1.974,74
13	1.930,63	1.974,00	1.956,38
14	1.947,54	1.994,81	1.963,25
15	1.935,34	1.944,20	1.924,70
Suma	29.289,80	29.328,48	29.393,69
Promedio	1.952,65	1.955,23	1.959,58
Varianza	412,92	608,00	310,75

A continuación se observa la información correspondiente al análisis de varianza:

Tabla 86. Análisis de varianza para la variable fracción defectuosa.

Origen de la Variación	Suma cuadrados	Grados libertad	Promedio cuadrados	F	P	F crítico
Entre grupos	367,57	2	183,7847	0,4140	0,6636	3,2199
Dentro de grupos	18.643,32	42	443,8887			
Total	19.010,89	44				

- Conclusión general del análisis de varianza:

Del análisis de varianza presentado en la tablas 80, 82, 84 y 86, se aprecia que el valor de la distribución F establecida con el siguiente nivel alfa y grados de libertad: (0,05, 2, 42), es superior al valor de las distribuciones F calculadas sobre el mismo punto. Asimismo, se observa que el valor P supera en todos los casos el nivel alfa de 5 %. De acuerdo con lo anterior, se determina que los datos definidos en los tratamientos, en cuanto al comportamiento de las variables de interés son estadísticamente iguales.

5.4.1.2 Caracterización del individuo con menor tiempo de procesamiento (en horas):

A este individuo le corresponde un tiempo de proceso de 159 horas, el cual es equivalente a 0,9464 semanas (24 horas cada día y 7 días a la semana). Igualmente, al estructurarse en el horizonte de programación nombrado (24 horas cada día y 7 días a la semana), se obtiene un valor de penalización por costo de mano de obra directa de 2.380 puntos y, asimismo un valor de penalización por fracción defectuosa de 2.258 puntos. Cabe anotar que el individuo identificado se acerca en 98,11 % al individuo óptimo o subóptimo estimado, al cual se le asigna un tiempo de procesamiento de 156 horas.

En cuanto al tiempo óptimo o subóptimo estimado, se describe enseguida la metodología de obtención: el tiempo de carga hace referencia a la sumatoria de los requerimientos de tiempos de proceso en las diferentes operaciones, de acuerdo con los volúmenes de producción que deben fabricarse. Para el caso particular se detecta que las operaciones con mayores requerimientos de tiempo son en su orden: F, E y D. A su vez, para cada una de estas operaciones, pueden identificarse los pedidos que las utilizan en mayor proporción. De acuerdo con lo anterior, se establece que la operación F es utilizada en mayor grado por los pedidos: 9, 7 y 8; asimismo, la operación E es utilizada en mayor grado por los pedidos: 7, 9 y 8; mientras que la operación D es utilizada en mayor grado por los pedidos: 1, 7 y 4. Posteriormente, se verifica el orden ocupado por las operaciones en la secuencia de proceso de cada pedido, priorizándose en la programación aquellos pedidos que utilicen en los primeros órdenes de tal secuencia, las operaciones más cargadas. Con base en lo descrito, se establece que los pedidos 9 y 8 utilizan en la secuencia de proceso ya sea en segundo o en tercer orden las operaciones E y F, mientras que el pedido 7 las utiliza en las posiciones cuarta y quinta.

Al tomar referencia en lo anteriormente expresado, puede establecerse que los pedidos 9 y 8 deberían programarse con prioridad uno. Igualmente, se determina para estos dos pedidos que el pedido 9 es el primero en utilizar la operación D; es así como, éste pedido se prioriza sobre el pedido 8 en el orden de programación. En cuanto al pedido 7 se identifica que utiliza la operación D en tercer orden en su secuencia de proceso; de ésta manera, dicho pedido se programaría en tercera posición. Los demás pedidos se programan en aquel orden en el cual utilicen con prioridad las operaciones E o F, garantizando que las máquinas usadas en estas operaciones permanezcan el menor

tiempo posible detenidas. Con relación a lo mencionado se ilustra enseguida, el programa de producción que conduce a obtener el tiempo de proceso óptimo o subóptimo: ingresar con prioridad uno el pedido 9, ingresar con prioridad 2 el pedido 8, ingresar con prioridad 3 el pedido 7, ingresar con prioridad 4 el pedido 4, ingresar con prioridad 5 el pedido 5, ingresar con prioridad 6 el pedido 1, ingresar con prioridad 7 el pedido 6, ingresar con prioridad 8 el pedido 3 e ingresar por último el pedido 2.

También se hace notar que respecto a las metodologías tradicionales de programación de operaciones, se seleccionó como alternativa de comparación la regla denominada: “tiempo de operación más larga”. Con relación a lo anterior, se comenta que al obtener el programa de producción utilizando la mencionada regla, se estimó un tiempo de proceso de 187 horas, el cual es superior en 17,61 % al tiempo de proceso establecido en 159 horas.

A continuación, se muestra el diagrama de Gantt correspondiente al menor tiempo de procesamiento detectado. En este diagrama, el número ubicado en el interior de cada cuadro, corresponde al número de cada pedido procesado:

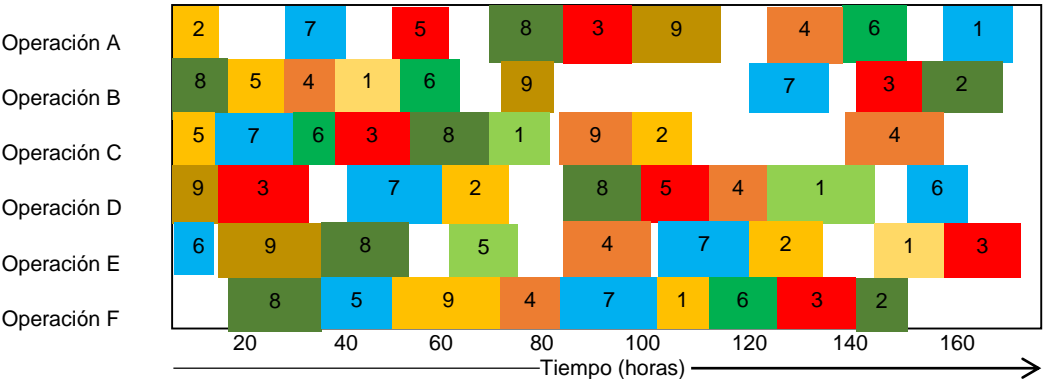


Figura 15. Diagrama de Gantt para el individuo de menor tiempo de proceso Tiempo de procesamiento: 159 horas equivalentes a 0,9464 semanas.

6 DISCUSIONES.

De acuerdo con los resultados obtenidos, al aplicar la metodología definida para el desarrollo del proyecto sobre los datos experimentales, puede establecerse que:

- A pesar de que en la literatura evaluada (Wang et al., 2010; Ghiasi et al., 2011; Xiong et al., 2012; Nicoara, 2012; Ozdagoglu et al., 2013; Bhatwadekar & Khire, 2013) y sus antecedentes, los procesos de investigación de los sistemas Job shop que utilizan técnicas fundamentadas en inteligencia artificial para la solución de problemas multiobjetivo se han extendido durante los últimos años; se resalta que las variables analizadas en el tipo de problema multipropósito, objeto de éste artículo, no han sido tratadas previamente por ningún autor. Asimismo, el problema identificado es de interés relevante debido a que se orienta a consolidar la competitividad de las operaciones de una Organización y consecuentemente a garantizar su permanencia y crecimiento en el mercado global.

- El algoritmo híbrido elaborado a partir de los algoritmos Vega y Moga, presenta importantes ventajas frente al algoritmo híbrido entre sumas ponderadas y algoritmos genéticos, lo cual se expresa en los siguientes aspectos:

- Desde el punto de vista del comportamiento del coeficiente de variación, se encuentra que el valor de este parámetro en las diversas variables (tiempo de procesamiento en horas, tiempo de procesamiento en semanas, penalización por costo de mano de obra directa y penalización por fracción defectuosa) es mayor al comparar el comportamiento del método uno respecto al comportamiento del método dos. Este hecho evidencia la capacidad del “método uno” para explorar de manera integral el espacio solución.

- Con relación a los individuos de mínimo valor provenientes de ambos métodos se encuentra que: en cuanto al tiempo de procesamiento en horas, el método uno presenta un valor inferior en 13,83 % al compararlo con el método dos; en cuanto al tiempo de procesamiento en semanas, el método uno presenta un valor inferior en 99,21 % al compararlo con el método dos; los dos métodos presentan igual desempeño en cuanto a la penalización por mano de obra directa y, en cuanto a la penalización por fracción defectuosa el método dos presenta un valor inferior en 0,8 % al compararlo con el método uno. Con base en lo definido, se determina que el desempeño del método uno supera el desempeño del método dos.

➤ Con relación a los individuos de mínimo valor provenientes del método uno al compararlos con el individuo de mayor factor de ponderación proveniente del método dos se encuentra que: en cuanto al tiempo de procesamiento en horas, el método uno presenta un valor inferior en 6,92 % al compararlo con el método dos; en cuanto al tiempo de procesamiento en semanas, el método uno presenta un valor inferior en 274,26 % al compararlo con el método dos; en cuanto a la penalización por costo de mano de obra directa ambos métodos presentan igual desempeño y, en cuanto a la penalización por fracción defectuosa el método uno presenta un valor inferior en 2,1 % al compararlo con el método dos. Con base en lo definido, se determina que el desempeño del método uno supera el desempeño del método dos.

➤ En algunas circunstancias se establece que el método dos podría tener mejor desempeño que el método uno; sin embargo, debido a la capacidad de exploración del método uno, se detectan algunos individuos cuyo comportamiento es similar al comportamiento de los individuos base de comparación provenientes del método dos. Respecto a los individuos que habiendo sido obtenidos por la aplicación del método uno y que a la vez, presentan un comportamiento similar a los individuos base de comparación del método dos, se establece su respectivo factor de ponderación. Este factor se determina haciendo el supuesto de que los individuos obtenidos por la aplicación del método uno, provinieran de la aplicación del método dos. Dada la circunstancia anterior, se concluye que los individuos provenientes del método uno, obtienen factores de ponderación superiores a aquellos factores obtenidos por los individuos originados en el método dos. Debido a lo expuesto, se define que el método uno, presenta mejor desempeño al compararlo con el método dos.

➤ El número de frentes detectados con el método uno es de 32 frentes, mientras que el número de frentes detectados con el método dos es de un frente. Este hecho evidencia que el método dos no se encuentra en capacidad de determinar diferentes niveles de individuos dominados.

➤ En cuanto a la distribución por intervalos, el método uno cuenta con presencia de individuos en 13 de 15 intervalos (3 intervalos con cinco intervalos por variable), es decir, cuenta con presencia de individuos en el 86,66 % de los intervalos. A su vez, el método dos cuenta con presencia de individuos en 8 intervalos, es decir, cuenta con presencia de individuos en el 53,33 % de los intervalos. Con base en lo anterior, puede ratificarse que el método uno amplía la zona de exploración, mientras que el método dos concentra la búsqueda solamente en algunos intervalos.

- Particularmente, la metodología propuesta (método uno) con el fin de evaluar las variables objeto de análisis, puede calificarse como precisa a pesar de la generación aleatoria de los individuos que conforman cada población. Respecto a lo anterior, el programa se ejecutó durante 45 oportunidades. De esta manera, los resultados obtenidos para cada una de las cuatro variables (tiempo de procesamiento en horas, tiempo de procesamiento en semanas, penalización por costo de mano de obra directa y penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario) se sometieron al correspondiente análisis anova de un solo factor. Específicamente el análisis fue estructurado en 3 tratamientos con 15 repeticiones por tratamiento. Es así como, al realizar el análisis anova, los resultados calculados tanto para la prueba “F” como para el valor “P”, permitieron establecer que los datos obtenidos por cada variable son estadísticamente iguales a un nivel de confianza de 95 %.

- Con el propósito de realizar el análisis del primer frente, se decidió efectuar agrupación de datos para cada variable; de esta manera, se identificaron los respectivos intervalos. A su vez, el equipo de dirección asoció a cada intervalo, cierto tipo de circunstancias, las cuales se encuentran relacionadas con factores como: comportamiento del mercado, nivel de servicio, flujo de efectivo y rentabilidad. De acuerdo con lo anterior, se establecerá la necesidad de implementar uno u otro programa de producción, de tal forma que se pueda:

- Aprovechar las circunstancias de crecimiento de la demanda de mercado y asimismo, garantizar un apropiado nivel de servicio atendiendo sus requerimientos de forma oportuna.

- Ajustarse a las circunstancias de estabilidad del mercado, entregando de forma oportuna pero también racionalizando no solo los costos de mano de obra directa, sino también la fracción defectuosa generada por el sistema productivo.

- En circunstancias de decrecimiento o de recesión económica, racionalizar los costos de mano de obra directa al igual que la fracción defectuosa, con el fin de evitar la reducción del flujo de efectivo o de la rentabilidad.

- Para los intervalos definidos en cada variable, se identifica el individuo que presenta la mayor pertenencia. De esta forma, se pretende asegurar que la decisión tomada de acuerdo con la circunstancias particulares, corresponda de manera representativa a cierto intervalo, evitando en lo posible la ambigüedad. Es así como los individuos que presentan la mayor pertenencia a los diferentes intervalos de la variable: tiempo de procesamiento (en semanas), muestran en promedio una pertenencia a los

intervalos de 81,9%; a su vez, los individuos que presentan la mayor pertenencia a los diferentes intervalos de la variable: penalización por costo de mano de obra directa, muestran en promedio una pertenencia a los intervalos de 70 % y, por último los individuos que presentan la mayor pertenencia a los diferentes intervalos de la variable penalización por fracción defectuosa, muestran en promedio una pertenencia a los intervalos de 67,12 %.

- En cuanto al análisis mono objetivo de la variable tiempo de procesamiento (en horas), se detectó como valor mínimo un tiempo de proceso de 159 horas. De acuerdo con el anterior resultado, se puede considerar que:

- El método uno es preciso y exacto. Como ya se había afirmado los datos correspondientes a la variable son estadísticamente iguales con un nivel de confianza de 95 %. A su vez, el tiempo óptimo o subóptimo estimado de 156 horas, es inferior en 1,92 % respecto al menor tiempo hallado de 159 horas.

- El método uno supera en desempeño tanto a las metodologías tradicionales como a algunas metodologías inteligentes de programación de operaciones (método dos). La anterior afirmación se sustenta en los siguientes aspectos:

- A nivel de las metodologías tradicionales, se encuentra que la regla de programación “tiempo de operación más larga”, permite obtener un tiempo de proceso de 187 horas. De esta forma, al comparar el mínimo tiempo de proceso obtenido por medio de la aplicación del método uno con el tiempo obtenido por medio de la aplicación de la regla en cuestión, se establece que el primero genera respecto al segundo un valor inferior en 17,61 %. Con base en lo expuesto, se determina que en cuanto a la detección del mínimo tiempo de proceso, el método uno supera en desempeño a la regla de programación tradicional: “tiempo de operación más larga”.

- A nivel de las metodologías inteligentes de programación, se encuentra que el método dos identifica un tiempo mínimo de proceso de 170 horas. Es así como, se establece que el método uno está en capacidad de encontrar un tiempo de procesamiento inferior en 6,92 %, al compararlo respecto al método dos. De acuerdo con lo anterior, se determina que el método uno presenta mejor desempeño que el método dos.

7 CONCLUSIONES.

Objetivo 1. Se concluye:

1. Con el propósito de determinar el valor correspondiente al tiempo de procesamiento, los métodos de programación de los sistemas Job Shop, se basaron de forma inicial en el conjunto de reglas denominadas: "reglas de prioridad". Posteriormente, el desarrollo de la programación lineal, condujo a estimar el tiempo óptimo de proceso y, en la actualidad, se aplica el marco teórico inherente a la metaheurística.

De acuerdo con lo expuesto, se presentarán enseguida algunos aspectos correspondientes a las reglas de prioridad; asimismo, se ilustrarán ciertos elementos relacionados con los modelos de programación lineal y finalmente, se tratarán determinados tópicos asociados con la metaheurística.

De manera particular, en cuanto a las reglas de programación, se han utilizado las siguientes, de tal forma que se pueda establecer el respectivo valor del tiempo de procesamiento: tiempo de operación más largo, tiempo de operación más corto, primero en llegar primero en procesarse, último en llegar último en procesarse, fecha de vencimiento más cercana, relación crítica, relación de cola, tiempo de holgura faltante y tiempo de holgura faltante respecto al número de operaciones faltantes. Al evaluar las mencionadas reglas, se encuentra que la regla: tiempo de operación más largo, facilita la obtención del menor tiempo de proceso. En el caso de esta regla, se busca mantener en funcionamiento continuo, aquel centro de trabajo de menor velocidad en el sistema productivo (Domínguez, 1.995).

De forma específica, al revisar los modelos fundamentados en programación lineal, puede anotarse que su estructura metodológica, se orienta a identificar el punto o los puntos óptimos de solución en una gran variedad de contextos. Es así como, después de que la programación lineal fue incorporada en el sector empresarial, se dispuso de una herramienta confiable para estimar los tiempos óptimos de procesamiento.

Una vez establecidos los resultados de ambos métodos (tiempo de operación más larga y programación lineal), se observa que el resultado definido cuando se aplica como criterio de priorización el tiempo de operación más largo, es inferior en desempeño al resultado proveniente de la aplicación de un modelo basado en los conceptos de programación lineal (Dominguez, 1.995).

Sin embargo, a pesar de que la programación lineal facilita la estimación del tiempo de proceso óptimo, su tiempo de cómputo en situaciones complejas supera los intervalos de tiempo, en los cuales deben tomarse decisiones en el sector real; por tanto, no es viable su utilización cotidiana.

Debido a la baja capacidad de respuesta que en términos de tiempos de cómputo ofrecen los modelos basados en programación lineal, surge como alternativa utilizar la técnica denominada metaheurística. Por medio de la aplicación de esta técnica, pueden estimarse en tiempos razonables de cómputo, aquellos tiempos de procesamiento cercanos al valor óptimo (Coello, 2002).

Finalmente, de acuerdo con el enfoque del presente proyecto, se comprueba consecuentemente que el tiempo de proceso obtenido al aplicar la regla: tiempo de operación más largo, es superior a los tiempos obtenidos, al aplicar tanto el método uno (método heurístico) como el método dos (método híbrido entre un método heurístico y un método exacto). A su vez, bajo las circunstancias particulares del proyecto, también debe anotarse que el método dos presenta un desempeño inferior al método uno, en cuanto a la determinación del menor tiempo de procesamiento. A partir de lo anterior, se establece que el nivel de exactitud logrado por el método uno es superior al nivel de exactitud logrado por el método dos.

2. En cuanto a la programación multiobjetivo, se ha transformado de acuerdo con los aspectos presentados a continuación:

- A nivel tradicional se han utilizado los siguientes métodos: sumas ponderadas, programación de metas, método de restricciones y método lexicográfico. Estos métodos se tornan imprecisos, debido a que no solucionan el problema manteniendo la independencia de las diferentes funciones objetivo.

- En la actualidad la programación multiobjetivo se analiza desde los métodos heurísticos, incluyendo diferentes técnicas como: recocido simulado multiobjetivo, colonia de hormigas multiobjetivo, búsqueda tabú multiobjetivo y algoritmos genéticos multiobjetivo. Respecto a los métodos anteriores, se prefiere la utilización de los algoritmos genéticos multiobjetivo, debido a su aplicabilidad en gran diversidad de situaciones.

- Como tendencia a nivel de programación multiobjetivo, se observa el diseño e implementación de métodos constructivos, bajo los cuales se obtienen a partir de la aplicación de métodos exactos (programación lineal, programación entera, programación entera mixta, líneas de espera y cadenas de Markov) algunas soluciones de carácter

inicial. Estas soluciones, se convierten con posterioridad en la información de entrada de los métodos heurísticos, los cuales se encargarán de afinar la búsqueda, usando con este propósito, tiempos de cómputo inferiores a aquellos actualmente utilizados.

De manera específica, en el presente proyecto se comprobó que el método diseñado a partir de los algoritmos genéticos multiobjetivo Vega y Moga, efectivamente supera el desempeño en diversos aspectos de interés (parámetros de variación, número de frentes, número de individuos en los intervalos del primer frente y valores mínimos establecidos en las variables objeto de análisis) al compararlo con un método que fusiona la técnica tradicional de sumas ponderadas (técnica tradicional de programación multiobjetivo) con el método heurístico: algoritmos genéticos.

Objetivo 2. Se concluye:

3. De acuerdo con el problema analizado se establecen como variables dependientes el tiempo de procesamiento (en horas y en semanas), la penalización por costo de mano de obra directa y la penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario. A continuación se muestra por cada variable dependiente, las variables independientes que inciden en su determinación:

- Tiempo de procesamiento. En cuanto a la determinación de esta variable, se requiere la definición de: rutas de manufactura y tiempos de operación, la cantidad de máquinas por operación, la cantidad de personas requeridas para el manejo y control de cada máquina o de cada grupo de máquinas, el tipo de operaciones a realizar en cada tipo de máquina, las habilidades de las personas, los tiempos de cambio de referencia, los tiempos de transporte del trabajo en proceso entre máquinas, la jornada laboral diaria de cada persona, el total de horas a laborar por día (8 horas, 16 horas y 24 horas) y el total de días a laborar en la semana (6 días o 7 días).

La información anterior se sistematizó en el procedimiento descrito en el paso 2 de la metodología. Los resultados de la aplicación del procedimiento se observan en las tablas 5, 6, 7, 34 y 35 del presente proyecto. A su vez, como se mencionó en su momento, para estimar el valor de la variable tiempo de proceso, no fueron consideradas las variables independientes tiempo de cambio de referencia como tampoco tiempo de desplazamiento entre los centros de trabajo.

- Penalización por costo de mano de obra directa. En cuanto a la determinación de esta variable, se requiere la definición de: programación horaria de los pedidos, penalización horaria por costo de mano de obra directa, la jornada laboral diaria de cada persona, el total de horas a laborar por día y el total de días a laborar en la semana.

La información anterior se sistematizó en el procedimiento descrito en el paso 2 de la metodología. Los resultados de la aplicación del procedimiento se observan en las tablas 14, 38 y 39 del presente proyecto.

- Penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario. En cuanto a la determinación de esta variable, se requiere la definición de: programación horaria de los pedidos, penalización horaria por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario, la jornada laboral diaria de cada persona, el total de horas a laborar por día y el total de días a laborar en la semana.

La información anterior se sistematizó en el procedimiento descrito en el paso 2 de la metodología. Los resultados de la aplicación del procedimiento se observan en las tablas 11, 42, 44 y 46 del presente proyecto.

Objetivo 3. Se concluye:

4. La metodología diseñada (método uno) al igual que el método de comparación (método dos) se aplicaron a la compañía objeto de estudio. De esta forma, los resultados correspondientes a la aplicación del método uno, se presentan en las tablas 49 a 68. Asimismo, los resultados obtenidos al aplicar el método dos se muestran en las tablas 69 a 71 y, finalmente la comparación de los métodos se aprecia en las tablas 72 a 78.

De manera específica, el análisis comparativo de los métodos permite establecer que el método uno supera el desempeño del método dos, debido a los siguientes aspectos:

- Al conformar la primera nueva población a partir de tres subpoblaciones de tamaño $Q / 3$ individuos, se seleccionan aleatoriamente $Q / 2$ individuos. Esta selección de $Q / 2$ individuos, se realiza de tal forma que permite extraer un conjunto de individuos del grupo de mejores individuos ($0,8 Q$ individuos). A su vez, la selección aleatoria tomando como fuente al grupo de mejores individuos ($0,8 Q$ individuos), garantiza la diversidad en las soluciones, lo cual se refleja finalmente en la variación representativa de los datos que integran la población final de respuesta.

- El método de selección establecido para aquellos individuos que deberán cruzarse, con el propósito de conformar la segunda nueva población, garantiza la diversidad en la población final de respuesta.

- Al realizar las operaciones de cruzamiento y de mutación para conformar tanto la primera nueva población como la segunda nueva población, se mejora el comportamiento simultáneo de los individuos en las tres funciones objetivo.

- Al conformar tanto la primera como la segunda nueva población se seleccionan de forma aleatoria 0,1 Q individuos del universo de soluciones, buscando mantener de esta manera la diversidad de las soluciones.

Igualmente, se menciona que debido a la capacidad significativa del método uno para superar al método dos (parámetros de variación, número de frentes, número de individuos por intervalo, valores mínimos hallados en las tres variables), los resultados obtenidos a través de la aplicación del primer método, podrían ser comparables con los resultados obtenidos por medio de la aplicación de otras metodologías multiobjetivo como NSGA - II o SPEA - II.

5. Al comparar, los resultados obtenidos por ambos métodos, se encuentran entre otros aspectos, los siguientes:

- El coeficiente de variación del método uno supera al coeficiente de variación del método dos, así: en 49,38 % en cuanto a la variable tiempo de proceso (en horas), en 359,5 % en cuanto a la variable tiempo de proceso (en semanas) y en 238,9 % en cuanto a la variable penalización por fracción defectuosa generada por la fatiga del operario. A su vez, en cuanto a la variable penalización por costo de mano de obra directa, el coeficiente de variación del método uno es de 90,95 % mientras que el coeficiente de variación del método dos, no muestra ninguna evidencia de cambio (0/0). Con base en lo expuesto, se establece que el método uno tiene mayor capacidad para explorar el universo de soluciones, mientras que el método dos converge hacia determinadas áreas del espacio solución.

- Con relación a los individuos de mínimo valor provenientes del método uno al compararlos con el individuo de mayor factor de ponderación proveniente del método dos se encuentra que: en cuanto al tiempo de procesamiento en horas, el método uno presenta un valor inferior en 6,92 % al compararlo con el método dos; en cuanto al tiempo de procesamiento en semanas, el método uno presenta un valor inferior en 274,26 % al

compararlo con el método dos; en cuanto a la penalización por costo de mano de obra directa ambos métodos presentan igual desempeño y, en cuanto a la penalización por fracción defectuosa el método uno presenta un valor inferior en 2,1 % al compararlo con el método dos. Con base en lo definido, se determina que el desempeño del método uno supera el desempeño del método dos.

- El número de frentes detectados con el método uno es de 32 frentes, mientras que el número de frentes detectados con el método dos es de un frente. Asimismo, la aplicación del método uno: concentra el 32,28 % de los individuos en el primer frente, obtiene una participación porcentual promedio de individuos por frente de 3,12 % y por último, asigna el 80,45 % de los individuos a los nueve primeros frentes. De acuerdo con lo anterior, se evidencia que el método dos no está en capacidad de determinar diferentes niveles de individuos no dominados.

Objetivo 4. Se concluye:

6. El análisis de varianza realizado para 45 poblaciones (tablas 80, 82, 84 y 86), permite mencionar que los resultados obtenidos para las variables objeto de análisis son estadísticamente iguales. Debido a lo anterior, se determina que la metodología diseñada cumple condiciones de precisión. De esta manera, se establece que los resultados arrojados por la metodología propuesta, podrían ser comparables al aplicar sobre el problema tratado otras metodologías multiobjetivo como colonia de hormigas multiobjetivo o grasp multiobjetivo u otras metodologías híbridas entre técnicas exactas y técnicas heurísticas.

7. La metodología definida presenta ventajas importantes sobre otras metodologías, ya que se obtienen características apropiadas de desempeño:

- Precisión a nivel multiobjetivo. Los resultados para las cuatro variables son estadísticamente iguales a un nivel de confianza de 95 % (Ver tablas 80, 82, 84 y 86)

- Precisión y exactitud en cuanto a la variable tiempo de procesamiento (en horas). Los resultados de la variable en cuestión son estadísticamente iguales a un nivel de confianza de 95 % (Ver tabla 80) y a su vez, el tiempo de procesamiento óptimo o subóptimo es inferior en 1,92 %, al compararlo con el menor tiempo detectado por medio de la aplicación del método uno.

- Capacidad de generar soluciones diversas en la población final de respuesta. El coeficiente de variación obtenido por medio de la aplicación del método uno, es

significativamente mayor al compararlo con el coeficiente de variación obtenido por medio de la aplicación del método dos (Ver tabla 72).

- Capacidad para identificar diversidad de frentes (Ver tabla 50).

Las características anteriores, se obtienen en un número relativamente bajo tanto de iteraciones (95 iteraciones) como de tiempo de ejecución (5 minutos para 95 iteraciones).

Otras conclusiones:

8. Al analizar las tendencias del mercado (crecimiento, estabilidad o decrecimiento), la dirección de operaciones de la compañía, puede seleccionar diferentes programas de producción, los cuales proceden de diversos individuos no dominados. Con el anterior propósito, se observa la información registrada en las tablas 51 y 52.

Asimismo, en algunas circunstancias propias de la organización objeto de estudio, se podrán seleccionar programas de producción que generen la menor penalización posible por costo de mano de obra directa (ver tablas 56 y 57) o por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario (ver tablas 61 y 62).

9. El tiempo de procesamiento debe analizarse de forma integral con otras variables, las cuales pueden depender en mayor o menor grado del comportamiento del entorno y de su interpretación por parte del equipo de dirección de la compañía (Ver tablas 51 y 52); de esta manera, en estudios posteriores se podría robustecer la metodología incluyendo elementos de la dinámica de sistemas y de la teoría de juegos, al igual que elementos tomados de la inteligencia artificial (minería de datos, colonia de hormigas y búsqueda tabú).

10. La descripción detallada de la metodología en cuanto a la estructura operativa de cada uno de los pasos tanto del método uno como del método dos, permite que sea replicada por parte de las personas interesadas en el tema.

8 FUTURAS LÍNEAS DE ACCIÓN.

El tipo de proyecto puede enfocarse con aspectos complementarios, los cuales permitan robustecerlo, acercándolo a la gestión integral de las operaciones correspondientes a la Organización objeto de estudio, así:

1. En cuanto al tiempo de procesamiento se debe determinar considerando:

Los tiempos de cambios de referencia y los tiempos de transporte de material en el proceso.

El comportamiento estocástico de los tiempos de operación y de la fracción defectuosa debida del operario.

2. En cuanto a la comparación con métodos heurísticos, se podrían comparar los resultados obtenidos con los resultados de aplicar técnicas como: NSGA – II, SPEA – II y colonia de hormigas multiobjetivo.

3. En cuanto a la posibilidad de lograr mayor precisión en la búsqueda del frente de Pareto, se podrían utilizar métodos constructivos que partan de los conceptos establecidos por métodos analíticos como: programación lineal, programación entera, programación entera mixta, sistemas de espera, cadenas de markov y simulación Montecarlo.

4. En cuanto al comportamiento del mercado y su incidencia en las decisiones de la gestión del sistema productivo, se podrían considerar elementos que provengan de la dinámica de sistemas.

5. En cuanto a la naturaleza de las decisiones de las personas que integran el equipo de dirección de la organización, se podrían considerar elementos que provengan de la teoría de juegos.

6. En cuanto al análisis integral de la información de respuesta, se podría utilizar minería de datos.

7. En cuanto a la gestión de inventarios, se podrían considerar para un sistema Job Shop de este tipo, la determinación de los tamaño de lote de materia prima que deben existir, con el propósito minimizar el tiempo de entrega.

8. En cuanto a la determinación del tiempo de entrega considerar contingencias externas como: cierre de carreteras, problemas en procesos de importación, inestabilidad política, cierres temporales o permanentes de los proveedores de la compañía entre otros.

9 AGRADECIMIENTOS.

Se expresan los más sinceros agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia – sede Manizales–, por su apoyo en la ejecución de este proyecto. Asimismo, se agradece de forma especial a los profesores Omar Danilo Castrillón Gómez y Santiago Ruiz Herrera, por su interés permanente en el desarrollo integral de la propuesta de investigación.

10 BIBLIOGRAFÍA.

- Adam, E., y Ebert, R. J. (1991). *Administración de la producción y de las operaciones* (4.ª Ed.). México D.F: Prentice Hall.
- Anandaraman, C. (2011). An improved sheep flock heredity algorithm for job shop scheduling and flow shop scheduling problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2(4), 749-764.
- Anderson E. J., y Ferris, M. C. (1994). Genetic algorithms for combinatorial optimization. The assemble line balancing problem : *Orsa Journal on Computing*, 6 (2), 161-173. doi:10.1287/ijoc.6.2.161.
- Akhshabi, M., y Khalatbari, J. (2011). Solving flexible job-shop scheduling problem using clonal selection algorithm. *Indian Journal of Science & Technology*, 4 (10), 1248-1251.
- Baesler, F., Ceballos, L., y Ramírez, M. (2006). Programación multiobjetivo de máquinas moldureras a través de algoritmos meméticos. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 8(3), 183-192.
- Balling, R. J., Taber J.T., Brown M. R., y Kirsten D. (1999). Multiobjective urban planning using genetic algorithm. *Journal of Urban Planning and Development*. 125 (2), 86-99.
- Ballou, R. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro* (5.ª Ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Bhatwadekar, S., y Khire, M. (2013). Monitoring population divergence in job shop scheduling problems using genetic algorithm. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 1355-1365.
- Baykasoğlu, A., y Özbakır L. (2006). Stochastic U-line balancing using genetic algorithms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(1/2), 139-147.
- Beasley, D., Buell R. B., y Ralph R. M. (1993). An overview of genetic algorithms. *University Computing*, 15 (2), 58-69.
- Bhongade, A.S., y Khodke, P.M. (2011). Heuristics for production scheduling problem with machining and assembly operations. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 3(2), 185-198.
- Bozejko, W. (2012). On single-walk parallelization of the job shop problem solving algorithms. *Computers & Operations Research*, 39(1), 2258–2264.

- Bozejko, W., y Wodecki, M. (2007). Applying multi-moves in parallel genetic algorithm for the flow shop problem. *AIP Conference Proceedings*, 963(2), 1162-1165. doi: 10.1063/1.2835952.
- Brown, E., Ragsdale C., y Carter, A. (2007). A grouping genetic algorithm for the multiple traveling sales person problem. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 6(2), 333-347.
- Cabezas, C.A. (2002). Algoritmos genéticos, una opción para la optimización de funciones. *Tecnología Química*, 22(2), 65-69.
- Castrillón, O. D., Sarache, W. A., y Giraldo, J. A. (2011). Aplicación de un algoritmo evolutivo en la solución de un problema Job Shop - Open Shop. *Información Tecnológica*, 22(1), 83-92.
- Chase R.B., y Aquilano, N.J. (1995). *Dirección y administración de la producción y de las operaciones* (6.ª Ed.). Barcelona: Irwin.
- Cheng, B., Yang, S., Hu, X., y Chen, B. (2012). Minimizing makespan and total completion time for parallel batch processing machines with non-identical job sizes. *Applied Mathematical Modelling*, 36 (1), 3161-3167.
- Chien, S., Zhaowei, Y., y Hou, E. (2001). Genetic algorithm approach for transit route planning and desing. *Journal of Transportation Engineering*, 127(3), 200-210.
- Coca, G.A. Castrillón, O.D. y Ruiz, S. (2013). Metodología basada en los algoritmos VEGA y MOGA para solucionar un problema multiobjetivo en un sistema de producción Job Shop. *Revista EIA*, 2013 (19), 175 – 191.
- Coca, G.A. Castrillón, O.D, y Ruiz, S. (2013). Programación multiobjetivo en un sistema de fabricación tipo “contra existencia” (job Shop). *Información Tecnológica*. Vol. 24(6).
- Coello, C. (2002). Theoretical and numerical constraint handling techniques used with evolutionary algorithms: A survey of the state of the art. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191(11-12), 1245-1287.
- Correa, A., Velásquez, E., y Londoño, M.I. (2008). Secuenciación de operaciones para configuraciones de planta tipo flexible Job Shop: Estado del arte. *Avances en Sistemas e Informática*, 5 (3), 151-161.
- Dao Er Ji, R. Q., y Wang, Y. (2012). A new hybrid genetic algorithm for job shop scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 39(1), 2291-2299.
- Defersha, F., y Chen, M (2010). A parallel genetic algorithm for a flexible job-shop scheduling problem with sequence dependent setups. *International Journal*

of *Advance Manufacturing Technology*, 49, 263-274. doi: 100.1007/s0017-009-2388-x.

- Domínguez, J.A., Alvarez, M.J., y Domínguez, M.A. (1995). *Dirección de operaciones: aspectos tácticos y operativos en la producción y los servicios*. Madrid: McGraw-Hill.
- Estrada Muñoz, J. (2000). *Ergonomía* (2.^a Ed.). Medellín: Universidad de Antioquia.
- Feitó C. M., y Cespón C. R. (2009). Selección de rutas de distribución utilizando optimización por colonia de hormigas. *Vector*, 4, 59-66.
- Gallardo, M.d.C., y Avila, R. (2008). Aplicaciones de la inteligencia artificial en la Medicina: perspectivas y problemas. *ACIDEM*, 17, 6–17.
- Ganesh, K., y Punniyamoorthy, M. (2004). Optimization of continuous-time production planning using hybrid genetic algorithms-simulated annealing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(½),148-154.
- Gen, M., y Cheng, R. (1997). *Genetic Algorithms and Engineering Design* (3.^a Ed.). New York: Wiley-Interscience. Antes decía EEUU:H.R Parshaei, pero éste es un autor, he buscado el libro y he cambiado editoria. (QUITAR AZUL, YA ESTÁ BIEN)
- Gendreau, M., y Potvin, J. (2005). Metaheuristics in Combinatorial Optimization. *Annals of Operations Research*, 140, 189-213.
- Ghiasi, H., Damiano, P., y Lessard, L. A. (2011). Non-dominated sorting hybrid algorithm for multi-objective optimization of engineering problems. *Engineering Optimization*, 43 (1), 39-59.
- Glover, F., y Melián B. (2003). Búsqueda tabú. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 19 (19), 29-48.
- Goldratt, E. (1993). *La meta* (2^a Ed.). México: Castillo.
- Goldratt, E. (1995). *No fue la suerte*. México: Castillo.
- Hansen, P., Mladenovic, N., y Moreno, J.A. (2003). Búsqueda de entorno variable. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 7(19), 77-92.
- Heizer, J., y Render, B. (2004). *Principios de Administración de Operaciones* (5.^a Ed.). México D.F: Pearson Educación.
- Herrman J., y Yee Lee, C. (1995) Solving a class scheduling problem with genetic algorithm. *Orsa Journal on Computing*, 7(4), 443-452.
- Hopp, W.J., y Spearman, M.L. (1996). *Factory Physics (Foundation of Manufacturing Management)* (5.^a Ed.). Chicago, IL: Irwin.

- Ghiasi, H., Damiano, P., y Lessard, L. (2011). A non-dominated sorting hybrid algorithm for multi-objective optimization of engineering problems. *Engineering Optimization*, 43(1), 39-59. doi: 10.1080/0305215003739598.
- Kathryn, A. D., y Belarmino, A.D. (2003). Diseño de heurística y fundamentos del recocido simulado. *Revista Latinoamericana de Inteligencia Artificial*, 7(19), 34-44.
- Koonce, D.A.(2000). Using data mining to find patterns in genetic algorithm solutions to a job shop schedule. *Computer & Industrial Engineering*, 38, 361-374.
- Legis Editores S.A. (2013). *Catilla Laboral 2013*. Colombia: Legis
- Leong, G.K., Snyder, D.L., y Ward, P.T. (1990). Research in the process and content of manufacturing strategy. *Omega International Journal of Management Science*, 18(2), 109-122.
- Lestan, Z., Brezocnik, M., Buchmeister, B., Brezovnik., y Balic, J. (2009). Solving the Job-Shop scheduling problem with a simple genetic algorithm. *International Journal of Simulation Modelling*, 8(4), 197-205.
- Li, J., Pan, Q., Saganthan, P., y Chua, T. (2011). International Journal of Advanced Manufacturing of Technology. *A hybrid tabu search algorithm with an efficient neighborhood structure for the flexible job shop scheduling problem*. Volumen 52 Issue 5, P.P 683-697, 15p, doi: 10.1007/s00170-010-273-4.
- Lin, C., Yeh, J., y Ding, J. (2000) A genetic algorithm for solving a maintenance model in a FMS. *International Journal of Systems Science*, 31(4), 449-456.
- Liu, T., Tsai, J., y Chou, J. (2005). Improved genetic algorithm for the job-shop scheduling problem. *International Journal of Advanced Manufacturing of Technology*, 2007(9/10), 1021-1029.
- Lourenço, H.R., Paixão, J.P., y Portugal, R. (2001). Multiobjective metaheuristics for the bus driver scheduling problem. *Transportation Science*, 35(3), 331-343.
- Mansouri, S. A., Hendizadeh, S. H., y Salmasi, N. (2008). Bicriteria scheduling of a two-machine flowshop with sequence – dependent setup times. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(11/12), 1216-1226.
- Maneiro, N., y Yllada, R. (2005). Optimización del manejo de materiales en una empresa fabricante de cremas dentales mediante métodos evolutivos. *Investigación de Operaciones*, 26(1), 43-47.
- Martin, O., Otto, S.W., y Felten, E.W (2003). Large-step markov chains for the TSP incorporating local search heuristics. *Operations Research Letters*, 11, 219-224.

- Mawdesley, M. J., Al-jibouri, S.H., y Hongbo, Y. (2002). Genetic Algorithms for Construction Site Layout in Project Planning. *Journal of Construction Engineering & Management*, 128(5), 418-425. doi: 10.1061/~ASCE!0733-9364~2002!128:5~418!
- Mazdeh, M., Esfahani, A., Sakkaki, S., y Pilerood, A. (2012). Machine batch scheduling minimizing weighted flow times and delivery costs with job release times. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 3(3), 347-364. doi: 10.5267/j.ijiec.2012.01.004.
- Medina, R., Pradenas, L., y Parada, V. (2011). Un algoritmo genético flexible para el problema Job Shop flexible. *Revista chilena de ingeniería*, 19(1), 53-61.
- Meisel, J.D., y Prado, L.K. (2010). Un algoritmo genético híbrido y un enfriamiento simulado para solucionar el problema de programación de pedidos Job Shop. *Revista EIA*, 13, 31-51.
- Meredith, J., y Gibbs, T. (1986). *Administración de Operaciones*. México D.F: Limusa S.A.
- Nicoara, E.S. (2012). Multi-objective Flexible Job Shop Scheduling Optimization Models. *Economic Insights – Trends and challenges*, 49 (2), 79-86.
- Niebel, B. W., y Freivalds, A. (2004). *Ingeniería Industrial: Métodos, estándares y diseño del trabajo* (11.ª Ed.). México D.F: Alfaomega S.A.
- Noori H., & Radford, R. (1997). *Administración de Operaciones y Producción: Calidad total y respuesta rápida*. Santafé de Bogotá, D.C: McGraw-Hill.
- Ozdagoglu, G., Erdem, S., y Salum, H. (2013). A special purpose multi-criteria heuristic function for a single machine scheduling problem with forward dynamic programming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1875-1886.
- Pasupathy, T., Chandrasekharan, R., y Suresh, R. (2006). A multi-objective genetic algorithm for scheduling in flow shops to minimize the makespan and total flow time of jobs. *International Journal of Advanced Manufacturing of Technology*, 27(7/8), 804–815.
- Pongcharoen, P., Khadwilard, A., y Klakankhai, A. (2007). *Multi-matrix real-coded genetic algorithm for minimizing total costs in logistics chain network*. *Proceedings of World Academy of Science: Engineering & Technology*, 36, 458-463.
- Rabello, G.R., Moretti, A.C., y Salles, N. L.L. (2008). A grasp metaheuristic for the ordered cutting stock problem. *Revista Chilena de Ingeniería*, 16(3), 421-427.

- Ramírez, C.S., Prado, M.E., y Córdona, G.J. (2007). Reasignación de tareas a operarios en una estación de trabajo: Un enfoque evolutivo. *Revista de la Ingeniería Industrial*, 1(1), 1-9.
- Raud, B., Steyer J.P., Lemoine, C., Latrille, E., Manic, G., y Printemps-Vacquier, C. (2007). Towards global multi objective optimization of waste water treatment plant based on modeling and genetic algorithms. *Water Science & Technology*, 56(9), 109–116.
- Reynolds. B. J., y Azarm. S. (2002). A Multi-objective heuristic-based hybrid genetic algorithm. *Mechanics of Structures & Machines*, 30(4), 463-491.
- Rosing, K.E., y Reville C.S. (1997). Heuristic concentration: two stage solution construction. *European Journal of Operational Research*, 97(1), 75-86.
- Rou, L.Y., y Hishammuddin, A. (2010). A study of cooperative co-evolutionary genetic algorithm for solving flexible job shop scheduling problem. *World Academy of Science, Engineering & Technology*, 72, 412-417.
- Ruiz, S., Castrillón O., y Sarache, W. (2012) Una metodología multiobjetivo para optimizar un ambiente Job Shop, *Información Tecnológica*, 23 (1), 35-46.
- Schrimpf, G., Schneider, J., Stamm, H., y Dueck G. (1999). Record Breaking Optimization Results Using the Ruin and Recreate Principle. *Journal of computational Physics*, 159, 139-171. doi:10.1006/jcph.1999.6413.
- Schroeder, R. (1992). *Administración de operaciones: Toma de decisiones en la función de operaciones* (3.ª Ed.). México D.F: McGraw-Hill.
- Shaw, K.J., y Fleming ,P.J. (2000). Genetic algorithms for scheduling: incorporation of user preferences. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 22(2), 195-210.
- Shum, Y., y Gong, D. (2006). *The application of genetic algorithm in the development of preventive maintenance analytic model*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 1/2, 169-183.
- Silvaraj, R., y Ravichandran, T. (2011). A review of selection methods in genetic algorithms. *International Journal of Engineering Science & Technology*, 3(5), 3792-3797.
- Silver, E., Pyke, D., y Peterson, R. (1998). *Inventory management and production planning and scheduling* (3.ª Ed.). New Jersey: Wiley.
- Sipper, D., y Bulfin, R. (1998). *Planeación y control de la producción*. México D.F: McGraw-Hill.

- Talbi, E. (2002). A Taxonomy of hybrid metaheuristics. *Journal of heuristics*, 8(5), 541-564. doi: 10.1023/A:1016540724870
- Thamilselvan, R., y Balasubramanie, P. (2011). Analysis of various alternate crossover strategies for genetic algorithm to solve job shop scheduling problems. *European Journal of Scientific Research*, 64(4), 538-554.
- Toklu., C. (2002). Application of genetic algorithms to construction scheduling with or without resource constraints. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(3), 421-429.
- Toscano, G. (2001). *Optimización multiobjetivo usando un micro algoritmo genético*. Tesis de maestría, Facultad de Física e Inteligencia Artificial, Universidad Veracruzana, Universidad Veracruzana. Recuperado de <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/29453>.
- Wang, K., y Choi, S. H. (2010). Decomposition-based scheduling for makespan minimization of flexible flow shop with stochastic processing times. *Engineering Letters*, 18(1), 75-84.
- Wang, W., y Li, T. (2010). Improved cultural algorithms for job shop scheduling problem. *International Journal of Industrial Engineering*, 18(4), 162-168.
- Wang, X., Gao, L., y Zhang, C (2010). A multi-objective genetic algorithm based on immune and entropy principle for flexible job-shop scheduling problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51, 757-767. doi: 10.1007/s00170-010-2642-2.
- Xiong, J. Tan, X. Yang, K.W. Xing, L.N. y Chen, Y.W. (2012). A Hybrid Multiobjective Evolutionary Approach for Flexible Job-Shop Scheduling Problems. *Mathematical problems in engineering*, 2012, ID 478981, 27p. doi:10.1155/2012/478981.
- Yang, C.C, Chuang, S., y Hsu, T. (2011). A genetic algorithm for dynamic facility planning in job shop manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52(1-4), 303-309. doi: 10.1007/s000170-010-2733-0.
- Yang, C., Liang, C.C., Chao, H.Y., y Chang, S.C. (2007). Multiobjective planning of surface water resources by multiobjective genetic algorithm with constrained. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(6), 499-508. doi: 10.1061/_ASCE_0733-9496_2007_133:6_499_.
- Yulan, J., Zuhua, J., y Wenrui, H. (2007). Multi-objective integrated optimization research on preventive maintenance planning and production scheduling for a

single machine. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39 (9/10), 954-964.

- Zhao, Y., Wang, H., Xu, X., y Wang, W (2010). *A new hybrid parallel algorithm for consistent-sized batch splitting job shop scheduling on alternative machines with forbidden intervals*. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48, 1191-1105. doi: 10.1007/s00170-009-2340-0.
- Zhang, R., y Wu, C. (2012). A hybrid local search algorithm for scheduling real-world job shops with batch-wise pending due dates. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(1), 209-221.
- Estudio Sector Metalmecánico área metropolitana de Bucaramanga. En el portal de imebu.gov. Recuperado de http://www.imebu.gov.co/documentos/observatorio/mercado_trabajo/Estudio%20Sector%20Metalmecanico.pdf
- Doce sectores tienen la meta de triplicar sus exportaciones en 2014. En el portal de [mincomercio.gov.co](http://www.mincomercio.gov.co). Recuperado de <https://www.mincomercio.gov.co/publicaciones.php?id=847>
- Industria metalmecánica de América Latina en creciente amenaza por competencia en China. En el portal de [andi.com.co](http://www.andi.com.co). Recuperado de http://www.andi.com.co/pages/prensa/comunicados_prensa_detalle.aspx?Id=282
- Información general. En el portal de [andi.com.co](http://www.andi.com.co). Recuperado de <http://www.andi.com.co/pages/comun/infogeneral.aspx?Id=27&Tipo=2>
- Procesos Metalmecánicos. En el portal de sites.google.com/site/procesosmetalmeccanicosunal/
- Sectores metalmecánico y siderúrgico, y hortofrutícola ingresan al Programa de Transformación Productiva. En el portal de [mincomercio.gov.co](http://www.mincomercio.gov.co). Recuperado de <https://www.mincomercio.gov.co/publicaciones.php?id=1737>

A ANEXO 1.

PRODUCTOS DEL PROYECTO

Los productos particulares del desarrollo del proyecto son:

1) Artículos en revistas indexadas:

- Coca, G.A. Castrillón, O.D, y Ruiz, S. (2013). Programación multiobjetivo en un sistema de fabricación tipo “contra existencia” (job Shop). *Información Tecnológica*. Vol. 24(6).

La revista: “Información tecnológica”, se encuentra clasificada en la categoría A1.

- Coca, G.A. Castrillón, O.D. y Ruiz, S. (2013). Metodología basada en los algoritmos VEGA y MOGA para solucionar un problema multiobjetivo en un sistema de producción Job Shop. *Revista EIA*, 2013 (19), 175 – 191.

La revista: “Revista EIA”, se encuentra clasificada en la categoría A2.

2) Tesis

Corresponde al proyecto presentado.

3) Aplicativo elaborado en Software Matlab.

Se entrega tanto en medio físico como enviado al correo.

B ANEXO 2.

MANUAL TÉCNICO.

ÍNDICE GENERAL.

Introducción.

Objetivos

Objetivo general

Objetivos específicos

1. Tipo de Software utilizado y características del equipo

2. Estructura general del algoritmo

3. Funciones:

3.1 GenerarAleatorio()

3.2 igualesindi()

3.3 Paso2()

3.4 ordenar()

3.5 cal_time_pro()

3.6 cal_pen_def()

3.7 cal_pen_cos()

3.8 num_per()

3.9 penalizacionCosto()

3.10 apareamiento()

3.11 DetectarIgualesPedido()

3.12 mutar()

3.13 orgFrentes_Moga()

3.14 OrdeTiseFrentes()

INTRODUCCIÓN

Con el propósito de facilitar el análisis de un problema multiobjetivo se desarrolló un programa, el cual fusiona elementos de los algoritmos genéticos Vega y Moga. El programa permite analizar de forma simultánea las variables: tiempo de procesamiento, penalización por costo de mano de obra directa y penalización por fracción defectuosa debida a la fatiga del operario.

De acuerdo con lo anterior, se presenta enseguida el manual técnico correspondiente al programa diseñado.

El manual describe de forma inicial la estructura general del algoritmo, posteriormente ilustra cada una de las funciones, especificando: variables de entrada, variables intermedias, variables de salida, pasos realizados y, al finalizar se presenta el diagrama de flujo correspondiente a cada función.

OBJETIVOS

Objetivo general

Mostrar el funcionamiento del programa, lo cual incluye la definición de su estructura, la descripción de las funciones y, asimismo su representación en diagramas de flujo.

Objetivos específicos

Ilustrar cada una de la funciones por medio de su descripción general y, a la vez de la presentación de las respectivas variables de entrada, intermedias y de salida.

Describir a nivel general los pasos realizados en cada una de las funciones que integran el programa.

Detallar cada una de las funciones que integran el programa, representándolas en los correspondientes diagramas de flujo.

1.TIPO DE SOFTWARE Y CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO UTILIZADO:

El programa se elaboró en Matlab R2012a. El equipo utilizado para correr el programa cuenta con las siguientes características: Intelcore5duo de 220 Ghz y 200 GB libres en disco duro. A su vez, el tiempo de evaluación para 95 iteraciones es de 5 minutos.

2. ESTRUCTURA GENERAL DEL ALGORITMO:

A continuación, se describen las actividades generales ejecutadas por el algoritmo:

2.1 Definir el número de individuos que conformarán la población inicial ($Q=210$) y asimismo, una bandera de parada de ciclos (controla que se realicen R iteraciones).

2.2 Generar una población aleatoria de Q individuos y verificar que no existan individuos repetidos.

2.3 Dividir la población en 3 subpoblaciones de $Q / 3$ individuos: subpoblación1, subpoblación2 y subpoblación3.

2.4 Evaluar el tiempo de procesamiento de cada individuo en cada subpoblación.

2.5 Determinar respectivamente en las subpoblaciones 2 y 3, los valores correspondientes a la penalización por costos de mano de obra directa y a la penalización por fracción defectuosa.

2.6 Ordenar a nivel ascendente los individuos de cada subpoblación de acuerdo con el valor tomado por la función objetivo.

2.7 Extraer $0,1666 Q$ individuos de cada subpoblación.

2.8 Formar una subpoblación de $Q/2$ (cada subpoblación aporta $0,16666 Q$ individuos)

2.9 Aplicar la operación de cruzamiento sobre los $Q / 2$ individuos seleccionados. Al realizar la operación de cruzamiento se obtendrán $0,3 Q$ individuos. De esta forma, existirán en total $0,8 Q$ individuos.

2.10 Se toman aleatoriamente $0,1 Q$ individuos de los $0,8 Q$ individuos creados y se mutan, generando una población de $0,9 Q$ individuos.

2.11 Se generan $0,1 Q$ individuos aleatoriamente. Estos individuos se toman del universo general de soluciones. De esta forma, se completa la primera nueva población, la cual está integrada por Q individuos.

2.12 Se procede a la conformación y ordenamiento de los individuos por frentes, realizando análisis de dominancia.

2.13 Se seleccionan los $Q / 2$ mejores individuos después de la organización de los frentes por análisis de dominancia.

2.14 Se determina la proporción de individuos por frente para los Q individuos que integran la primera nueva población. El valor de la proporción calculado se aplica a $0,3 Q$ individuos. En este caso, la cantidad de individuos establecidos por frente, denota el número de individuos que se deben obtener al cruzar de manera aleatoria aquellos

individuos que conforman cada uno de los mencionados frentes. Después de haber identificado los $0,3 Q$ individuos anteriores, se contará con un total de $0,8 Q$ individuos ($Q / 2$ individuos procedentes de los frentes y los últimos $0,3 Q$ obtenidos por cruzamiento).

2.15 Se toman aleatoriamente $0,1 Q$ individuos de los $0,8 Q$ individuos creados y se mutan generando una población de $0,9 Q$ individuos.

2.16 Se generan $0,1 Q$ individuos aleatoriamente. Estos individuos se toman del universo general de soluciones. De esta forma, se completa la segunda nueva población, la cual está integrada por Q individuos.

Los pasos 2.3 a 2.16 se repiten durante R iteraciones.

2.17 Se ordena la población final de respuesta por frentes, de acuerdo con lo indicado en el análisis de dominancia.

3. FUNCIONES.

A continuación se presentan las diferentes funciones que conforman el programa:

3.1 GenerarAleatorio()

Esta función se encarga de generar N individuos de 11 campos, de los cuales los 9 primeros campos corresponden al número del pedido (1 al 9), el campo 10 aloja la forma de organización por turnos, tomando para el caso valores del 1 al 3. Al respecto, el valor 1 representa un turno de 8 horas (6am-2pm), el valor 2 representa 2 turnos de 8 horas (6am-2pm, 2pm-10pm) y el valor 3 representa 3 turnos de 8 horas (24 horas).

Variables de entrada:

N: N es el número de individuos a generar, este valor se asigna por defecto al inicio del programa con un valor de 210.

Variables intermedias:

pi: vector de probabilidades para generar 9 números aleatorios, definido por defecto en el programa.

individuos: matriz de tamaño $N \times 9$ donde se almacena los individuos con el ordenamiento de los pedidos.

n_procesos: número de pedidos, definida internamente con un valor de 9, se utiliza como parámetro a la función *mnrnd()* que contiene el software matlab.

row: almacena un número generado aleatoriamente de 1 a 9, el número no se vuelve a repetir en la siguiente iteración. Se genera dentro de la función por `mnrnd()`.

col: utilizada por la salida de `mnrnd()` de matlab, no se toma en cuenta

nota: `mnrnd(c,prob,M)` retorna M vectores aleatorios escogidos de una distribución multinomial, con probabilidad Prob y número de columnas c.

Variables de Salida

cont: contador de frentes repetidos. Se utiliza en el algoritmo principal para verificar si todos los individuos generados son diferentes

mat: matriz de N x 11 de individuos. Se utiliza para crear una matriz similar llamada *matciclo* dentro del algoritmo principal.

En esta función se realizan los siguientes pasos:

1. Definir N=210, n_procesos=9, individuos(matriz de ceros 210 x 9), cont=0, y pi (matriz de probabilidades)
2. Para cada $i=1,2,\dots,N$; se generan 9 números aleatorios sin repetición y se almacenan en `individuos(i)`. Se obtiene al azar para cada individuo un número entero comprendido entre 1 y 3 para la forma de organización de los turnos. Se almacena `individuos(i,10)`.
3. Generar al azar para cada individuo un número entero comprendido entre 1 y 2, con el fin de agregar el trabajo dominical. Se almacena en `individuos(i,11)`.
4. Comparar uno a uno los individuos. Cada vez que se encuentre un individuo igual a otro, la variable *cont* aumentará.
5. Entregar dos variables de salida que son *cont* y la matriz de individuos.

La función anterior se apoya en la función:

3.2 igualesindi()

Esta función permite verificar los individuos repetidos en un conjunto de individuos almacenados en una matriz *mat*.

Variables de entrada:

mat: Matriz de individuos que se verificará mediante la aplicación de esta función.

Variables de salida:

contigu: Contador de individuos repetidos. Este contador sirve como alarma para avisar que se debe generar otro individuo, con el fin de remplazar el individuo que genera el conflicto.

La función es efectuada en los siguientes pasos:

1. Leer la matriz de entrada y la cantidad de individuos a comparar
2. Comparar los diferentes individuos entre ellos y de igual manera, proceder a aumentar el contador si encuentra alguno repetido.
3. Mostrar el contador como alarma para el programa principal.

3.3 Paso2()

Es la función encargada de realizar los elementos numerados desde el uno hasta el 16 en la descripción general del programa. La función Paso 2() enlaza las funciones anteriores exceptuando la función *GenerarAleatorio()*.

Variables de entrada

matciclo: Es una matriz de $N \times 11$ que se genera en la función *GenerarAleatorio()*,

Variables intermedias

tiemposg: matriz de proceso. Matriz generada por la función *cal_time_pro()*, es parámetro de entrada de las funciones *cal_pen_cos()* y *cal_pen_def()*.

cong: tiempo de procesamiento en horas de la matriz de procesos *tiemposg*. Es generada por la función *cal_time_pro()* y utilizado como parámetro de entrada de las funciones *cal_pen_cos()* y *cal_pen_def()*

subPoblacion1: contiene los primeros 70 elementos de *matciclo*, se utiliza para ser evaluada por la función *cal_time_pro()* y almacenar el tiempo de procesamiento para cada individuo.

subPoblacion2: contiene los 70 individuos intermedios de *matciclo*, se utiliza para ser evaluada por la función *cal_time_pro()* y *cal_pen_cos()*. Se obtienen dos valores: el tiempo de procesamiento y la penalización por mano de obra. Estos son posteriormente almacenados en la misma matriz.

subPoblacion3: contiene los 70 individuos finales de *matciclo*, se utiliza para ser evaluada por las funciones *cal_time_pro()* y *cal_pen_def()*. Se obtienen dos valores: el tiempo de procesamiento y la penalización por fracción defectuosa. Estos valores son posteriormente almacenados en la misma matriz.

Las tres subpoblaciones anteriores son utilizadas como parámetros de entrada para la función *ordenar()*.

pen: Valor de penalización por fracción defectuosa de cada individuo. Esta variable es generada por la función *cal_pen_def()*. Se utiliza para obtener una de las tres funciones objetivo (penalización por fracción defectuosa).

penalización: penalización por costo de mano de obra. Valor generado por la función **cal_pen_cos()**. Es almacenada en la matriz **Resultado(i,14)**.

Grupo1: Matriz que se genera internamente en *paso2()*. La matriz contiene 35 individuos de la subpoblación 1 escogidos aleatoriamente de las regiones inicial, intermedia y final de aquella matriz, en la cual se han eliminado el 20 % de los individuos con los mayores valores correspondientes a la variable tiempo de procesamiento.

Grupo2: Matriz que se genera internamente en *paso2()*. La matriz contiene 35 individuos de la subpoblación 2 escogidos aleatoriamente de las regiones inicial, intermedia y final de aquella matriz, en la cual se han eliminado el 20 % de los individuos con los mayores valores correspondientes a la variable penalización por costo de mano de obra directa.

Grupo3: Matriz que se genera internamente en *paso2()*. La matriz contiene 35 individuos de la subpoblación 3 escogidos aleatoriamente de las regiones inicial, intermedia y final de aquella matriz, en la cual se han eliminado el 20 % de los individuos con los mayores valores correspondientes a la variable penalización por fracción defectuosa.

subPoblacionSemi: Matriz en la cual se completan 168 individuos de la primera nueva población, así: 105 individuos provenientes de las 3 subpoblaciones iniciales (35 individuos provenientes de cada subpoblación) más 63 individuos obtenidos por medio de la operación de cruzamiento. Esta matriz es utilizada en las funciones: *apareamiento()* y *mutar()* y, *asimismo* contiene los 210 individuos de la primera nueva población.

Naparea1: primer individuo seleccionado al azar de los 105 individuos de la primera nueva población. Este individuo se cruza con *Naparea2* en la función denominada *apareamiento()*.

Naparea2: segundo individuo seleccionado al azar de los 105 individuos de la primera nueva población. Este individuo se cruza con *Naparea1* en la función denominada *apareamiento()*.

Hijos: matriz de 2 x tamaño del individuos. Se utiliza para almacenar los 2 hijos generados a partir de la operación de cruzamiento. Posteriormente, se almacena en la matriz *subPoblacionSemi()*.

Nmutar: número entero que permite identificar a uno de los 168 individuos de la *subPoblacionSemi()*, con el objetivo de proceder a su mutación.

cont2: contador de individuos repetidos. Se convierte en una alarma para reemplazar el individuo repetido por otro en la matriz *subPoblacionSemi()*.

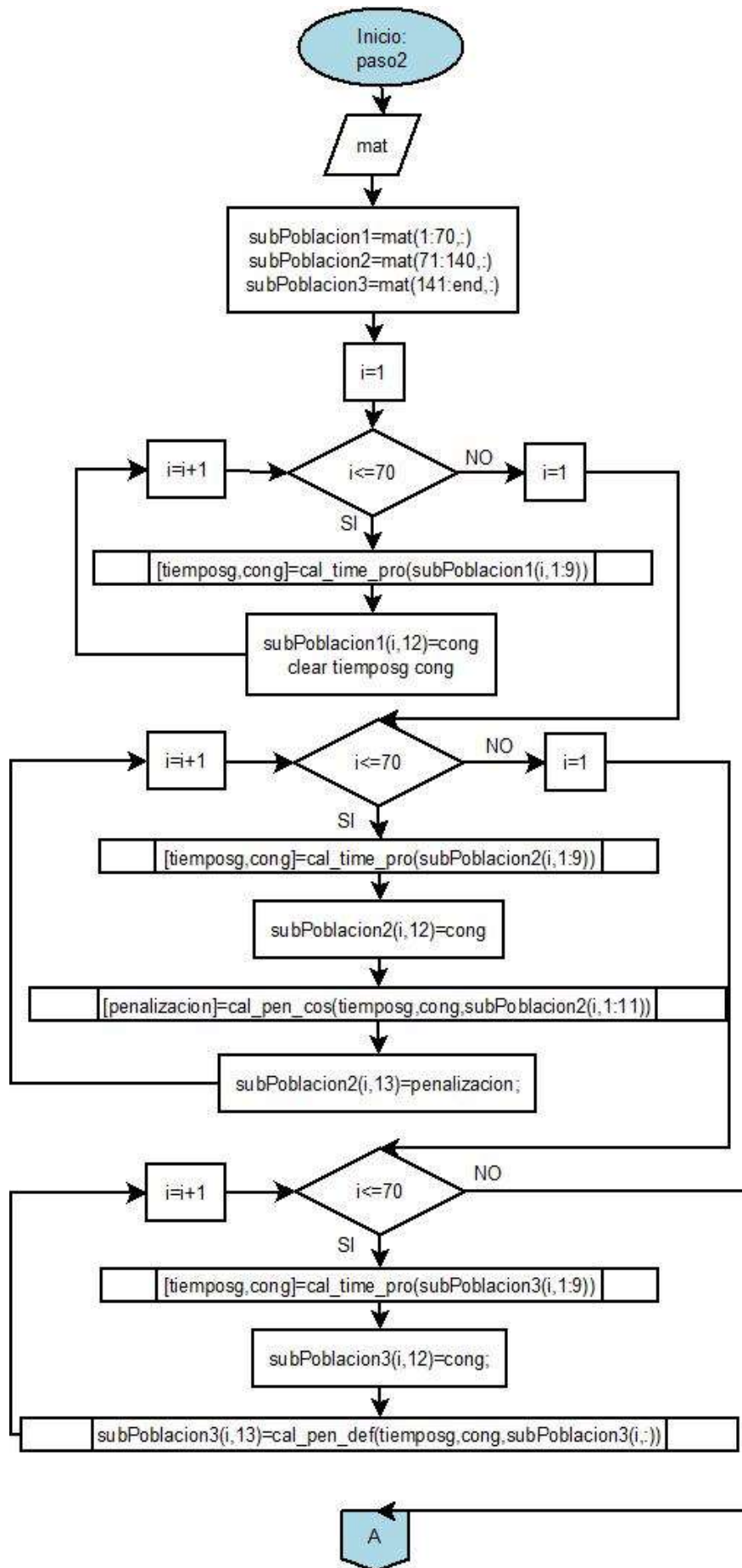
frente_final:

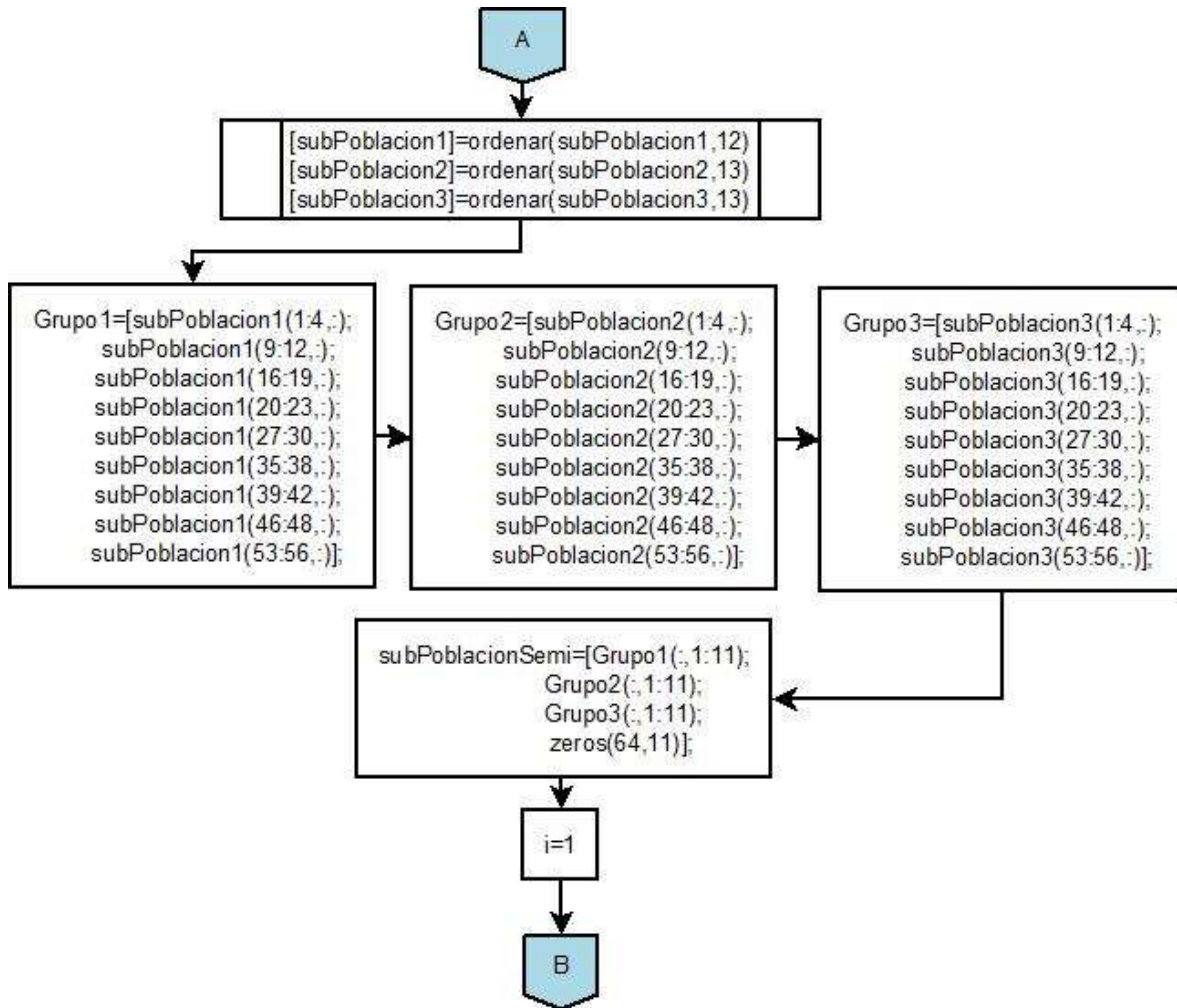
En la función *paso2()* se realizan los siguientes pasos

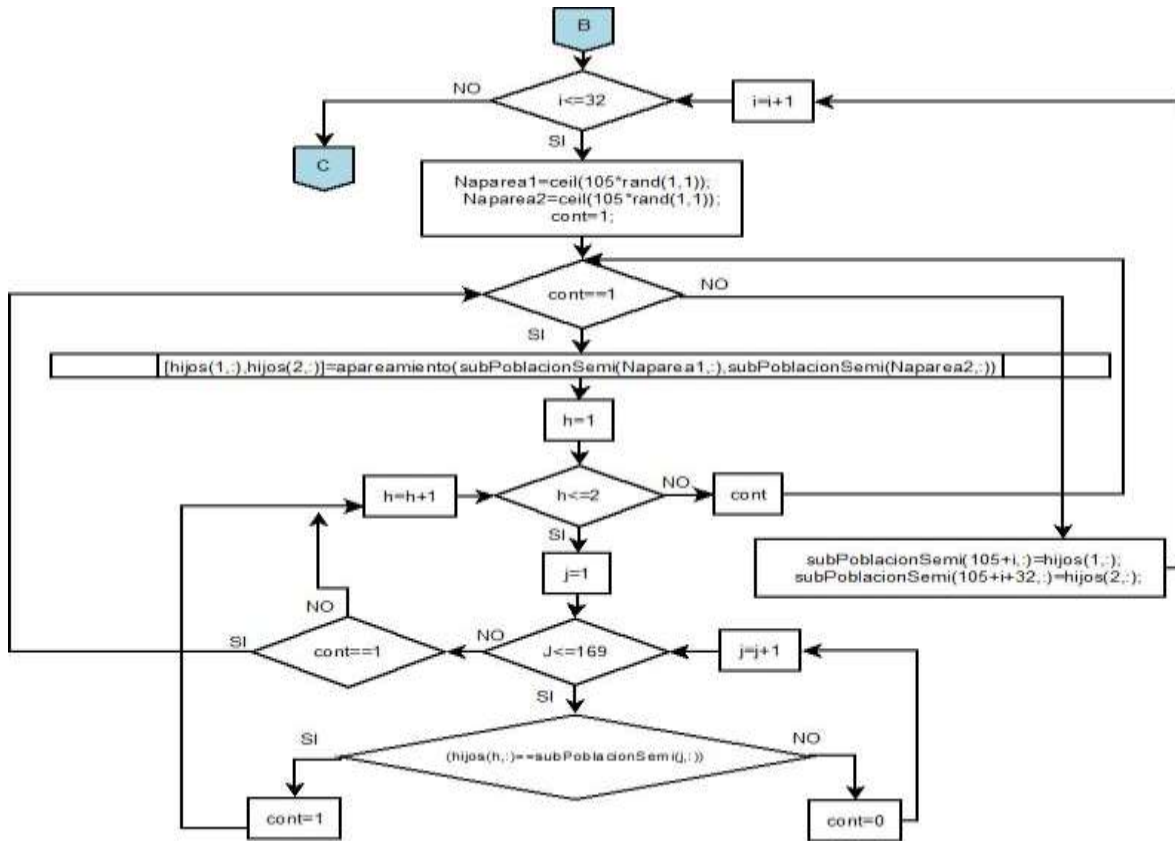
1. Identificar el parámetro de entrada de la población inicial
2. Dividir la población inicial en 3 subpoblaciones
3. Calcular el tiempo de procesamiento ($cal_time_pro()$ en: subpoblacion1, subpoblacion2 y subpoblacion3), la penalización por costo de mano de obra ($cal_pen_cos()$ en subpoblacion2) y la penalización por fracción defectuosa ($cal_pen_def()$ en subpoblación3).
4. Ordenar de menor a mayor los individuos evaluados en cada una de las subpoblaciones.
5. Extraer $0,1666 Q$ individuos de cada subpoblación.
6. Formar una subpoblación de $Q/2$ (cada subpoblación aporta $0,16666 Q$ individuos)
7. Aplicar la operación de cruzamiento sobre los $Q / 2$ individuos seleccionados. Al realizar la operación de cruzamiento se obtendrán $0,3 Q$ individuos. De esta forma, existirán en total $0,8 Q$ individuos.
8. Se toman aleatoriamente $0,1 Q$ individuos de los $0,8 Q$ individuos creados y se mutan, generando una población de $0,9 Q$ individuos.
9. Se generan $0,1 Q$ individuos aleatoriamente. Estos individuos se toman del universo general de soluciones. De esta forma, se completa la primera nueva población, la cual está integrada por Q individuos.
10. Se procede a la conformación y ordenamiento de los individuos por frentes, realizando análisis de dominancia.
11. Se seleccionan los $Q / 2$ mejores individuos después de la organización de los frentes por análisis de dominancia.
12. Se determina la proporción de individuos por frente para los Q individuos que integran la primera nueva población. El valor de la proporción calculado se aplica a $0,3 Q$ individuos. En este caso, la cantidad de individuos establecidos por frente, denota el número de individuos que se deben obtener al cruzar de manera aleatoria aquellos individuos que conforman cada uno de los mencionados frentes. Después de haber identificado los $0,3 Q$ individuos anteriores, se contará con un total de $0,8 Q$ individuos ($Q / 2$ individuos procedentes de los frentes y los últimos $0,3 Q$ obtenidos por cruzamiento).
13. Se toman aleatoriamente $0,1 Q$ individuos de los $0,8 Q$ individuos creados y se mutan generando una población de $0,9 Q$ individuos.
14. Se generan $0,1 Q$ individuos aleatoriamente. Estos individuos se toman del universo general de soluciones. De esta forma, se completa la segunda nueva población, la cual está integrada por Q individuos.

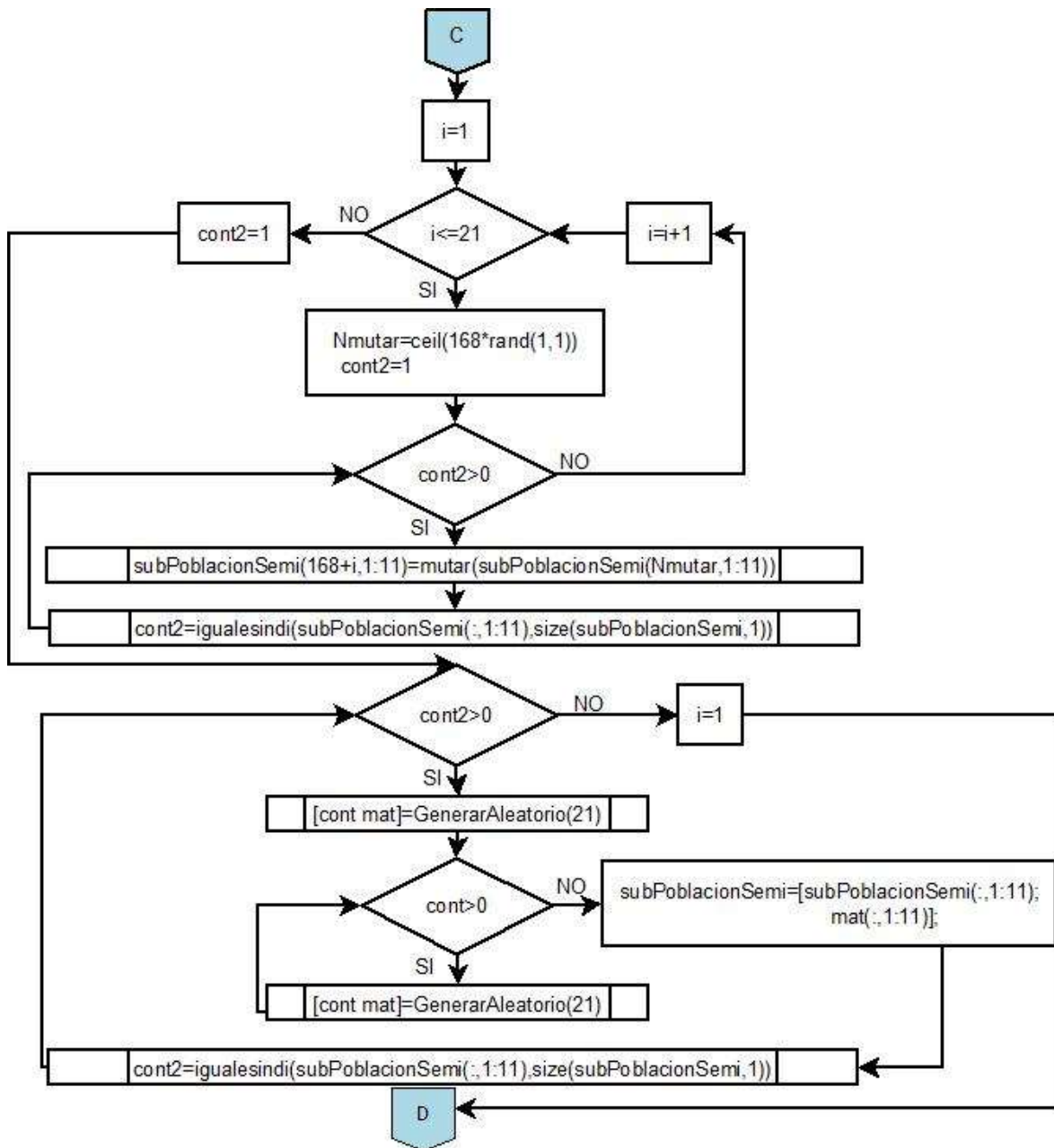
15. Se obtiene como salida una matriz final en la cual están organizados los individuos por frentes, el número del frente encontrado y la extensión de cada frente.

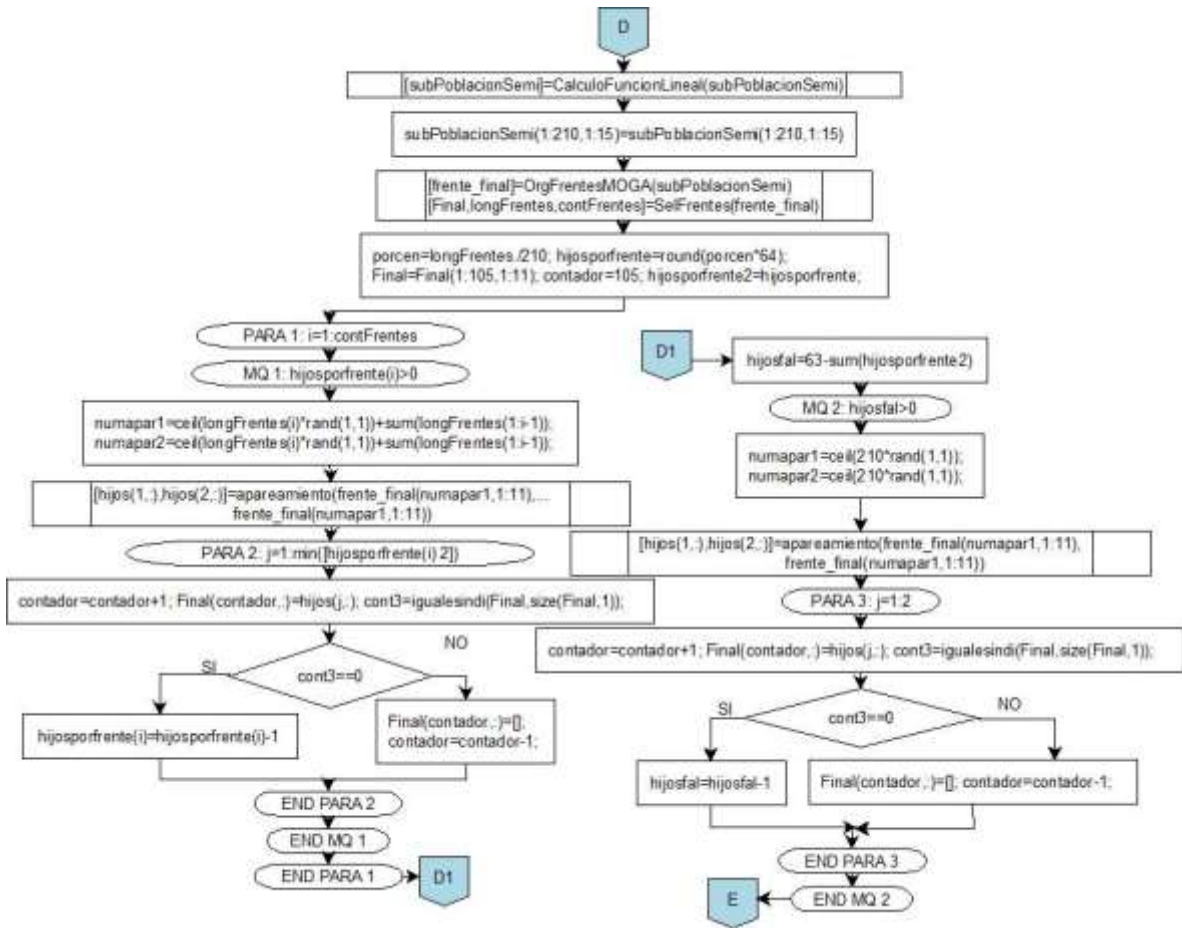
En el siguiente gráfico se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la función *paso2()*:











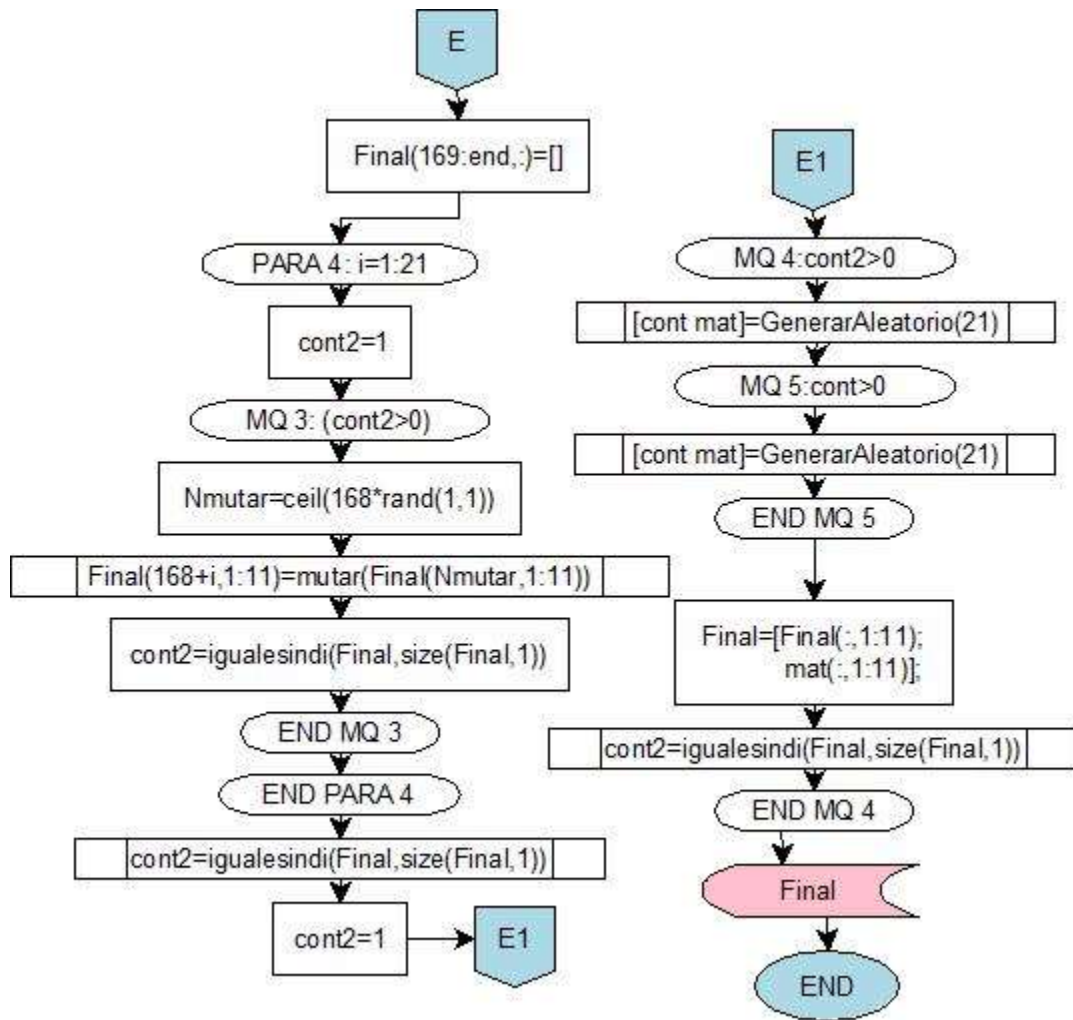


Figura 16. Diagrama de la función paso()

3.4 ordenar()

Es la función encargada de ordenar cada individuo de menor a mayor valor, de acuerdo con la variable evaluada. Para este efecto, la información a ordenar se ubica en la columna de criterio (*colum_crit*).

Variables de entrada

mat: Es la matriz que se organizará por una columna de criterio. Esta matriz se obtiene con *GenerarAleatorio()* y otras matrices que surgen de procesos intermedios en el código fuente.

colum_crit: Corresponde al número de la columna que será el criterio de evaluación, este número tiene que ser menor o igual al número total de columnas de la matriz *mat*.

Variables Intermedias.

n: Variable que contiene el número de filas de la matriz *mat*. Esta variable es utilizada para el control de la posición de ordenamiento dentro de la función *ordenar()*.

Variables de salida

mat: la función ordenar devuelve la matriz *mat* de entrada pero ordenada por la columna criterio.

Los pasos realizados en la función se muestran enseguida:

1. Leer la matriz de entrada y la columna del criterio.
2. Obtener el número de filas de la matriz
3. Comparar cada una de las filas con las demás e ir desplazando la mayor a la parte final del arreglo matricial por la columna de criterio.
4. Retornar la matriz de entrada, ordenada por la columna de criterio.

3.5 cal_time_pro()

Función encargada de calcular el tiempo de procesamiento para cada uno de los individuos de la población. Esta función se utiliza en el programa principal para generar la matriz de programación de pedidos.

Variables de entrada

orden: Vector de 9 posiciones que representa el ordenamiento de las operaciones correspondientes a los pedidos. Este vector se selecciona de 210 vectores generados aleatoriamente por la función.

Variables intermedias

datos: Matriz que contiene la estructura de los tiempos por operación de cada pedido.

Esta variable es utilizada para obtener la matriz de programación de los pedidos (*tiemposg*).

datosa: Matriz en la cual se almacena el orden de procesamiento de un pedido específico.

datosn: Matriz que contiene la duración de cada operación dependiendo de su ubicación en el individuo al que se le desea calcular el tiempo de procesamiento

difn: Vector que contiene la duración total de cada pedido.

c: Cantidad de máquinas para la operación.

tiempos: Matriz intermedia acumulativa de procesos, en la cual se van ordenando los pedidos dependiendo del individuo. Al finalizar esta matriz será renombrada como *tiemposg2*, la cual es una de las salidas de la función.

Variables de salida

tiemposg2: matriz de proceso. Matriz generada por la función *cal_time_pro()*. Esta variable es parámetro de entrada de las funciones *cal_pen_cos()* y *cal_pen_def()*.

cong: Variable generada por la función *cal_time_pro()* y utilizada como parámetro de entrada de las funciones *cal_pen_cos()* y *cal_pen_def()*.

La función *cal_time_pro()* incluye los siguientes pasos:

1. Leer el orden del pedido.
2. Asignar duración del tiempo de procesamiento por máquina, de acuerdo con el pedido.
3. Guardar los identificadores de cada máquina en una matriz de procesos
4. Guardar los tiempos de cada identificador de máquina en relación con la matriz de procesos.
5. Calcular el tiempo total de proceso de cada pedido.
6. Ordenar cada uno de los pedidos en las máquinas.
7. Generar matriz de procesos.
8. Calcular el tiempo total del proceso (*cong*)
9. Devolver estos valores de la función.

En el siguiente grafico se muestra el diagrama de flujo para la función *cal_time_pro*

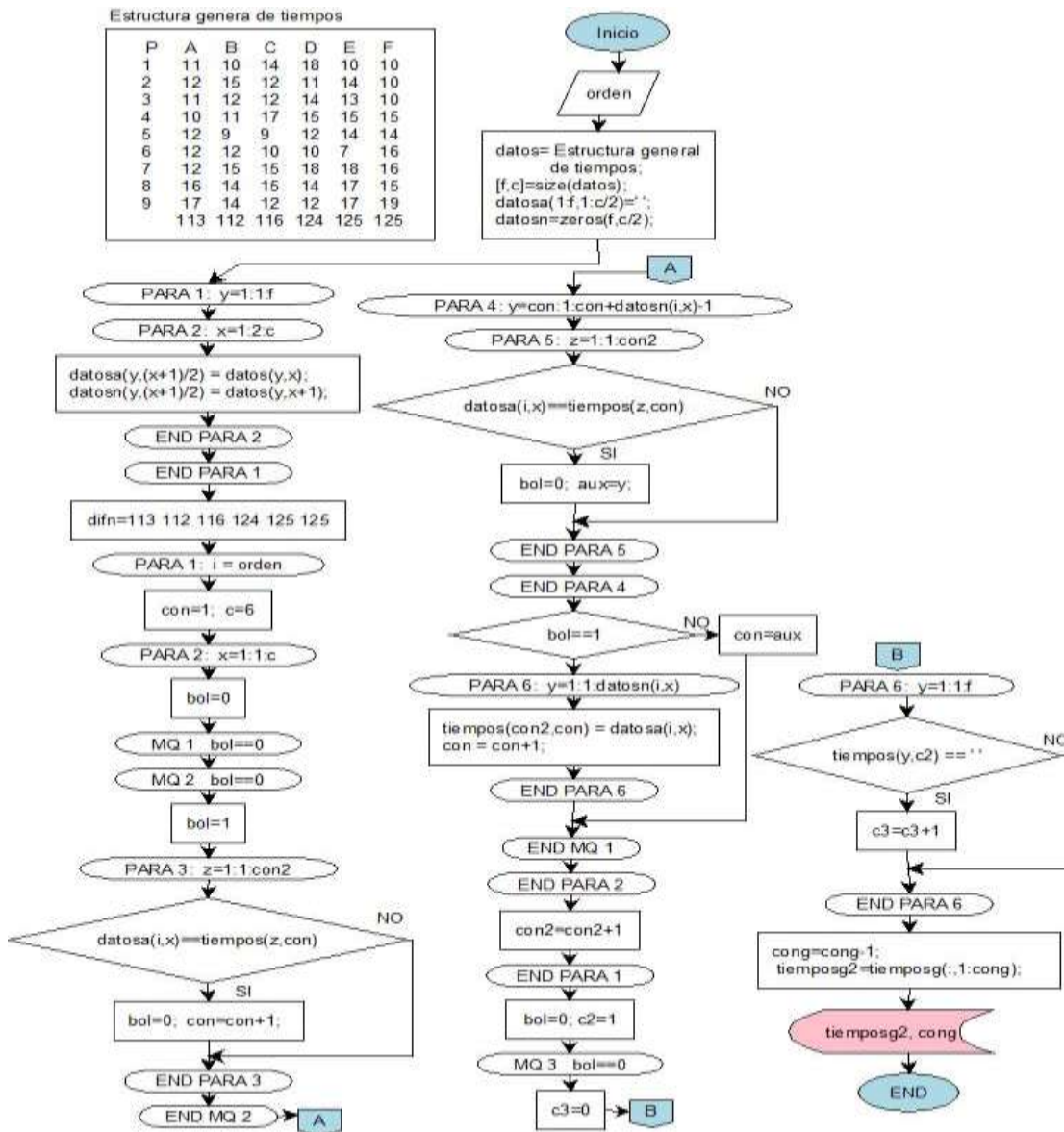


Figura 17. Diagrama de la función `cal_time_pro()`

3.6 `cal_pen_def()`

Función que se encarga de calcular la penalización por fracción defectuosa a cada uno de los individuos que conforman la respectiva subpoblación. Las salidas de la función se utilizan en la función `paso2()` como proceso intermedio para calcular la penalización por fracción defectuosa.

Variables de entrada

tiemposg: matriz de programación de pedidos. Matriz generada por la función `cal_time_pro()`, es parámetro de entrada de las funciones `cal_pen_cos()` y `cal_pen_def()`.

cong: tiempo de procesamiento en horas de la matriz de procesos tiemposg. Es un valor generado por la función *cal_time_pro()* y utilizado como parámetro de entrada de las funciones *cal_pen_cos()* y *cal_pen_def()*.

individuo: vector de 1 x 11. Estas 11 posiciones contienen: el orden de programación de los pedidos, la información de la organización por turnos de trabajo al igual que la indicación de laborar o no el día domingo. Cada fila de la matriz *mat* es un individuo.

Variables intermedias:

turnos: Número que señala cuantos turnos se trabajan en un día, esta variable puede tomar valores enteros de 1 a 3, indicando jornadas de trabajo de 8 horas (1), de 16 horas (2) o de 24 horas (3).

inicio: Variable que sitúa la hora de inicio de la penalización en el turno de interés. Por ejemplo, cuando se tiene un solo turno (6 a.m a 2 p.m), se penaliza en las horas 5, 6, 7 y 8 (10 a.m a 2 p.m). Por tanto, la variable de inicio tomará un valor de 5 (10 a.m), para indicar que se penaliza desde la hora 5. Se utiliza dentro de la función para identificar horas con penalización.

acti: Matriz en la cual se almacenan los procesos penalizados por turno.

num_penk: *k*(indica subíndice 1,2,...), variable en la cual se aloja el número de personas trabajando por hora específica de penalización durante todos los turnos.

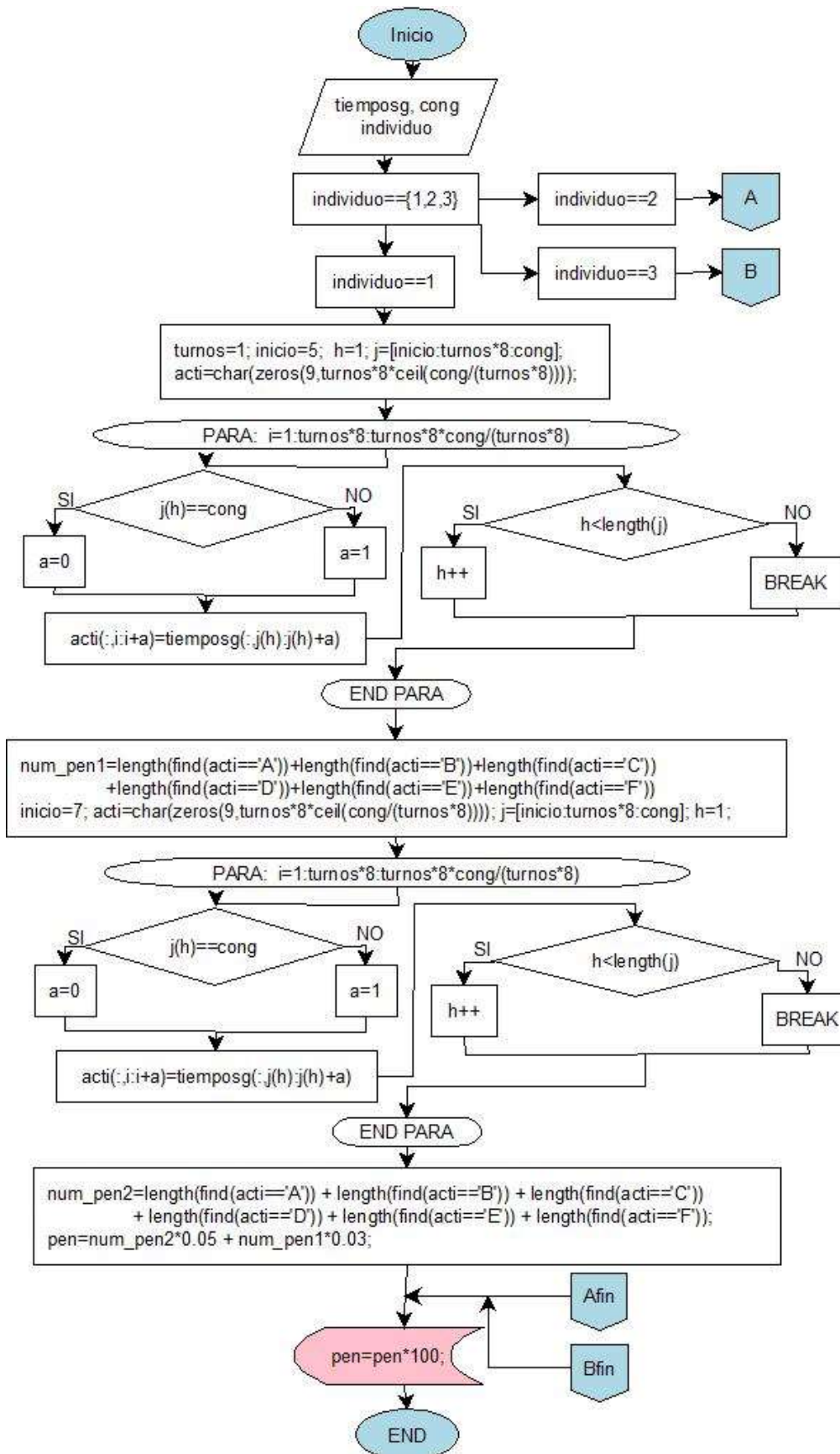
Variables de salida:

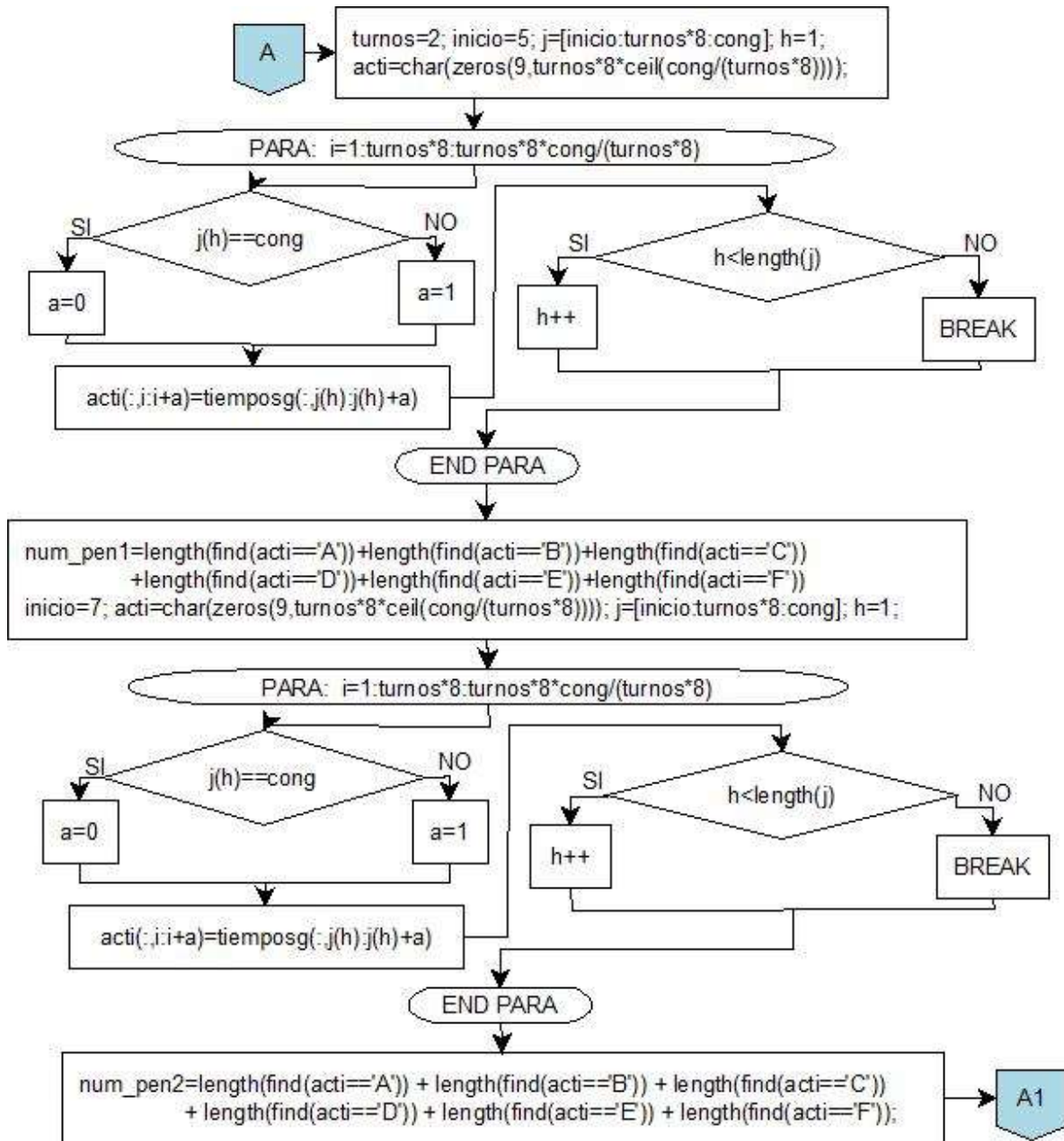
pen: Variable que se obtiene como único valor de salida de la función. Es un valor numérico, el cual proviene de la suma de penalizaciones *num_penk*, multiplicadas por el factor de penalización correspondiente.

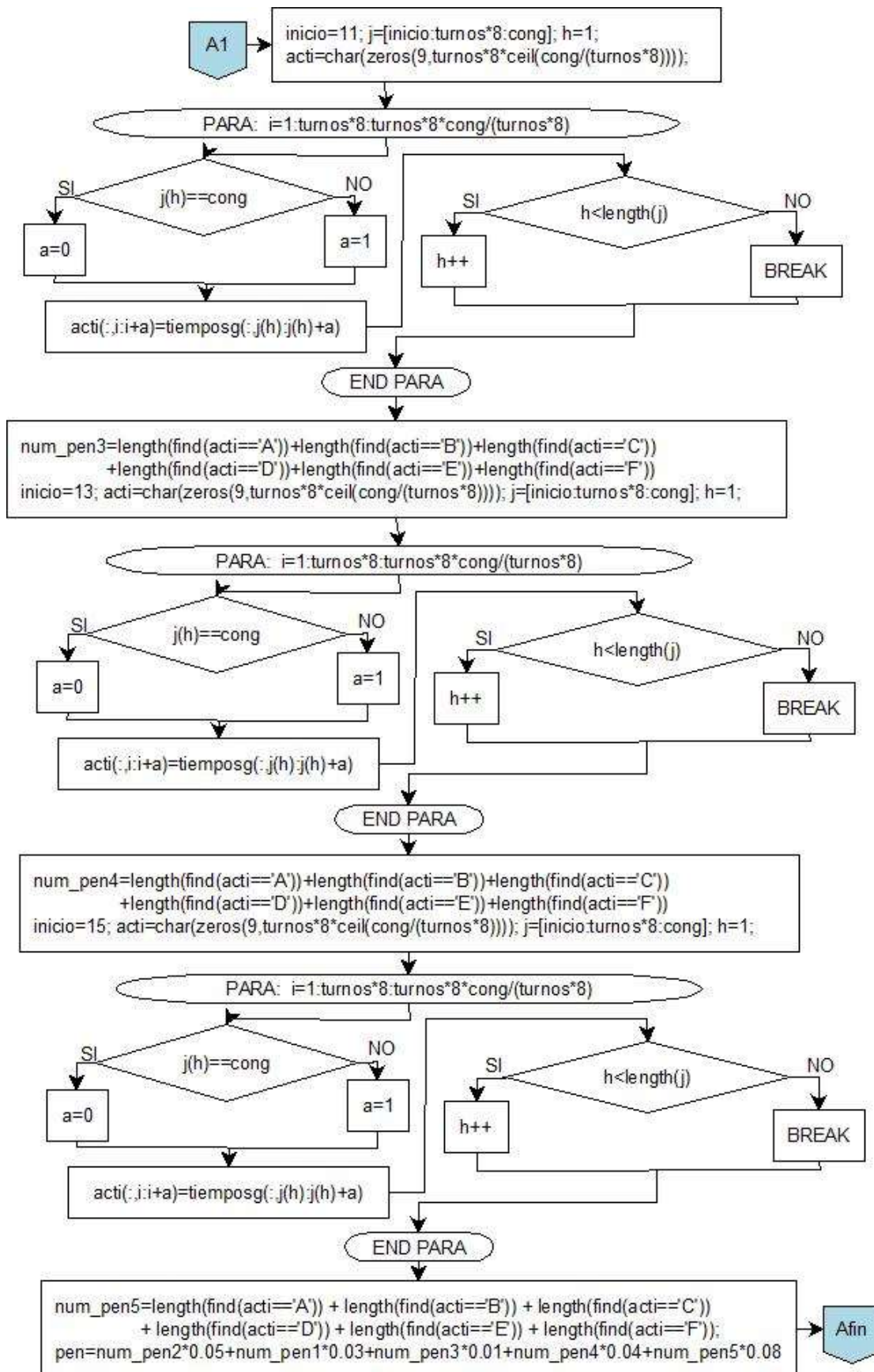
En la función *cal_pen_def* se realizan los siguientes pasos:

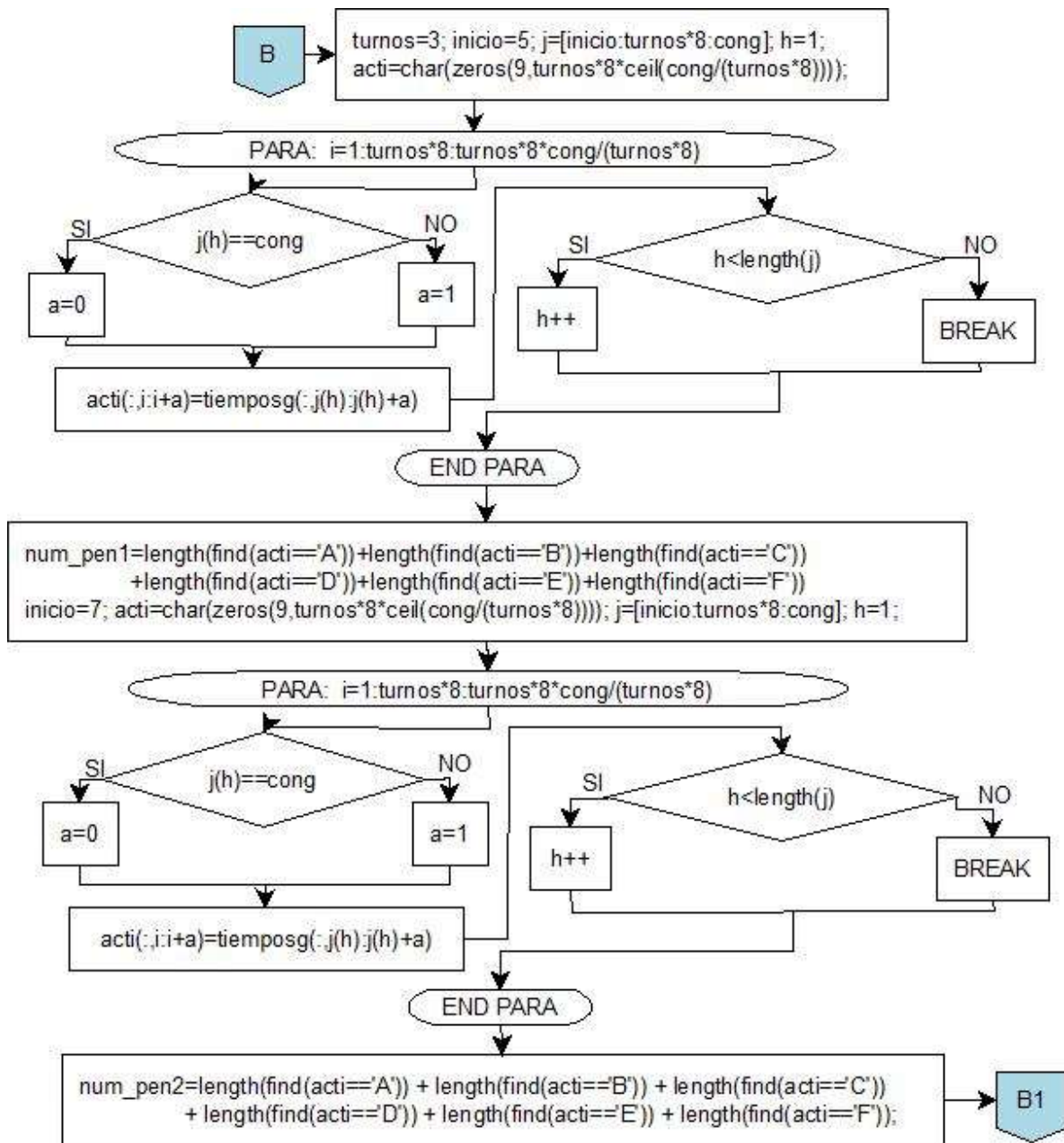
1. Leer tiemposg, cong e individuo a evaluar.
2. Identificar cuantos turnos se están trabajando, si: 1 (8 horas), 2 (16 horas) o 3 (24 horas)
3. Asignar valor de penalización de acuerdo con la hora del día.
4. Obtener el valor total de la penalización.
5. Devolver el valor de la penalización *pen* al programa principal.

En el siguiente grafico se muestra el diagrama de flujo para la función *cal_pen_def*









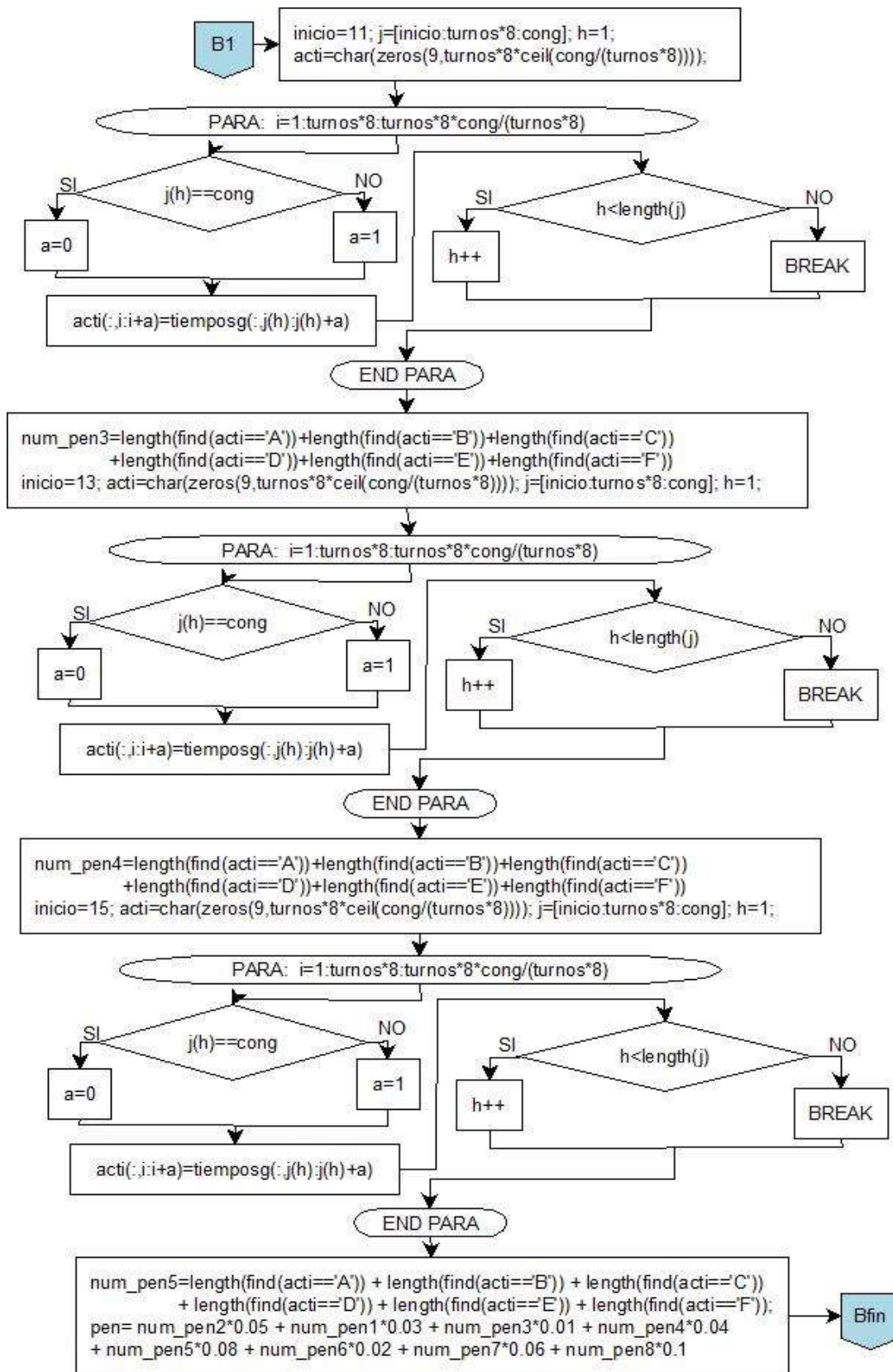


Figura 18. Diagrama de la función cal_pen_def()

3.7 cal_pen_cos()

Esta función se encarga de establecer la penalización por costo de obra a la matriz de individuos de entrada. Es utilizada como proceso intermedio para el cálculo de la penalización por costo de obra por la función *paso2()*.

Variables de entrada

tiemposg: matriz de programación de operaciones. Matriz generada por la función *cal_time_pro()*. Es un parámetro de entrada de las funciones *cal_pen_cos()* y *cal_pen_def()*.

cong: tiempo de procesamiento en horas de la matriz de procesos tiemposg. Es un valor generado por la función *cal_time_pro()* y utilizado como parámetro de entrada de las funciones *cal_pen_cos()* y *cal_pen_def()*.

orden: campos de la matriz individuo, en las cuales se almacena la información de la organización por turnos de trabajo al igual que la indicación de laborar o no el día domingo.

Variables de salida

penalizacion: valor de penalización por costo de mano de obra para cada individuo. Este valor proviene de la función *penalizacionCosto()*

Los pasos realizados en la función se muestran enseguida:

1. Leer tiemposg, cong y orden.
2. Identificar la forma de organización de los turnos para utilizar el valor 1,2 o 3 en la función *penalizacionCosto()*.
3. Identificar el trabajo dominical del individuo para utilizar el valor 1 (sin domingos) o 2 (con domingos) en la función *penalizacionCosto()*.
4. Enviar el valor correspondiente a la penalizacion por costo de mano de obra directa, desde la función *penalizacionCosto()* (*ubicada* al finalizar la función *cal_pen_cos()*) a la función que la requiera.

La anterior función se complementa a su vez con las siguientes funciones:

3.8 num_per()

Esta función se encarga de contar el máximo de personas por turno, con el propósito de penalizar los turnos que así lo requieran

Variables de entrada

tiemposg: matriz de procesos

Variables de salida

numPersonas: número de personas en los turnos de trabajo.

Los pasos realizados por la función se listan enseguida:

1. Leer la matriz de tiemposg.
2. Identificar cuantas personas se encuentran laborando por cada hora.
3. Sumar las personas del turno de 8 horas.
4. Generar el número de personas por turno de trabajo.

3.9 penalizacionCosto()

Esta función se encarga de realizar el cálculo interno de la penalización del costo de mano de obra directa en la función *cal_pen_cos()*.

Variables de entrada

tiemposg: matriz de programación, generada internamente por *cal_time_pro()* para cada individuo.

cong: tiempo de proceso (en horas) correspondiente a la matriz de programación *tiemposg*.

turno: variable que representa la forma de organizar las jornadas laborales, 1: 8 horas, 2: 16 horas y 3: 24 horas. Se utiliza para identificar la forma de separar la matriz de programación al momento de cuantificar el tiempo de proceso (en semanas).

csd: variable que indica si se labora o no el día domingo. Esta variable se utiliza para separar la matriz tiemposg al momento de penalizar.

Variables intermedias

numeroTurnos: variable que se calcula dividiendo el tiempo total de proceso (*cong*) entre 8 (8 horas de cada turno), para calcular el número de turnos de la matriz de procesos *tiemposg*.

contador: variable que se incrementa para ir descontando los turnos ya considerados en cada jornada de trabajo y, determinar así el número de personas laborando por turno.

numPer: Número de personas trabajando por turno, se utiliza al momento de penalizar turnos nocturnos y dominicales.

domingos: Número de domingos laborados durante el tiempo total de procesamiento. Esta variable es importante junto a la variable *contador* para establecer cuántos turnos se laboraron los días domingo.

nocturnos: Número de turnos nocturnos trabajados durante el tiempo total de procesamiento. Esta variable es importante junto a la variable contador para establecer cuántos turnos deben penalizarse con trabajo nocturno.

Variables de salida

penalizacion: Variable de salida de la función *penalizacionCosto()*. Esta variable contiene la suma de las penalizaciones por turnos nocturnos y dominicales.

La función *penalizacionCosto()* se realiza en los siguientes pasos:

1. Leer tiemposg, cong, turno y csd
2. Calcular el número de turnos en el proceso
3. Definir cuantas personas trabajan en turnos diurnos por turno(numPer), cuantas trabajan en turnos nocturnos , cuantas trabajan en turnos dominicales diurnos y cuantas mas trabajan en turnos nocturnos dominicales. La anterior información se utiliza para establecer el valor de la penalización como tal.
4. Definir el valor de la penalización dependiendo de la forma de organizar los turnos.
5. Sumar las penalizaciones
6. Transferir el valor de la función penalización a la función que lo esté demandando, en este caso *cal_pen_cos()*

En el siguiente gráfico se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la función *penalizacionCosto()*:

hijo1, hijo2: Dos individuos completamente nuevos diferentes a aquellos padres que los generaron. Se utilizan para completar las poblaciones con los mejores resultados después de varias iteraciones.

Los pasos que sigue la función *apareamiento()*, son:

1. Leer los dos individuos de entrada.
2. Seleccionar un punto de arranque para iniciar el apareamiento, el cual se cuenta desde el extremo izquierdo para el primer individuo y desde el lado opuesto para el segundo individuo.
3. Trasladar la parte derecha del primer individuo a la primera parte del segundo individuo.
4. Trasladar la parte izquierda del segundo individuo a la segunda parte del primer individuo.
5. Verificar que no existan pedidos repetidos. En caso de detectar la presencia de algún pedido repetido, se selecciona aleatoriamente una de las posiciones, reemplazándose por el pedido que está faltando
6. Cambiar los campos correspondientes a las casillas turno de trabajo o a laborar o no el día domingo, de acuerdo con las reglas ya descritas.
7. Retornar los dos individuos nuevos al programa principal.

En el siguiente gráfico se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la función *apareamiento()*:

3.11 DetectarIgualPedido()

Función utilizada para realizar cálculos intermedios en la función *apareamiento()*. Después de haberse efectuado el proceso de apareamiento, es la función encargada de verificar que no se repitan pedidos dentro del mismo individuo.

Variables de entrada

individuo: A esta función ingresan los individuos que se generan en la función *apareamiento()*.

Variables de salida

individuo: Retorna el individuo de entrada sin ningún tipo de cambio, dado que no se detecten pedidos repetidos; en caso contrario, corrige la posición asignando el pedido que falta.

Los pasos realizados en la función se muestran enseguida:

1. Leer el individuo de entrada.
2. Verificar que no se repitan los pedidos.
3. Cambiar el pedido repetido por el pedido que haga falta.
4. Verificar que ningún pedido se repita.
5. Entregar el individuo de entrada sin ningún pedido repetido.

En el siguiente gráfico se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la función `detectarigualpedido()`:

3.12 mutar()

Función que se encarga de mutar un individuo. Se utiliza para generar nuevos individuos con el propósito de completar las poblaciones de 210 individuos.

Variables de entrada

vector: Este vector representa a un individuo seleccionado al azar en el programa principal.

Variables intermedias

num1: Posición de partida de izquierda a derecha en la cual se inicia la mutación.

num2: Posición de partida de derecha a izquierda para mutar con la primera posición.

num3: Número Aleatorio para cambiar la forma de organizar los turnos, dado que se deba intercambiar la posición de un turno con la posición de un pedido.

num4: Número Aleatorio para cambiar la forma de trabajo dominical, dado que se deba intercambiar la posición de la labor sin o con dominical con la posición de un pedido.

temp: Valor temporal para almacenar uno de los valores mientras se intercambian las posiciones

Variable de salida

vector: Individuo mutado.

Los pasos que sigue el algoritmo son:

1. Leer el individuo
2. Seleccionar al azar dos puntos de partida, de izquierda a derecha y de derecha a izquierda
3. Cambiar las posiciones siempre y cuando deban moverse entre ellas dos pedidos. Dado que se haya señalado como primer campo un pedido y como segundo campo la casilla correspondiente al turno de trabajo o a laborar o no el día domingo, se omite el

posi1, posi2: Son variables apuntadoras para comparar dos individuos.

Dominados: Matriz en la cual se almacenan las posiciones de los individuos que son dominados por otros individuos.

Po_Frente1: Matriz en la cual se almacenan los individuos que no son dominados por la primera función objetivo.

Po_Frente2: Matriz en la cual se almacenan los individuos que no son dominados por la segunda función objetivo.

Po_Frente3: Matriz en la cual se almacenan los individuos que no son dominados por la tercera función objetivo.

Frente1: Matriz en la cual se almacenan los frentes que no son dominados por otros frentes al inicio y frentes que no son dominados por un rango inferior.

Variables de salida:

Pobla_Frentes: Es la matriz que contiene a todos los individuos organizados por el frente de pertenencia en orden ascendente. Esta respuesta se utiliza en la función *paso2()* y en programa principal de moga y vega.

Esta función se realiza en los siguientes pasos:

1. Leer la matriz de población de individuos.
2. Evaluar para cada uno de los individuos: el tiempo de procesamiento en semanas y decidir si es o no dominado por otros individuos, el costo de mano de obra de cada individuo y decidir si es o no dominado por otros individuos al igual que el valor de fracción defectuosa y decidir si es o no dominado por otros individuos.
3. Clasificar dominados y no dominados.
4. Repetir los pasos 2 y 3 hasta completar todos los individuos.
5. Retornar la matriz de entrada después de haberse organizado por frentes según el método MOGA.

En el siguiente gráfico se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la función *orgFrentesMoga()*:

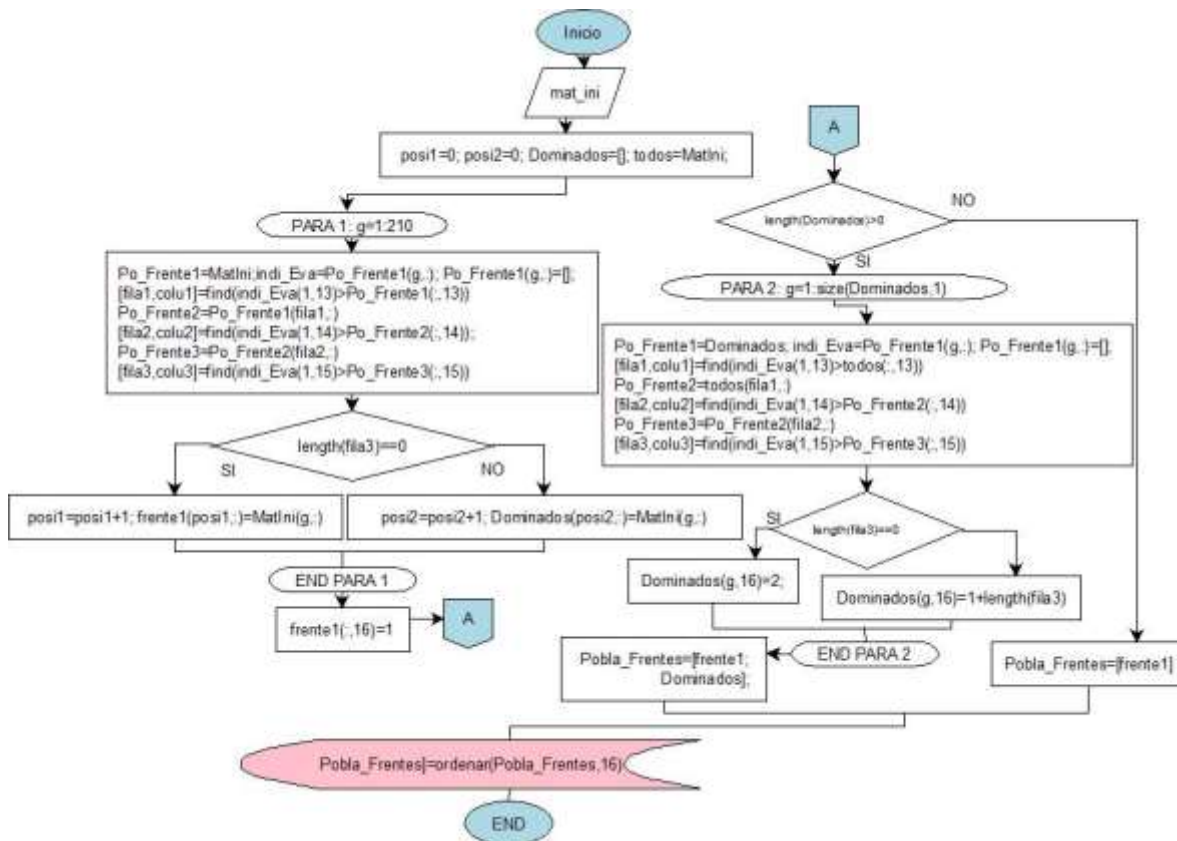


Figura 21. Diagrama de la función orgFrentesMoga()

La anterior función se complementa con la siguiente función:

3.14 OrdenTsieFrentes()

Función encargada de ordenar los frente de forma ascendente por tiempo de procesamiento en semanas y por frentes.

Variables de entrada:

Mat: Matriz de individuos que contiene los frentes para ser organizados. Esta variable se genera dentro del programa.

Variables intermedias:

FrenteMax: Variable que contiene el valor del frente de mayor grado.

Indices: Posiciones donde están los frentes de igual rango para ser agrupados.

Ini: Variable que apunta al inicio de cada frente.

Fi: Variable que apunta al final de los frentes a ser agrupados.

Variables de salida:

MatrizSalida: Matriz que contiene el ordenamiento de los frentes por tiempo en semanas y por frente.

A la función le corresponden los siguientes pasos:

1. Leer la matriz de frentes.
2. Identificar cada rango de frentes.
3. Ordenar por tiempo de procesamiento en semanas cada rango.
4. Devolver una matriz ordenada por frentes y por tiempo de procesamiento en semanas al programa o función desde los cuales se realizó el llamado

En el siguiente gráfico se muestra el diagrama de flujo correspondiente a la función *OrdenTsieFrentes()*:

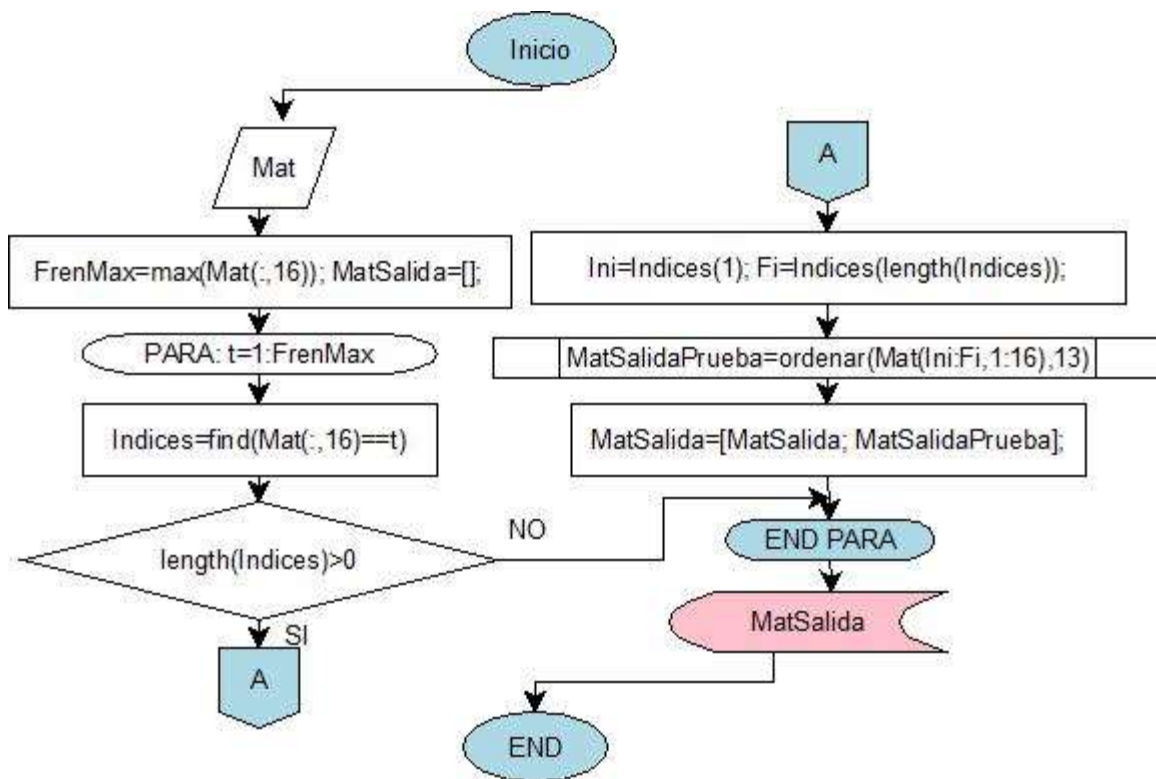


Figura 22. Diagrama de la función OrdenTsieFrentes()

C ANEXO 3.

MANUAL DE USUARIO

CONTENIDO

Requisitos del sistema.
Instalación
Interfaz de trabajo de Matlab.
 Barras de menús.
 Current folder.
 Editor
 Command Windows
 Command History
 Workspace
Interfaz.
Ejecución del programa.

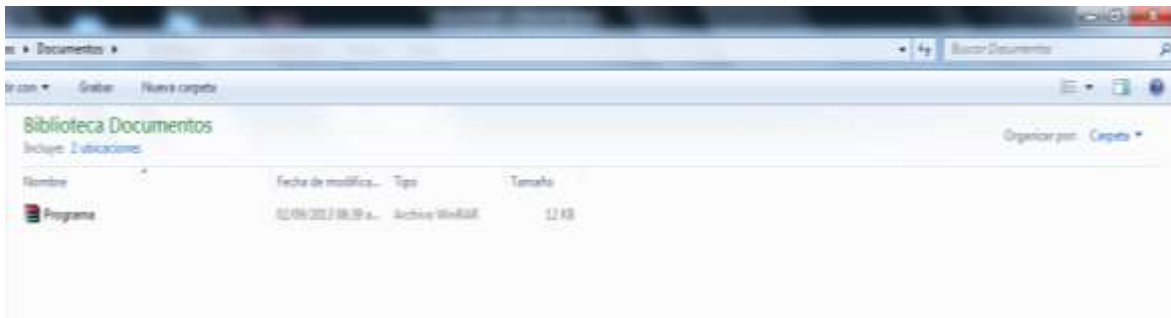
Requisitos del sistema

El programa, está elaborado en Matlab, para ejecutarlo se debe tener instalado Matlab versión 2009 o posterior.

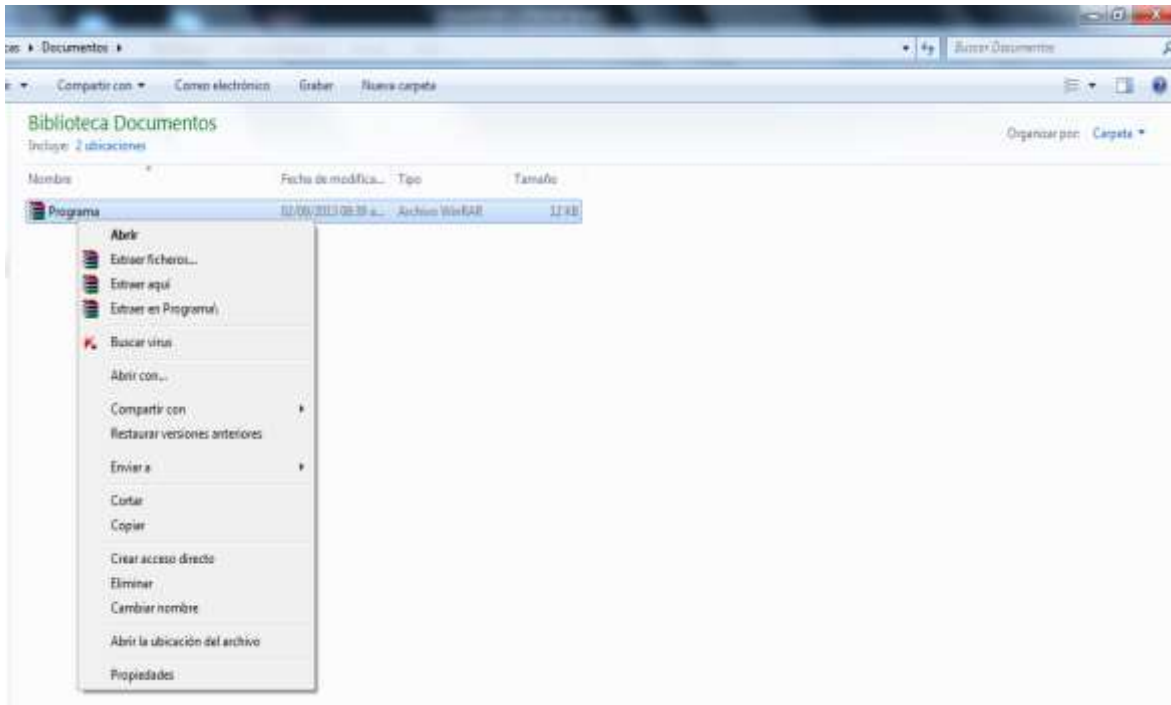
Adicionalmente el programa ocupa al menos 5 MB en disco duro y, durante su ejecución puede generar documentos que ocupan otros 5 MB.

Instalación

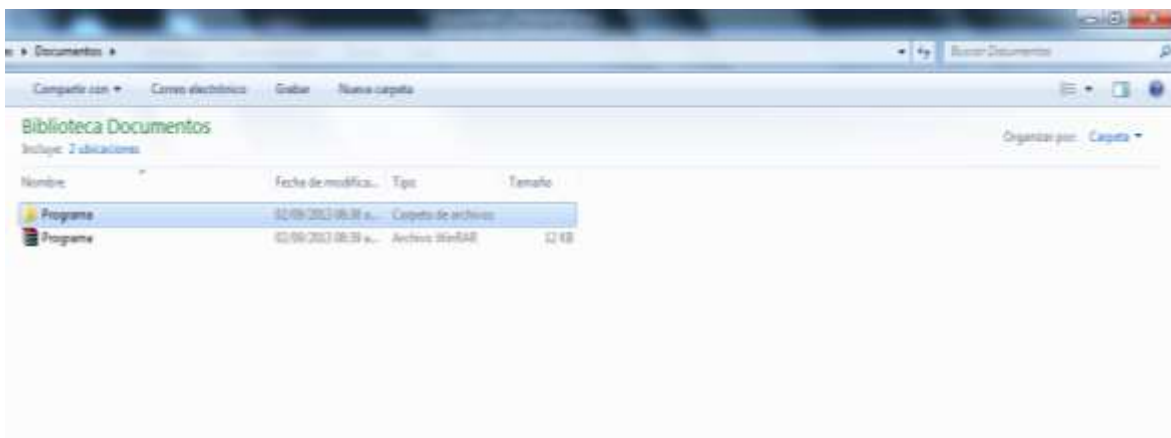
1. Se debe colocar el archivo Programa.rar, en una carpeta o dirección de almacenamiento cualquiera, se recomienda que esta ruta sea lo más corta posible, por ejemplo "D:\Programa.rar"



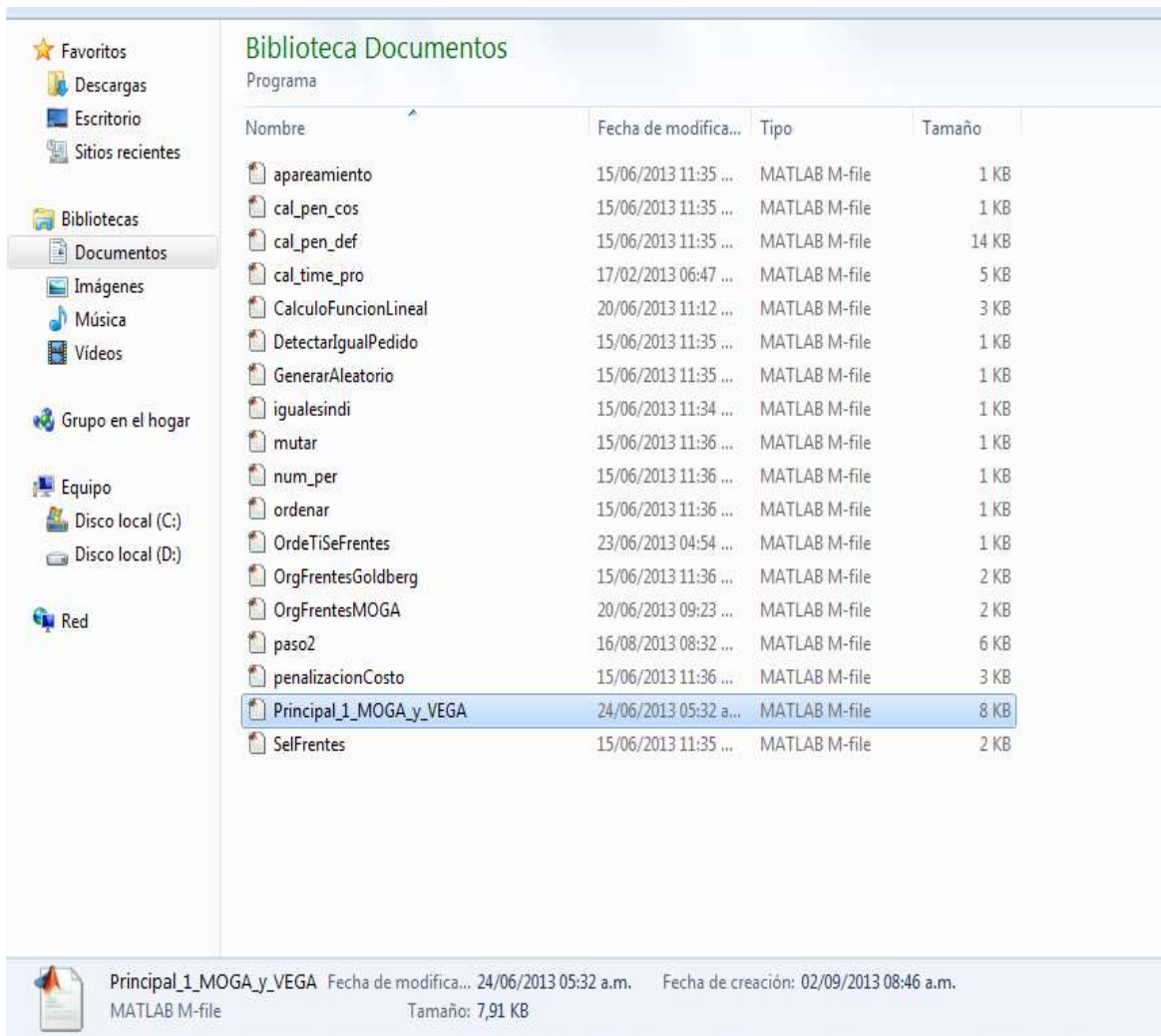
2. Se presiona click derecho sobre el archivo y se despliega un menú de opciones. En este punto se selecciona la opción extraer.



3. Después de ejecutar el paso anterior, se creará una carpeta llamada Programa en la misma dirección, en la cual se tenía almacenado el archivo.



4. Se presiona click sobre la carpeta que se acaba de crear para acceder a ella. A continuación podremos ver una serie de archivos como los mostrados en la siguiente imagen:



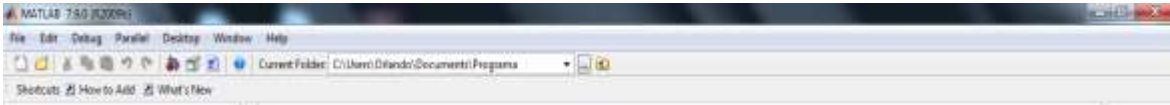
Estos archivos son una serie de funciones necesarias para el funcionamiento del programa. Por tanto no deben ser removidas de este lugar, ni eliminadas. El programa principal se llama “Principal_1_MOGA_y_VEGA.m”. Se señala el programa con el apuntador del ratón y se presiona doble click para abrirlo. El programa comenzará a abrirse en la versión que exista instalada en el ordenador. Una vez realizado el paso anterior, se espera a que aparezca la interfaz de Matlab.

Interfaz de trabajo de Matlab.

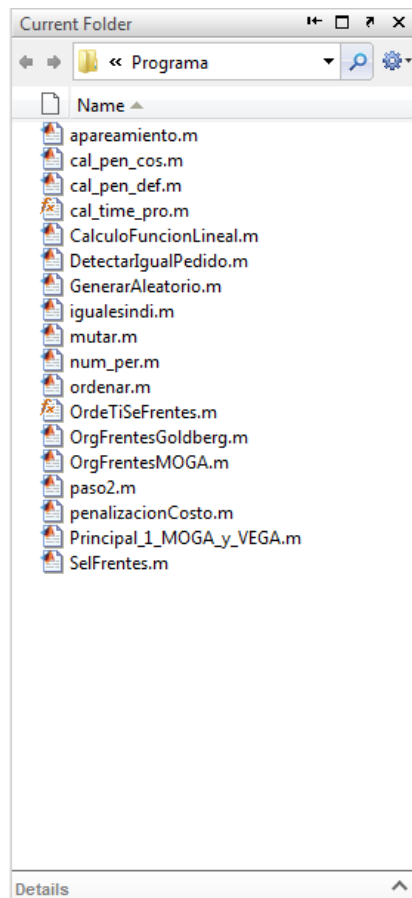
Esta interfaz está conformada por varias ventanas que se explican a continuación:

1. Barras de menús: estas barras se encuentran en la parte superior de la ventana de Matlab, en ella están ubicadas las opciones principales de funcionamiento de

Matlab, tales como, abrir, cerrar, nuevo archivo. Además se puede encontrar la dirección de almacenamiento del ordenador en el cual se está trabajando.

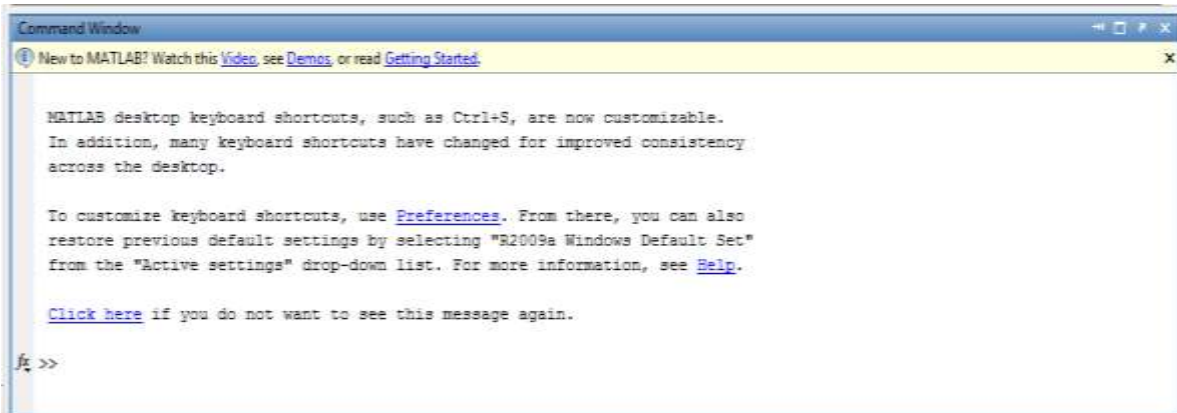


2. Current Folder: Esta es una ventana de Matlab, en la cual se encuentran los archivos que contiene la carpeta utilizada en el momento. Mediante esta herramienta, se puede navegar integralmente por la información almacenada en el computador. La ventana presenta esencialmente una lista de archivos que Matlab cargará al momento de ejecutar el programa. Generalmente se muestran funciones de Matlab, archivos adicionales de configuración de Matlab, entre otros.

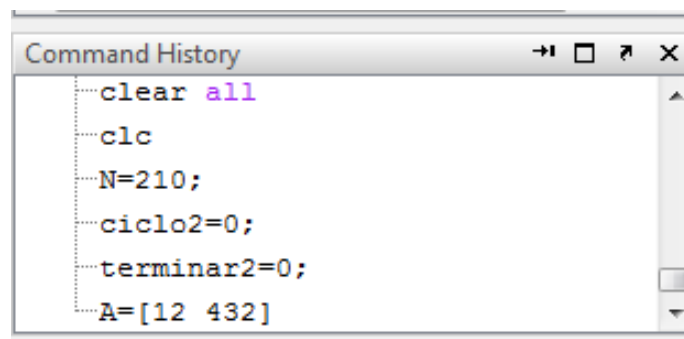


3. Editor: En esta ventana se crean los programas, se guarda el código y puede ser visualizado su contenido.

4. Command Windows: En esta ventana se monitorean cada una de las instrucciones elaboradas; además, se pueden ejecutar funciones en ella. En términos generales, es la ventana de ejecución de las instrucciones de MATLAB.



5. Command History: Contiene el registro de los comandos que se han ejecutado en el Command Windows.




6. Workspace: Contiene la descripción de las variables usadas en cada sesión. Inicialmente, se sugiere dejar activa únicamente la ventana de comandos, cerrando las otras ventanas con el ícono.

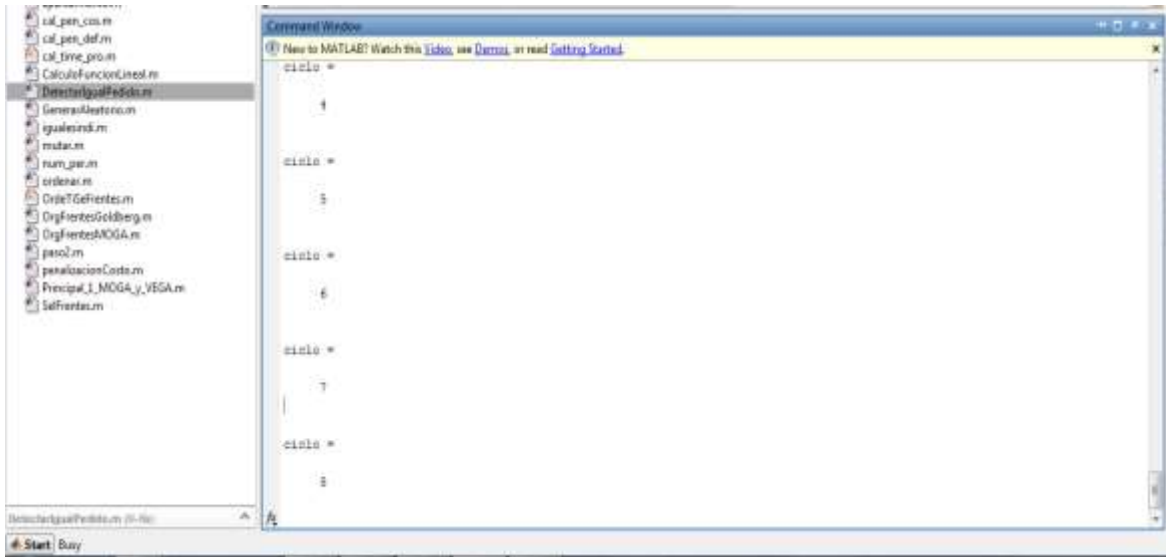
Name	Value	Min
Final	<210x11 double>	1
N	210	210
Resultado	<210x19 double>	0
Resultado01	<210x15 double>	0
Resultado02	<210x19 double>	0
Resultado03	<210x16 double>	0
Resultado04	<210x15 double>	0
Resultado11	<210x15 double>	0
Resultado12	<210x16 double>	0
Resultado13	<210x15 double>	0
Resultado20	<210x19 double>	0
Resultado21	<210x19 double>	0
Resultado30	<210x15 double>	0
Resultado31	<210x16 double>	0
ciclo	2	2
ciclo2	2	2
cong	183	183
cont	0	0
horas	<1x183 double>	1
mat	<210x11 double>	1
matciclo	<210x11 double>	1
minn	162	162

Interfaz

La interfaz del programa es sencilla, solo debe ser puesto en marcha, no requiere interacción con el usuario.

Ejecución del programa

1. Una vez reconocida las principales partes de la interfaz de Matlab, se pasa a observar el Editor. El programa debe estar abierto en el editor. Para ejecutar el programa se presiona click en el siguiente botón , el cual corresponde a correr el programa.
2. El programa empezará a ejecutar el algoritmo diseñado, de acuerdo a la cantidad de iteraciones que se requieran. En la ventana del Command Windows se visualizará el conteo de iteraciones.



Nota: Adicionalmente con el propósito de identificar el estado de Matlab, es decir, si está o no ocupado, el programa genera en la parte inferior izquierda de su interfaz, las expresiones: “Busy” si está Ocupado o “Ready” si está listo para comenzar. En la imagen anterior se aprecia la expresión “Busy”, debido a que se está ejecutando el programa.

3. Una vez se termine de correr el algoritmo, se mostrará el siguiente mensaje:

“Por favor, espere un momento mientras se están creando sus archivos...
Gracias.”

4. En este punto el programa ya terminó de correr completamente el algoritmo, solo se encuentra creando los archivos con extensión “.xls”, para su posterior análisis.



Nota: Podría ocurrir el evento en el cual Matlab genere un mensaje de advertencia similar al siguiente:

Warning: Added specified worksheet.

> In xlswrite>activate_sheet at 285

In xlswrite>ExecuteWrite at 249

In xlswrite at 207

In Principal_1_MOGA_y_VEGA at 156

El anterior mensaje es normal, sólo indica que se está adicionando una nueva hoja al archivo .xls que se ha creado, de acuerdo con lo ilustrado en la siguiente imagen.



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
2
Por favor, espere un momento mientras se estan creando sus archivos...
Gracias.
Warning: Added specified worksheet.
> In xlswrite>activate\_sheet at 285
   In xlswrite>ExecuteWrite at 249
   In xlswrite at 207
   In Principal\_1\_MOGA\_y\_VEGA at 97
Warning: Added specified worksheet.
> In xlswrite>activate\_sheet at 285
   In xlswrite>ExecuteWrite at 249
   In xlswrite at 207
   In Principal\_1\_MOGA\_y\_VEGA at 109
```

5. Una vez finalizado el programa, se observará el siguiente mensaje:

Archivos creados satisfactoriamente.

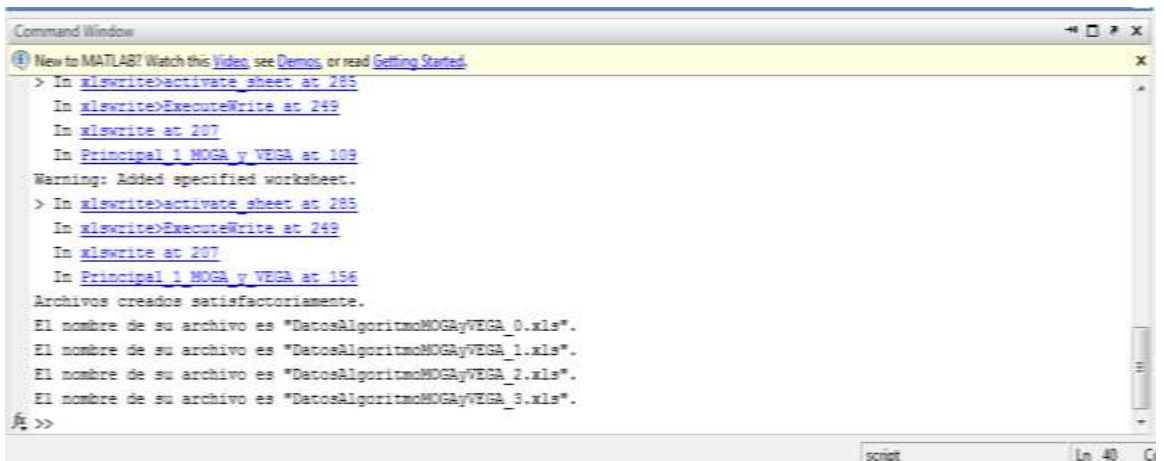
El nombre de su archivo es "DatosAlgoritmoMOGAyVEGA_0.xls".

El nombre de su archivo es "DatosAlgoritmoMOGAyVEGA_1.xls".

El nombre de su archivo es "DatosAlgoritmoMOGAyVEGA_2.xls".

El nombre de su archivo es "DatosAlgoritmoMOGAyVEGA_3.xls".

El mensaje anterior indica que los resultados se encuentran en los archivos creados. Los archivos están ubicados en la misma ruta de almacenamiento del programa en el ordenador. A continuación se muestra la respectiva imagen:



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
> In xlswrite>activate\_sheet at 285
   In xlswrite>ExecuteWrite at 249
   In xlswrite at 207
   In Principal\_1\_MOGA\_y\_VEGA at 109
Warning: Added specified worksheet.
> In xlswrite>activate\_sheet at 285
   In xlswrite>ExecuteWrite at 249
   In xlswrite at 207
   In Principal\_1\_MOGA\_y\_VEGA at 156
Archivos creados satisfactoriamente.
El nombre de su archivo es "DatosAlgoritmoMOGAyVEGA_0.xls".
El nombre de su archivo es "DatosAlgoritmoMOGAyVEGA_1.xls".
El nombre de su archivo es "DatosAlgoritmoMOGAyVEGA_2.xls".
El nombre de su archivo es "DatosAlgoritmoMOGAyVEGA_3.xls".
>>
```


D ANEXO 4.**POBLACIÓN FINAL DE RESPUESTA (MÉTODO UNO)**

A continuación se presenta la población final de respuesta obtenida después de aplicar el método uno:

Tabla 87. Población resultado (método uno).

Número Individuo	Tiempo de proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo de proceso (semanas)	Penalización por costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)
1	159	24	7	0,9464	2.380	2258
2	159	24	7	0,9464	2.415	2241
3	181	24	7	1,0774	3.420	2225
4	159	24	6	1,1042	1.120	2258
5	189	24	7	1,1250	3.195	2239
6	195	24	7	1,1607	3.050	2231
7	196	24	7	1,1667	3.010	2216
8	208	24	7	1,2381	3.310	2196
9	216	24	7	1,2857	2.980	2236
10	189	24	6	1,3125	1.085	2239
11	196	24	6	1,3611	1.085	2249
12	196	24	6	1,3611	1.085	2243
13	204	24	6	1,4167	1.085	2247
14	204	24	6	1,4167	1.120	2236
15	204	24	6	1,4167	1.120	2231
16	159	16	7	1,4196	675	1819
17	183	16	7	1,6339	525	1846
18	185	16	7	1,6518	525	1843
19	159	16	6	1,6563	0	1819
20	189	16	7	1,6875	750	1806
21	189	16	7	1,6875	525	1816
22	191	16	7	1,7054	750	1815
23	198	16	7	1,7679	675	1813
24	198	16	7	1,7679	600	1814
25	206	16	7	1,8393	750	1807
26	206	16	7	1,8393	525	1802
27	211	16	7	1,8839	525	1812
28	181	16	6	1,8854	0	1844
29	196	16	6	2,0417	0	1809
30	198	16	6	2,0625	0	1791
31	204	16	6	2,1250	0	1826
32	206	16	6	2,1458	0	1816
33	211	16	6	2,1979	0	1795

Número Individuo	Tiempo de proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo de proceso (semanas)	Penalización por costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)
34	213	16	6	2,2188	0	1824
35	224	16	6	2,3333	0	1872
36	224	16	6	2,3333	0	1819
37	225	16	6	2,3438	0	1837
38	230	16	6	2,3958	0	1814
39	231	16	6	2,4063	0	1822
40	244	16	6	2,5417	0	1836
41	256	16	6	2,6667	0	1827
42	259	16	6	2,6979	0	1801
43	184	8	7	3,2857	900	1412
44	159	8	6	3,3125	0	1411
45	194	8	7	3,4643	900	1400
46	201	8	7	3,5893	825	1399
47	207	8	7	3,6964	975	1389
48	189	8	6	3,9375	0	1407
49	189	8	6	3,9375	0	1388
50	193	8	6	4,0208	0	1391
51	197	8	6	4,1042	0	1399
52	198	8	6	4,1250	0	1400
53	234	8	7	4,1786	975	1380
54	201	8	6	4,1875	0	1404
55	202	8	6	4,2083	0	1403
56	203	8	6	4,2292	0	1417
57	203	8	6	4,2292	0	1413
58	207	8	6	4,3125	0	1402
59	211	8	6	4,3958	0	1395
60	222	8	6	4,6250	0	1399
61	226	8	6	4,7083	0	1419
62	228	8	6	4,7500	0	1394
63	239	8	6	4,9792	0	1410
64	242	8	6	5,0417	0	1424
65	245	8	6	5,1042	0	1424
66	245	8	6	5,1042	0	1410
67	246	8	6	5,1250	0	1423
68	247	8	6	5,1458	0	1414
69	195	24	7	1,1607	3.090	2257
70	195	24	7	1,1607	3.090	2249
71	202	24	7	1,2024	3.230	2231
72	211	24	7	1,2560	3.270	2226
73	214	24	7	1,2738	3.015	2232

Número Individuo	Tiempo de proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo de proceso (semanas)	Penalización por costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)
74	221	24	7	1,3155	3.085	2217
75	227	24	7	1,3512	3.045	2219
76	198	24	6	1,3750	1.120	2240
77	206	24	6	1,4306	1.015	2243
78	241	24	7	1,4345	3.010	2224
79	211	24	6	1,4653	1.085	2232
80	211	24	6	1,4653	1.085	2232
81	211	24	6	1,4653	1.050	2226
82	220	24	6	1,5278	1.050	2231
83	222	24	6	1,5417	980	2258
84	228	24	6	1,5833	1.050	2236
85	228	24	6	1,5833	1.050	2226
86	186	16	7	1,6607	600	1839
87	200	16	7	1,7857	525	1846
88	201	16	7	1,7946	600	1817
89	202	16	7	1,8036	525	1837
90	207	16	7	1,8482	525	1852
91	207	16	7	1,8482	450	1849
92	208	16	7	1,8571	525	1844
93	209	16	7	1,8661	450	1874
94	227	16	7	2,0268	675	1808
95	236	16	7	2,1071	900	1794
96	214	8	7	3,8214	900	1408
97	216	8	7	3,8571	900	1406
98	181	24	7	1,0774	3.165	2292
99	202	24	7	1,2024	3.380	2235
100	204	24	7	1,2143	3.050	2253
101	211	24	7	1,2560	3.125	2232
102	227	24	7	1,3512	3.160	2225
103	227	24	7	1,3512	2.975	2246
104	209	24	6	1,4514	1.050	2268
105	213	24	6	1,4792	1.085	2233
106	227	24	6	1,5764	1.085	2227
107	229	24	6	1,5903	1.050	2249
108	236	24	6	1,6389	1.050	2190
109	190	16	7	1,6964	675	1831

Número Individuo	Tiempo de proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo de proceso (semanas)	Penalización por costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)
110	192	16	7	1,7143	600	1843
111	194	16	7	1,7321	600	1837
112	195	16	7	1,7411	675	1834
113	195	16	7	1,7411	600	1835
114	195	16	7	1,7411	600	1835
115	195	16	7	1,7411	600	1820
116	199	16	7	1,7768	600	1842
117	206	16	7	1,8393	600	1827
118	207	16	7	1,8482	675	1815
119	212	16	7	1,8929	525	1845
120	212	16	7	1,8929	525	1845
121	222	16	7	1,9821	675	1814
122	229	8	7	4,0893	825	1402
123	187	24	7	1,1131	3.090	2284
124	196	24	7	1,1667	3.380	2249
125	212	24	7	1,2619	3.010	2263
126	215	24	7	1,2798	2.870	2278
127	200	24	6	1,3889	1.120	2283
128	210	24	6	1,4583	1.085	2269
129	211	24	6	1,4653	1.085	2273
130	217	24	6	1,5069	1.085	2246
131	225	24	6	1,5625	1.050	2261
132	232	24	6	1,6111	1.050	2265
133	191	16	7	1,7054	600	1846
134	198	24	7	1,1786	3.200	2242
135	201	24	7	1,1964	3.385	2242
136	202	24	7	1,2024	3.160	2251
137	204	24	7	1,2143	3.015	2275
138	210	24	7	1,2500	3.055	2258
139	244	24	7	1,4524	3.015	2233
140	191	16	7	1,7054	600	1865
141	195	16	7	1,7411	600	1855
142	195	16	7	1,7411	600	1851
143	195	16	7	1,7411	600	1848
144	201	16	7	1,7946	675	1829
145	209	16	7	1,8661	600	1843
146	222	16	7	1,9821	600	1835
147	193	24	7	1,1488	3.570	2283
148	195	24	7	1,1607	3.240	2287

Número Individuo	Tiempo de proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo de proceso (semanas)	Penalización por costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)
149	220	24	7	1,3095	3.090	2247
150	223	24	7	1,3274	2.900	2281
151	225	24	6	1,5625	1.085	2263
152	202	16	7	1,8036	600	1850
153	202	16	7	1,8036	675	1827
154	204	24	7	1,2143	3.305	2247
155	221	24	7	1,3155	3.090	2250
156	225	24	7	1,3393	3.015	2261
157	209	24	6	1,4514	1.120	2260
158	229	24	6	1,5903	1.085	2256
159	195	16	7	1,7411	675	1845
160	203	16	7	1,8125	600	1856
161	209	16	7	1,8661	600	1845
162	212	16	7	1,8929	675	1819
163	226	24	6	1,5694	1.085	2282
164	205	16	7	1,8304	750	1820
165	232	24	6	1,6111	1.085	2259
166	214	16	7	1,9107	675	1830
167	228	16	7	2,0357	900	1815
168	232	8	7	4,1429	900	1427
169	232	8	7	4,1429	900	1411
170	196	24	7	1,1667	3.380	2288
171	229	24	6	1,5903	1.085	2270
172	218	24	7	1,2976	3.275	2247
173	214	24	6	1,4861	1.120	2266
174	242	24	6	1,6806	1.085	2237
175	195	16	7	1,7411	750	1850
176	195	16	7	1,7411	750	1849
177	204	16	7	1,8214	675	1840
178	211	16	7	1,8839	600	1870
179	202	24	7	1,2024	3.420	2282
180	271	16	7	2,4196	675	1819
181	235	24	7	1,3988	3.090	2251
182	221	24	6	1,5347	1.120	2266
183	198	16	7	1,7679	675	1853
184	218	24	7	1,2976	3.310	2255
185	225	16	7	2,0089	750	1829
186	248	8	7	4,4286	900	1423
187	251	8	7	4,4821	900	1422
188	225	24	7	1,3393	3.235	2252

Número Individuo	Tiempo de proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo de proceso (semanas)	Penalización por costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)
189	206	24	7	1,2262	3.310	2290
190	247	24	7	1,4702	3.205	2237
191	198	16	7	1,7679	750	1856
192	212	16	7	1,8929	675	1845
193	276	16	7	2,4643	600	1846
194	216	24	7	1,2857	3.415	2276
195	218	16	7	1,9464	825	1836
196	242	16	7	2,1607	900	1828
197	220	24	7	1,3095	3.385	2274
198	253	24	7	1,5060	2.975	2292
199	263	24	7	1,5655	3.085	2253
200	236	16	7	2,1071	750	1837
201	252	24	6	1,7500	1.050	2288
202	221	16	7	1,9732	900	1839
203	227	24	6	1,5764	1.155	2287
204	232	24	7	1,3810	3.165	2298
205	232	24	7	1,3810	3.235	2283
206	242	24	6	1,6806	1.120	2326
207	236	24	7	1,4048	3.310	2274
208	210	16	7	1,8750	750	1852
209	228	24	7	1,3571	3.380	2290
210	263	24	6	1,8264	1.120	2270
Promedio	212.0619			2.0377	1.284.3333	1955.9810
Desviación estándar	20.7254			1.0366	1.168.1081	306.9532
Coefficiente Variación	0.0977			0.5087	0.9095	0.1569

E ANEXO 5.

POBLACIÓN FINAL DE RESPUESTA (MÉTODO DOS)

A continuación se presenta la población final de respuesta obtenida después de aplicar el método dos:

Tabla 88. Población resultado (método dos)

Número Individuo	Tiempo Proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)	Valor Ponderado (%)
1	181	16	6	1,8854	0	1.809	66,6667
2	182	16	6	1,8958	0	1.807	66,7036
3	198	16	6	2,0625	0	1.777	67,1436
4	199	16	6	2,0729	0	1.789	66,1200
5	204	16	6	2,1250	0	1.775	66,6078
6	205	16	6	2,1354	0	1.784	65,8115
7	170	8	6	3,5417	0	1.409	78,7566
8	171	8	6	3,5625	0	1.411	78,3760
9	179	8	6	3,7292	0	1.403	77,1493
10	181	8	6	3,7708	0	1.397	77,1457
11	183	8	6	3,8125	0	1.405	76,0814
12	183	8	6	3,8125	0	1.378	78,1269
13	184	8	6	3,8333	0	1.419	74,7917
14	184	8	6	3,8333	0	1.408	75,6251
15	186	8	6	3,8750	0	1.426	73,8032
16	186	8	6	3,8750	0	1.415	74,6366
17	186	8	6	3,8750	0	1.399	75,8487
18	186	8	6	3,8750	0	1.392	76,3790
19	186	8	6	3,8750	0	1.388	76,6820
20	187	8	6	3,8958	0	1.424	73,7257
21	187	8	6	3,8958	0	1.408	74,9378
22	187	8	6	3,8958	0	1.403	75,3166
23	187	8	6	3,8958	0	1.395	75,9226
24	187	8	6	3,8958	0	1.385	76,6802
25	188	8	6	3,9167	0	1.412	74,4057
26	188	8	6	3,9167	0	1.396	75,6178
27	188	8	6	3,9167	0	1.389	76,1481
28	189	8	6	3,9375	0	1.412	74,1766
29	189	8	6	3,9375	0	1.407	74,5553
30	189	8	6	3,9375	0	1.404	74,7826

Número Individuo	Tiempo Proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)	Valor Ponderado (%)
31	189	8	6	3,9375	0	1.389	75,9190
32	190	8	6	3,9583	0	1.396	75,1596
33	190	8	6	3,9583	0	1.389	75,6899
34	191	8	6	3,9792	0	1.422	72,9608
35	191	8	6	3,9792	0	1.418	73,2638
36	191	8	6	3,9792	0	1.396	74,9305
37	191	8	6	3,9792	0	1.394	75,0820
38	192	8	6	4,0000	0	1.419	72,9590
39	192	8	6	4,0000	0	1.412	73,4893
40	192	8	6	4,0000	0	1.411	73,5650
41	192	8	6	4,0000	0	1.410	73,6408
42	192	8	6	4,0000	0	1.405	74,0196
43	192	8	6	4,0000	0	1.396	74,7014
44	192	8	6	4,0000	0	1.395	74,7772
45	193	8	6	4,0208	0	1.417	72,8814
46	193	8	6	4,0208	0	1.413	73,1844
47	194	8	6	4,0417	0	1.410	73,1826
48	194	8	6	4,0417	0	1.399	74,0159
49	195	8	6	4,0625	0	1.407	73,1808
50	196	8	6	4,0833	0	1.426	71,5123
51	196	8	6	4,0833	0	1.418	72,1183
52	196	8	6	4,0833	0	1.412	72,5729
53	196	8	6	4,0833	0	1.410	72,7244
54	196	8	6	4,0833	0	1.405	73,1032
55	196	8	6	4,0833	0	1.393	74,0123
56	197	8	6	4,1042	0	1.423	71,5105
57	197	8	6	4,1042	0	1.408	72,6468
58	197	8	6	4,1042	0	1.400	73,2529
59	197	8	6	4,1042	0	1.393	73,7832
60	197	8	6	4,1042	0	1.384	74,4650
61	198	8	6	4,1250	0	1.410	72,2662
62	198	8	6	4,1250	0	1.409	72,3420
63	198	8	6	4,1250	0	1.408	72,4177
64	198	8	6	4,1250	0	1.407	72,4935
65	198	8	6	4,1250	0	1.400	73,0238

Número Individuo	Tiempo Proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)	Valor Ponderado (%)
66	198	8	6	4,1250	0	1.391	73,7056
67	199	8	6	4,1458	0	1.429	70,5977
68	199	8	6	4,1458	0	1.425	70,9008
69	199	8	6	4,1458	0	1.424	70,9765
70	199	8	6	4,1458	0	1.421	71,2038
71	199	8	6	4,1458	0	1.415	71,6583
72	199	8	6	4,1458	0	1.406	72,3402
73	200	8	6	4,1667	0	1.430	70,2929
74	200	8	6	4,1667	0	1.418	71,2020
75	201	8	6	4,1875	0	1.419	70,8971
76	201	8	6	4,1875	0	1.418	70,9729
77	201	8	6	4,1875	0	1.409	71,6547
78	201	8	6	4,1875	0	1.409	71,6547
79	201	8	6	4,1875	0	1.406	71,8820
80	201	8	6	4,1875	0	1.401	72,2608
81	201	8	6	4,1875	0	1.397	72,5638
82	202	8	6	4,2083	0	1.412	71,1983
83	202	8	6	4,2083	0	1.412	71,1983
84	202	8	6	4,2083	0	1.405	71,7286
85	202	8	6	4,2083	0	1.404	71,8044
86	202	8	6	4,2083	0	1.403	71,8801
87	202	8	6	4,2083	0	1.396	72,4104
88	203	8	6	4,2292	0	1.431	69,5298
89	203	8	6	4,2292	0	1.423	70,1359
90	203	8	6	4,2292	0	1.408	71,2723
91	203	8	6	4,2292	0	1.406	71,4238
92	203	8	6	4,2292	0	1.405	71,4995
93	203	8	6	4,2292	0	1.388	72,7874
94	204	8	6	4,2500	0	1.413	70,6644
95	204	8	6	4,2500	0	1.409	70,9674
96	204	8	6	4,2500	0	1.401	71,5735
97	204	8	6	4,2500	0	1.399	71,7250
98	204	8	6	4,2500	0	1.399	71,7250
99	204	8	6	4,2500	0	1.395	72,0280
100	204	8	6	4,2500	0	1.392	72,2553
101	204	8	6	4,2500	0	1.369	73,9977

Número Individuo	Tiempo Proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)	Valor Ponderado (%)
102	205	8	6	4,2708	0	1.440	68,3898
103	205	8	6	4,2708	0	1.405	71,0413
104	205	8	6	4,2708	0	1.399	71,4959
105	205	8	6	4,2708	0	1.395	71,7989
106	205	8	6	4,2708	0	1.388	72,3292
107	205	8	6	4,2708	0	1.378	73,0868
108	206	8	6	4,2917	0	1.413	70,2062
109	206	8	6	4,2917	0	1.408	70,5850
110	206	8	6	4,2917	0	1.408	70,5850
111	206	8	6	4,2917	0	1.405	70,8122
112	206	8	6	4,2917	0	1.395	71,5698
113	206	8	6	4,2917	0	1.391	71,8729
114	206	8	6	4,2917	0	1.390	71,9486
115	206	8	6	4,2917	0	1.386	72,2516
116	207	8	6	4,3125	0	1.418	69,5983
117	207	8	6	4,3125	0	1.410	70,2044
118	207	8	6	4,3125	0	1.410	70,2044
119	207	8	6	4,3125	0	1.401	70,8862
120	207	8	6	4,3125	0	1.388	71,8710
121	207	8	6	4,3125	0	1.381	72,4013
122	208	8	6	4,3333	0	1.412	69,8238
123	208	8	6	4,3333	0	1.403	70,5056
124	208	8	6	4,3333	0	1.399	70,8086
125	208	8	6	4,3333	0	1.398	70,8844
126	208	8	6	4,3333	0	1.390	71,4904
127	209	8	6	4,3542	0	1.409	69,8219
128	209	8	6	4,3542	0	1.406	70,0492
129	210	8	6	4,3750	0	1.420	68,7595
130	211	8	6	4,3958	0	1.412	69,1365
131	211	8	6	4,3958	0	1.411	69,2122
132	212	8	6	4,4167	0	1.411	68,9831
133	212	8	6	4,4167	0	1.405	69,4377
134	212	8	6	4,4167	0	1.405	69,4377
135	212	8	6	4,4167	0	1.401	69,7407
136	212	8	6	4,4167	0	1.374	71,7862
137	213	8	6	4,4375	0	1.412	68,6783

Número Individuo	Tiempo Proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)	Valor Ponderado (%)
138	213	8	6	4,4375	0	1.405	69,2086
139	213	8	6	4,4375	0	1.403	69,3601
140	213	8	6	4,4375	0	1.402	69,4359
141	213	8	6	4,4375	0	1.397	69,8146
142	213	8	6	4,4375	0	1.388	70,4965
143	213	8	6	4,4375	0	1.385	70,7237
144	214	8	6	4,4583	0	1.435	66,7068
145	214	8	6	4,4583	0	1.412	68,4492
146	214	8	6	4,4583	0	1.407	68,8280
147	214	8	6	4,4583	0	1.404	69,0552
148	214	8	6	4,4583	0	1.399	69,4340
149	214	8	6	4,4583	0	1.397	69,5855
150	214	8	6	4,4583	0	1.396	69,6613
151	214	8	6	4,4583	0	1.391	70,0401
152	215	8	6	4,4792	0	1.419	67,6898
153	215	8	6	4,4792	0	1.414	68,0686
154	215	8	6	4,4792	0	1.407	68,5989
155	215	8	6	4,4792	0	1.406	68,6746
156	215	8	6	4,4792	0	1.400	69,1292
157	215	8	6	4,4792	0	1.398	69,2807
158	215	8	6	4,4792	0	1.395	69,5080
159	215	8	6	4,4792	0	1.391	69,8110
160	215	8	6	4,4792	0	1.388	70,0383
161	216	8	6	4,5000	0	1.409	68,2183
162	216	8	6	4,5000	0	1.408	68,2940
163	216	8	6	4,5000	0	1.407	68,3698
164	216	8	6	4,5000	0	1.407	68,3698
165	217	8	6	4,5208	0	1.429	66,4740
166	217	8	6	4,5208	0	1.419	67,2316
167	217	8	6	4,5208	0	1.401	68,5952
168	217	8	6	4,5208	0	1.398	68,8225
169	218	8	6	4,5417	0	1.417	67,1540
170	218	8	6	4,5417	0	1.415	67,3055
171	218	8	6	4,5417	0	1.415	67,3055

Número Individuo	Tiempo Proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)	Valor Ponderado (%)
172	218	8	6	4,5417	0	1.412	67,5328
173	218	8	6	4,5417	0	1.411	67,6086
174	218	8	6	4,5417	0	1.399	68,5177
175	218	8	6	4,5417	0	1.388	69,3510
176	219	8	6	4,5625	0	1.416	67,0007
177	219	8	6	4,5625	0	1.388	69,1219
178	219	8	6	4,5625	0	1.386	69,2734
179	220	8	6	4,5833	0	1.398	68,1352
180	220	8	6	4,5833	0	1.395	68,3625
181	220	8	6	4,5833	0	1.383	69,2716
182	221	8	6	4,6042	0	1.406	67,3001
183	221	8	6	4,6042	0	1.399	67,8304
184	221	8	6	4,6042	0	1.397	67,9819
185	221	8	6	4,6042	0	1.393	68,2849
186	221	8	6	4,6042	0	1.372	69,8758
187	222	8	6	4,6250	0	1.402	67,3740
188	222	8	6	4,6250	0	1.389	68,3588
189	223	8	6	4,6458	0	1.411	66,4631
190	224	8	6	4,6667	0	1.421	65,4764
191	224	8	6	4,6667	0	1.413	66,0825
192	224	8	6	4,6667	0	1.397	67,2946
193	226	8	6	4,7083	0	1.414	65,5485
194	226	8	6	4,7083	0	1.393	67,1394
195	227	8	6	4,7292	0	1.414	65,3194
196	227	8	6	4,7292	0	1.412	65,4709
197	227	8	6	4,7292	0	1.405	66,0012
198	228	8	6	4,7500	0	1.409	65,4691
199	228	8	6	4,7500	0	1.394	66,6055
200	229	8	6	4,7708	0	1.422	64,2552
201	230	8	6	4,7917	0	1.407	65,1624
202	231	8	6	4,8125	0	1.414	64,4031
203	233	8	6	4,8542	0	1.394	65,4600
204	234	8	6	4,8750	0	1.414	63,7158
205	234	8	6	4,8750	0	1.408	64,1703
206	234	8	6	4,8750	0	1.407	64,2461

Número Individuo	Tiempo Proceso (horas)	Número de horas por día	Número de días por semana	Tiempo Proceso (semanas)	Penalización costos de mano de obra (puntos)	Penalización por fracción defectuosa (puntos)	Valor Ponderado (%)
207	235	8	6	4,8958	0	1.404	64,2442
208	235	8	6	4,8958	0	1.400	64,5473
209	235	8	6	4,8958	0	1.388	65,4564
210	236	8	6	4,9167	0	1.400	64,3182
Promedio	205,9048			4,2317	0	1.415,4	70,6838
Desviación estándar	13,4634			0,4685	0	65,5427	3,1917
Coefficiente Variación	0,0654			0,1107	0/0	0,0463	0,0452