

APLICACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO QUE INCORPORA LÓGICA DIFUSA  
PARA LA MINIMIZACIÓN DEL TIEMPO DEL PROCESO DE CORTE DE DIFERENTES  
TIPOS DE MATERIA PRIMA PARA LA EMPRESA CONFECCIONES TALLER 84.

ANDRÉS FELIPE DUARTE ARIAS  
CARLOS FERNANDO OROZCO AHUMADA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA INDUSTRIAL  
BOGOTÁ D.C.  
JUNIO DE 2015

APLICACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO QUE INCORPORA LÓGICA DIFUSA  
PARA LA MINIMIZACIÓN DEL TIEMPO DEL PROCESO DE CORTE DE DIFERENTES  
TIPOS DE MATERIA PRIMA PARA LA EMPRESA CONFECCIONES TALLER 84.

ANDRÉS FELIPE DUARTE ARIAS  
CARLOS FERNANDO OROZCO AHUMADA

Trabajo de Grado

Director:  
INGENIERO JUAN CARLOS GARCÍA

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA INDUSTRIAL  
BOGOTÁ D.C.  
JUNIO DE 2015

## Tabla de contenido

1.	Titulo .....	vi
2.	Glosario de términos .....	1
3.	Resumen Ejecutivo.....	2
4.	Introducción.....	3
5.	Antecedentes .....	4
6.	Justificación.....	8
7.	Formulación del problema.....	11
8.	Objetivos .....	14
8.1	Objetivo General .....	14
8.2	Objetivos específicos.....	14
9.	Marco teórico .....	15
9.1	Lógica difusa .....	15
9.1.1	Uso de lógica difusa en la solución de problemas de programación de cortes.....	17
9.2	Algoritmos genéticos.....	20
9.2.1	Uso de los algoritmos genéticos en la solución de problemas de programación.....	21
10.	Metodología.....	23
10.1	Metodología Aplicada .....	27
10.1.1	Análisis del proceso de extendido y corte .....	27
10.1.2	Fuzzyficación de variables difusas.....	33
10.1.3	Desarrollo del algoritmo genético .....	35
10.1.4	Parámetros en algoritmo genético .....	36
10.1.5	Software utilizado.....	40
10.1.6	Ingreso y representación de parámetros en R Studio .....	41
11.	Resultados .....	44
11.1	Distribución propuesta por Confecciones Taller 84.....	44
11.2	Distribución obtenida con la metodología propuesta .....	45
11.3	Beneficio del makespan con la metodología propuesta.....	49
12.	Análisis costo-beneficio .....	50
12.1	Captura de datos .....	50

12.2	Parámetros del análisis.....	52
12.3	Análisis del valor presente neto.....	52
12.4	Resultados del análisis.....	54
13.	Conclusiones .....	55
14.	Recomendaciones.....	56
15.	Referencias Bibliográficas .....	57
16.	Apéndices .....	59
16.1	Anexo 1 (Evaluación del AG).....	59
16.2	Anexo 2 (Distribución propuesta por Confecciones Taller 84 en la Mesa 1) .....	60
16.3	Anexo 3 (Distribución propuesta por Confecciones Taller 84 en la Mesa 2) .....	61
16.4	Anexo 4 (Distribución metodología propuesta en la Mesa 1).....	62
16.5	Anexo 5 (Distribución metodología propuesta en la Mesa 2).....	63
16.6	Anexo 6 (Ejemplo de la decodificación del cromosoma aplicado al algoritmo genético) .....	64

## Lista de Tablas

Tabla 1	Números triangulares difusos que definen algunos valores inciertos .....	19
<b>Tabla 2</b>	Cantidades, Distribución propuesta por Confecciones.....	44
Tabla 3	Tiempos Totales, Confecciones Taller 84.....	44
Tabla 4	Cantidades, Distribución propuesta por los autores .....	45
Tabla 5	Tiempos Totales, Propuesta de los Autores. ....	45
Tabla 6	Comparación de los tiempos en la Mesa 1 y Mesa 2 .....	46
Tabla 7	Representación del cromosoma, propuesta por Confecciones Taller 84.....	47
Tabla 8	Representación del cromosoma, propuesta de los Autores .....	48
Tabla 9	Porcentaje de utilización de las mesas con respecto a las prendas elaboradas.....	49
Tabla 10	Ahorro con la propuesta de los Autores. ....	49
Tabla 11:	Tipos de trabajos con alta frecuencia .....	50
Tabla 12:	Aumento de la producción .....	53
Tabla 13:	comparación entre VPN sin algoritmo y con algoritmo.....	54
Tabla 14:	Factor Costo-Benéfico. ....	54
Tabla 15	Valores borrosos del proceso de corte.....	64

Tabla 16 Representación del Cromosoma con los 22 trabajos .....	65
Tabla 17 Longitudes de los trabajos distribuidos en la Mesa 1 y Mesa 2 .....	65
Tabla 18 Distribución del cromosoma en la Mesa 1 y Mesa .....	65
Tabla 19 Triangular Fuzzy Numbers( TFN´s) de los tiempos totales de cada procesa en la Mesa 1 y Mesa 2 .....	65
Tabla 20 Factores de Ajuste del conjunto borroso de Habilidad del Operario .....	65
Tabla 21 Valores triangulares borrosos de los tiempos totales de cada proceso en cada mesa.....	66
Tabla 22 Valores desffuzificados por el método del centroide de los tiempos totales de cada proceso en cada mesa.....	66

## Lista de Figuras

Figura 1. Primera factura pendiente del mes de agosto de 2014 de Confecciones Taller 84. ....	10
Figura 2. Ultima factura pendiente del mes de agosto de 2014 de Confecciones Taller 84.....	10
Figura 3. Plano segundo piso Confecciones Taller 84 .....	12
Figura 4. Plano segundo piso Confecciones Taller 84. ....	12
Figura 5. Proceso desarrollado por Confecciones Taller 84.....	13
Figura 6. Funciones de pertenencia lógica difusa .....	16
Figura 7. Función pertenencia triangular ejemplo Temperatura .....	16
Figura 8. Métodos de desfuzzyficación.....	16
Figura 9 Función pertenencia triangular proceso corte y extendido .....	19
Figura 10 Representación gráfica del cuarto de corte .....	27
Figura 11 Layout, 1 piso.....	27
Figura 12 Proceso de Extendido, Confecciones Taller 84.....	29
Figura 13 Proceso de Corte, Confecciones Taller 84.....	29
Figura 14 Molde o trazo de la prenda, Confecciones Taller 84 .....	30
Figura 15 Prendas durante el proceso de corte, Confecciones Taller 84.....	30
Figura 16 Especificaciones y tiempos de los enterizos Michellin.....	33
Figura 17 Diagrama de Flujo del Algoritmo Genético.....	35
Figura 18 Representación del cromosoma.....	36
Figura 19 Ejemplo de Selección por Ruleta .....	37

Figura 20 Ejemplo representación Cruce Uniforme .....	38
Figura 21 Ejemplo Representación Mutación inversa.....	38
Figura 22 Pruebas en Probabilidad de Cruce .....	39
Figura 23 Pruebas en Probabilidad de Mutación .....	39
Figura 24 Logo del Software, R Studio.....	40
Figura 25 Representación de la función ga, dentro del paquete a utilizar. ....	41
Figura 26 Resultado a ejemplo del modelo, con el paquete GA de R studio. ....	41
Figura 27 Diagrama de Gantt, Propuesta Confecciones Taller 84.....	47
Figura 28 Diagrama Gantt, para la distribución propuesta por los autores .....	48
Figura 29: VPN a 5 años de la situación actual.....	52
Figura 30: VPN a 5 años con la el algoritmo propuesto.....	54
Figura 31: Beneficios por año. ....	55

## Lista de Anexos

Anexo 1 Evaluación del Algoritmo Genético. ....	59
Anexo 2: Distribución propuesta, Confecciones Taller 84 – Mesa 1.....	60
Anexo 3 Distribución propuesta, Confecciones Taller 84 – Mesa 2.....	61
Anexo 4 Distribución propuesta, por los Autores – Mesa 1 .....	62
Anexo 5 Distribución propuesta por los Autores – Mesa 2 .....	63
Anexo 6 Ejemplo de la decodificación del cromosoma aplicado al algoritmo genético.....	68

## 1. Título

APLICACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO QUE INCORPORA LÓGICA DIFUSA  
 PARA LA MINIMIZACIÓN DEL TIEMPO DEL PROCESO DE CORTE DE DIFERENTES  
 TIPOS DE MATERIA PRIMA PARA LA EMPRESA CONFECIONES TALLER 84.

“Propuesta Aplicada”

## 2. Glosario de términos

**APROXIMACIONES ENUMERATIVAS:** Son aproximaciones que se realizan para desarrollar modelos que necesitan o tienen por objetivo dar un orden o secuencia en la solución.

**EXTENDER:** Este término hace referencia a poner la tela sobre las mesas donde se realizan los trabajos de corte.

**SPEAR:** Es la distancia que existe entre el valor difuso más grande y el menor, dentro de la función triangular

**MAKESPAN:** Es el tiempo total del proceso

**CRISP:** Son los valores de entrada y salida en la lógica difusa, pueden ser números o expresiones.

**FUZZYFICACIÓN:** Hace referencia al proceso de convertir un valor crisp en un valor borroso.

**DESFUZZYFICACIÓN:** Es el proceso inverso a la fuzzyficación, ya que, convierte el valor borroso en valor crisp.

**SAMs:** (Standar allowed minutes), son los tiempos estándar permitidos para una operación, e este caso puede ser operación de extendido y corte.

**TFNs:** (Triangular fuzzy numbers), es un conjunto de valores fuzzy que representa variables desconocidas, en este caso son 3: las habilidades del operario, tipo de materia prima y el patrón de corte.

### 3. Resumen Ejecutivo

El presente proyecto se enfocó en lograr desarrollar una propuesta que brinde solución a una dificultad común entre las empresas dedicadas a la elaboración de prendas de vestir bien sea en dotaciones para las empresas o en productos simplemente comerciales. Este problema se evidencia en el proceso de corte, el cual por su importancia es considerado el cuello de botella en la producción del producto terminado, debido a que para la elaboración de prendas es necesaria la mayor precisión posible, pues al quedar mal cortados los moldes, no se logra que la prenda pueda ser confeccionada correctamente. Además, no contará con los márgenes de calidad necesarios y exigidos por los clientes. El principal objetivo es diseñar un algoritmo genético que sea capaz de incluir variables difusas como la habilidad del operario, el tipo de tela y el patrón de corte, los cuales proporcionan mayor seguridad en la programación de los trabajos durante el proceso de corte, con el fin siempre de minimizar el makespan y así mejorar la satisfacción del cliente en aspectos de tiempo de entrega y calidad, haciendo del proceso de corte aún más rápido y eficiente donde intervengan no solo variables (crisp) sino también variables difusas.

La idea de incorporar las variables difusas para minimizar el makespan se basa en que la compañía no solo se fundamentará en la experiencia y en las prioridades de pocos clientes, sino que se tendrán en cuenta valores que directamente afectan cada trabajo, logrando un cambio en el modelo que vienen operando, con uno nuevo que busca la reducción de los errores e imprevistos que por no tener un control de los pedidos, pueden producir demoras y tiempo muerto en el proceso.

#### 4. Introducción

El sector textil-confección siempre ha representado un papel muy importante en la economía de Colombia, ya que, gracias a éste se ha incrementado el empleo y la industrialización en el país en los últimos años. A pesar de que este sector está ubicado a lo largo y ancho del territorio colombiano las ciudades más representativas con el 83.47 % son Bogotá, Medellín y Cali, con un 48.61 %, 28.83 % y 6.03 % respectivamente. Por otro lado, el ingreso operacional en estas ciudades durante el 2012 en el sector textil-confecciones fue de 5.949 millones de pesos, 5.433 millones de pesos y 842 millones de pesos respectivamente, lo cual refleja un gran impacto tanto en las ciudades productoras como en la economía del país (Vélez, Rodríguez, & Camacho, 2013).

Aunque el sector textil-confección sufrió una caída desde el año 2008, a causa de la gran recesión que vivió los países desarrollados afectando directamente a las naciones que aun dependen de ellas, el empleo nacional disminuyó de un año a otro 0,76 % llegando a 12,03 % en 2009, debido a que muchas empresas tuvieron que cerrar por los altos costos de materia prima y la sobrevalorización del producto. En el año 2012 Colombia vivió una recuperación no solo en la tasa de desempleo el cual llegó a 10,38%, sino en el mismo sector debido a que mejoró su situación frente a otros países en esta materia en cuestiones impuestos y seguridad, esto se debe a que las importaciones desde China y Panamá eran cada vez mayores a muy bajos precios. Este fenómeno no es el único que afecta actualmente el mercado interno, también encontramos las importaciones ilegales y el contrabando entre otros que afectan directamente la economía del país, reflejándose en un aumento de 25% en las confecciones del año 2011 al 2012 en Colombia, lo cual es un valor muy contrario comparándolo con la disminución de importación de textiles en 2,8% en el mismo periodo de tiempo.

No cabe duda que para mejorar este sector hace falta la implantación de nuevas estrategias que permitan que este sector sea más competitivo tanto internamente como internacionalmente, aunque existen varios tratados de libre comercio, Colombia no ha podido explotar esta posibilidad debido a que no se cuenta con estrategias que permitan que los costos de producción sean más bajos, logrando ofrecer un producto con excelente calidad a un precio competitivo.

Una propuesta para el mejoramiento de la producción en la industria textil-confección se da en el proceso de corte, ya que este es el proceso crítico de toda industria textil, debido a que se

define como quedará el producto terminado y más importante es que los demás procesos dependen directamente del mismo. Por esta razón es donde se ha querido implantar un nuevo algoritmo que permita desarrollar una programación para así disminuir los tiempos de proceso, con el fin de que las demás actividades (confección, bordado, ojalado, botonado, calidad, planchado y empaque) se vean transformados con un aumento en su productividad, debido a que la empresa con ayuda de los satélites que lo soportan tienen la ventaja de despachar el producto cortado y no generar gran stock durante el proceso. Así mismo esta mejora permitirá que se incluyan variables no solo cuantitativas sino también variables humanas que permitirán mayor credibilidad sobre el nuevo modelo de programación que se vaya a implantar.

Mejorando el proceso crítico será más fácil encontrar falencias en los demás procesos, permitiendo realizar nuevos cambios que permita a la empresa Confecciones Taller 84 optimizar su proceso de corte así como también generar nuevas estrategias para ser una empresa más competitiva en Colombia y porque no internacionalmente.

## 5. Antecedentes

La industria textil-confección ha sido muy importante alrededor del mundo es por esto que desde el año 2000 cada vez más investigadores se han puesto en la tarea de desarrollar nuevos métodos que permitan optimizar los procesos que se dan en esta industria. Por ejemplo (Wong W. , 2000), desarrollaron una primera aproximación de una programación para el extendido y el corte de las telas en un sistema computarizado, con la intención de minimizar el tiempo de fabricación y el tiempo que dura vacía la máquina de corte. Años más tarde (Mok & Wong, 2006) propuso generar una programación con características falla-Tolerante en un ambiente Justo a tiempo de producción recurriendo a variables difusas que permitían tener en cuenta más variables que afectan el proceso. Más tarde (Dawn & Shierb, 2007) ataca el problema desde una perspectiva diferente ya que se centra en los racimos de tela que se cortan, estos racimos son las diferentes partes de la prenda que se va a confeccionar, la intención del autor es minimizar el número de capas que son extendidas para realizar cualquier trabajo. En ese mismo año (Mok, Kwong, & Wong, 2007) atacaron el mismo problema pero esta vez se concentraron en proponer un algoritmo que tuviera las características falla-tolerante, para lograr este tipo de programación ellos incorporaron variables difusas las cuales permiten considerar nuevas variables en el

problema haciendo del algoritmo genético para la programación del corte una opción más robusta.

La manera más efectiva que se ha encontrado para plantear soluciones factibles al problema de la programación del extendido y corte de tela han sido los algoritmos genéticos (Mok & Wong, 2006), (Mok, Kwong, & Wong, 2007), (Wong W., 2000). Donde se han representado los genes por medio de capas extendidas y los cromosomas como el orden aleatorio de los rollos de tela sobre los cuales se van a procesar los diferentes trabajos (Wong W., 2000). Se han empleado otras maneras como (Mok & Wong, 2006) y (Mok, Kwong, & Wong, 2007) donde primero se toman en cuenta los tiempos permitidos de cada operación, para luego transformarlos a variables difusas para que variables como: habilidades del operario, tipo de tela y patrón de corte que no son fáciles de tener en cuenta, puedan incorporarse como parte de la función objetivo del problema, luego se diseña un algoritmo genético con cromosomas enteros que indican la secuencia de los trabajos a procesar, luego se realiza una evaluación fitness para determinar qué cromosoma seguirá en la siguiente generación, esto se determina bajo el concepto de qué tan bien un individuo resuelve el objetivo específico que en este caso es minimizar el tiempo del proceso. Sin embargo en (Mok & Wong, 2006) se agregan tiempos triangulares borrosos para definir los tiempos de entrega de las diferentes órdenes, estos tiempos son valorados por medio del grado de satisfacción asociado con el tiempo empleado para desarrollar cada trabajo, por lo cual el objetivo es maximizar el grado de satisfacción.

Por otro lado en (Dawn & Shierb, 2007) se plantea unas aproximaciones enumerativas que identifican todas las soluciones óptimas de este problema en la actualidad. Una de ellas es la enumerativa de dos etapas que es una aproximación para resolver el problema de la programación del corte, que sugiere comenzar con una aproximación  $m$  de  $M$ , donde  $m$  son posibles números de capas del número de capas óptimo que representa  $M$ , luego se determina si es factible la programación de corte teniendo  $m$  capas. En esta aproximación en la etapa 1 se generan conjuntos válidos de particiones de recuentos de capas, los cuales pueden corresponder a una programación óptima. En la segunda etapa se testean las particiones de la etapa 1 para encontrar si son factibles o no, este procedimiento es iterativo hasta que todas las particiones son consideradas y se encuentran factibles o infactibles. El valor óptimo de  $M$  es determinado por

medio de una búsqueda binaria, sobre la cual todas las posibles programaciones de corte con  $M$  capas pueden ser enumeradas.

Después de las dos etapas se construye un árbol de estilo de distribución enumerativa, donde la raíz corresponde cuando la programación de la máquina de corte está vacía, y cada nodo del árbol en el nivel  $s$  corresponde a una programación parcial de diferentes estilos que han sido distribuidos. Mientras que los nodos del árbol son construidos por estilos distribuidos secuencialmente en una programación corte partido, con un árbol enumerativo, los árboles del patrón de marcado creados con la secuencia de las marcas de los patrones, donde la raíz es cuando la máquina de corte está vacía y los nodos en cada nivel corresponden a una partición de la programación donde el patrón de corte ha sido llenado.

Ulteriormente (Wong & Leung, 2013) explica como la industria en el sector de la manufactura en textiles presenta un caso muy especial, y es que está ligado con la moda y las necesidades directas del consumidor, lo cual ocasiona que los costos de la principal materia prima, mano de obra y de fabricación esté en crecimiento, mientras que el del producto terminado esté decreciendo; por ello las empresas deben tener una alta respuesta y atención a esto, debido a que la tela constituye aproximadamente el 50 – 60% de los costos de manufactura (Wong & Leung, 2013). Por eso el autor resalta que la forma más efectiva para atacar el problema es tratar de acelerar el proceso de entrega del producto terminado, buscando minimizar siempre los costos de mano de obra y operación.

Para lograr que la producción de prendas de vestir sea eficiente y controlada, es necesario que la primera operación de todo el proceso se maneje con toda precisión y estudio, ya que dependiendo de ella se determina cómo y qué cantidad se deberían marcar los moldes de la prenda de vestir, qué tallas o tamaños deben colocarse y qué colores se necesitan en los pedazos de tela a trabajar; este proceso en la mayoría de empresas es llamado Planificación de las ordenes de corte (POC) el cual es adoptado por (Abeysooriya, 2012), la cual realiza una comparación entre el método manual y computacional de elaborar el POC, concluyendo que el método manual se basa en datos obtenidos con la experiencia y no garantiza la planeación óptima del proceso de corte y el método computacional consiste en un método mucho más eficaz y confiable, dado que evalúa cada posible solución, éste se realiza por medio de algoritmos genéticos, donde se genera

una población aleatoria de  $n$  cromosomas con un proceso de mutación y cruce entre ellas, cuyo propósito es buscar el valor óptimo de la función objetivo promedio de la supervivencia del cromosoma más fuerte.

Al ver la problemáticas que se presenta en la POC (Wong & Leung, 2013) decide crear una solución para reducir costos en material, mano obra y fabricación, ésta está basada en métodos de optimización meta heurísticos, específicamente los algoritmos genéticos o evolucionarios, que consiste en el comportamiento de los cromosomas en la evolución de los organismos vivos, adaptado a métodos científicos, es decir, la evolución del cromosoma que mejor se adapte al entorno y logre sobrevivir. En su construcción creó variables y parámetros relacionados al número de pilas de trozos de tela, cantidad de tallas, colores, demanda del producto, costos, tiempos, insumos buscando la reducción de costos y eficiencia del proceso. Al resolver el modelo encontró que los resultados con mayor tamaño de la población ( $\mu$ ), cantidad de descendencia ( $\lambda$ ) generan mayor impacto en reducción del uso de material y costo de fabricación y aumento en tiempo, costos de mano de obra y máquinas, aunque en el mismo año elaboró un método que junta la teoría difusa con los algoritmos genéticos, midiendo con ellos la satisfacción que tiene el proceso en relación a los tiempos de entrega de los pedidos y penalizando los tiempos de tardanza y de anticipo ya que, ocasionan por una parte la insatisfacción del cliente y por otra el aumento de costos de almacenamiento en inventarios (Wong, Kwong, & Mok, 2013)

El método realizado por (Wong, Kwong, & Mok, 2013) consiste en incorporar el algoritmo genético planteado en (Mok P. , 2011) donde se genera una población en la que tenga la secuencia de los trabajos ordenados dependiendo de sus restricciones, donde por medio de la teoría de conjuntos borrosos representada en una gráfica con las fechas de vencimiento de los pedidos, se sabrá el porcentaje de satisfacción del proceso y con esta la eficiencia del JIT en el proceso, luego con los tiempos de los trabajos se calcula la eficiencia del tiempo en proceso, para luego sumarlas y definirla como una restricción para lograr la evolución del cromosoma más fuerte. La diferencia entre (Mok P. , 2011) y (Wong, Kwong, & Mok, 2013), es que el primer autor se enfocó en mirar las variables inciertas dentro de la fábrica como las habilidades de los operarios, la familiarización con el cliente y la calidad del producto, agregando estos tres factores

al algoritmo en forma de números difusos y el segundo como se nombró anteriormente mide la satisfacción del proceso dentro de la empresa.

## 6. Justificación

Para comenzar es necesario resaltar el buen camino y comportamiento que está viviendo el sector textil en Colombia, ya que en los últimos años ha desempeñado un papel muy importante en la economía de nuestro país, representando casi el 0,9% del PIB nacional, donde el 0,7% se refiere a confecciones y el 0,2% a textiles. Dentro del sector textil-confecciones la variación de la producción y ventas reales con respecto al año anterior fueron de 15 y 9,6% respectivamente (DANE, 2014) lo cual muestra que el comportamiento de la industria está mejorando, esta mejora se debe a dos principales factores: el primero es la implementación del nuevo decreto 0074 del 2013, que consiste en fijar el arancel de 10% a las importaciones de prendas de vestir y de calzado más un importe adicional de US\$5, ocasionando que la llegada de forma masiva de productos con precios notablemente menores a los nacionales disminuyan (Mayorga, 2013) el segundo factor es la estabilidad inesperada en la tasa de cambio, con un rango de aproximadamente 1950 a 2000 pesos el dólar, provocando que las ventas externas incrementen por la confianza de inversión de los mismos (Tiempo, 2014).

Confecciones Taller 84, presenta actualmente muchas fallas en temas de órdenes de producción (la asignación de los trabajos que se van a procesar), debido a que éstas se están realizando de forma empírica por parte de todos los encargados, desde el presidente hasta la persona encargada de las órdenes, esto está ocasionando que la acumulación de trabajos por periodo de tiempo incrementa, ya que, no se está respetando el orden de llegada de los pedidos, es decir, los últimos pedidos son los primeros que entran en proceso de producción y los primeros son los últimos. Esta situación se presenta por tres grandes motivos: Primero la importancia que le da la empresa a algunos clientes como es el caso de las estaciones de servicio (Esso, Mobil, Terpel, Texaco, Biomax), donde se interrumpe la línea de producción de un cliente pequeño, para poder cumplir con la demanda de cualquier cliente grande sin importar que existan otros pedidos en cola, éste se considera una falta debido a que en muchas ocasiones se llega a interrumpir un pedido grande (> 100 unidades) de un cliente pequeño o mediano por realizar un pedido muy

pequeño (< 20 unidades) de un cliente grande. Esta situación es una falta contra la política de la empresa de manejar el área de corte de la manera más eficiente. Ya que si bien existe una preferencia por clientes, así mismo la empresa tiene un inventario de reserva para suplir a esos clientes cuando ellos lo requieran. Por lo tanto no se debería interrumpir el corte de otros clientes para satisfacer a clientes grandes por el hecho de que no se está usando el área de corte a su máximo desempeño. La segunda razón es que no se tiene conocimiento de la cantidad de pedidos en producción o pendientes por entregar, por lo tanto no se cuenta con los tiempos de producción de los diferentes productos que la empresa ofrece, esto ocasiona que a cada cliente les fijen fechas que casi nunca se les van a cumplir. El tercer factor que no se está teniendo en cuenta es la dificultad de elaborar el producto, debido a que existen pedidos que necesitan de la compra de tela y nuevo diseño en su marcación, lo que incrementa su tiempo de producción, el cual es muy diferente a los clientes frecuentes donde se tienen en algunos casos inventarios (estaciones de servicios, Hamburguesas el Corral, PAPA JOHN'S, entre otros), los diseños ya elaborados y las telas correctas.

La compañía maneja mensualmente en promedio 400 pedidos, de los cuales por las razones anteriormente nombradas se cumplen aproximadamente entre el 55 % y 70 % de los pedidos, teniendo como referencia la política que maneja la empresa, la cual es: lograr la entrega de todos los pedidos solicitados en un mes de actividad, en un plazo máximo de 30 días después de la fecha del pedido con el fin de no acumular pedidos en cola con más de 30 días.

Al realizar un seguimiento de los pedidos que se efectuaron en el mes de Agosto del presente año que fueron aproximadamente 388 iniciando con pedidos el 1 de agosto con el número de pedido consecutivo 2097 hasta el día 30 de agosto con el número de pedido consecutivo 2486 del mismo mes tal como se muestra en las (Figura 1 y Figura 2), se observó que hasta el día 27 de Septiembre la cantidad de pedidos no facturados y no entregados, llegan a 66 pedidos, representando el 17% de los pedidos en el mes de agosto.

Teniendo en cuenta que en promedio cada pedido se factura aproximadamente por 2.300.000 millones de pesos y que en cada mes se está incumpliendo en promedio con 70 pedidos, la empresa Confecciones Taller 84 está dejando de recibir aproximadamente 161.000.000 millones de pesos por mes El dinero que se deja de recibir en un mes representa un costo de oportunidad para la empresa, ya que la empresa está dejando de recibir un dinero en cierto mes, dinero que la

empresa podría re invertir. Analizando la situación con expertos de la empresa, nos revelaron que la tasa interna de oportunidad es del 30% E.A, por lo tanto el costo de oportunidad al dejar de recibir 161.000.000 millones en el mes esperado es de:

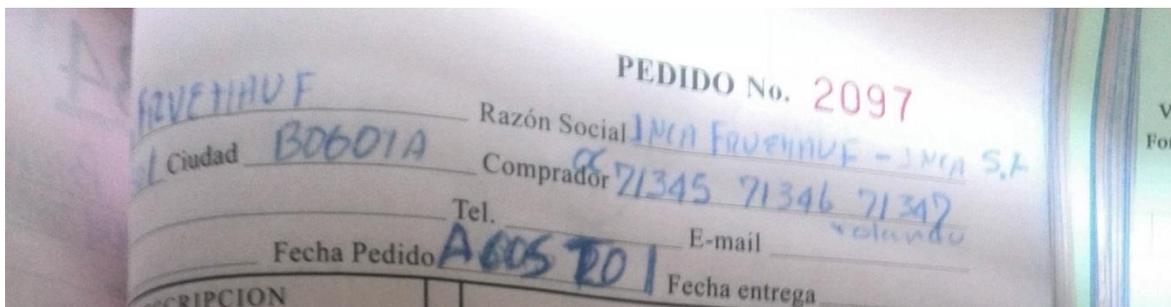
$$CO = \text{Ingresos no recibidos en el mes} * TIO$$

$$CO = \text{Ingresos no recibidos en el mes} * (TIO/12)$$

$$CO = 161.000.000 * 2.5\%$$

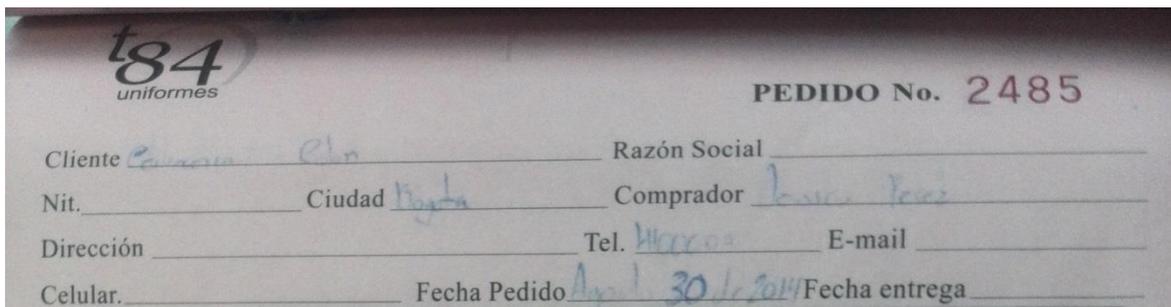
$$CO = 4.025.000$$

4.025.000 millones en promedio, que representan el costo de no recibir los 161.000.000 millones en el mes adecuado.



**Figura 1.** Primera factura pendiente del mes de agosto de 2014 de Confecciones Taller 84.

**Fuente:** Facturas del mes de agosto del 2014 de Confecciones Taller 84.



**Figura 2.** Última factura pendiente del mes de agosto de 2014 de Confecciones Taller 84

**Fuente:** Facturas del mes de agosto del 2014 de Confecciones Taller 84.

## 7. Formulación del problema

La empresa Confecciones Taller 84 lleva más de 30 años en el mercado de las dotaciones para diferentes empresas, dentro de las cuales se encuentran Esso, Terpel, Hamburguesas el corral, Codensa, Cafam, Papa Johns, entre otras marcas muy reconocidas e importantes en el mercado nacional. A pesar de su gran éxito en el mercado, la empresa no cuenta con las herramientas suficientes para mejorar sus principales procesos.

Desde hace algunos años la empresa Confecciones Taller 84 ha venido implantando un modelo de programación formulado por su gerente de producción, donde el encargado pasa las ordenes de producción al funcionario a cargo de todas las áreas de la planta, este funcionario debe entregar cada Batch en un tiempo determinado por el gerente de producción. Para así poder enviar los moldes de las prendas hacia los respectivos satélites y continuar con los demás procesos para la entrega de los pedidos.

Debido a que la empresa trabaja bajo la política de atender los pedidos a medida que llegan, los pedidos antiguos se acumulan formando así las demoras, pero si por ejemplo un cliente grande necesita un pedido, los procesos se paran y se encaminan todos para cumplir la demanda de este cliente grande.

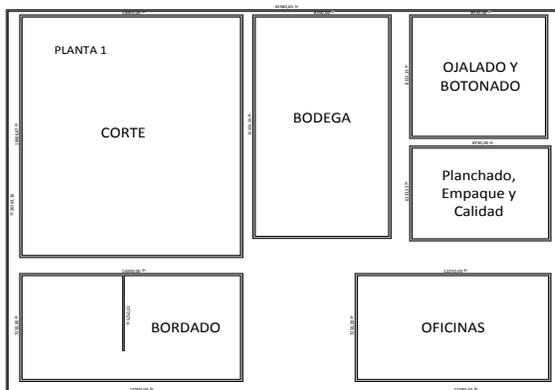
Este fenómeno ha producido que la empresa no cumpla con sus tiempos de entrega a diferentes clientes, con lo cual han perdido credibilidad por algunos de sus clientes. Afectando así sus ingresos y buen reconocimiento.

Una ventaja que tiene la empresa es el crecimiento de la capacidad que le brindan los satélites debido a que la empresa cuenta con la disponibilidad de varios satélites que están al servicio de ésta dentro y fuera de Bogotá. El verdadero problema se centra en que la empresa no cuenta con un adecuado sistema que le permita optimizar sus líneas de corte para así abastecer a todos sus satélites, con el fin de cumplir con las demandas de sus clientes.

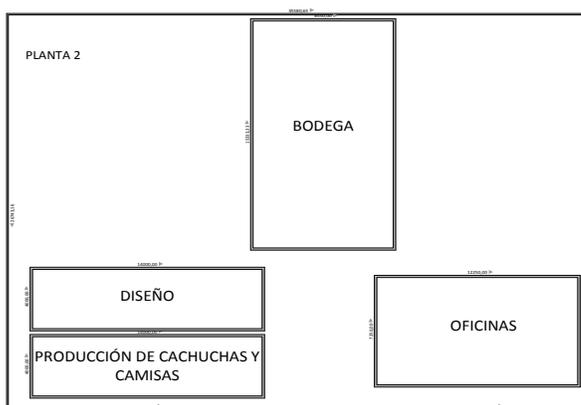
Los procesos que desarrolla esta empresa principalmente son: Corte donde se cuenta con 2 mesas destinadas para esta tarea, además cuentan con diferentes áreas como son la de bordado, ojalado, botonado, planchado, empaque y calidad, diseño, confección de camisas y cachuchas,

oficinas y bodega. Estas áreas se encuentran distribuidas tal como lo muestra la (Figura 3 y Figura 4).

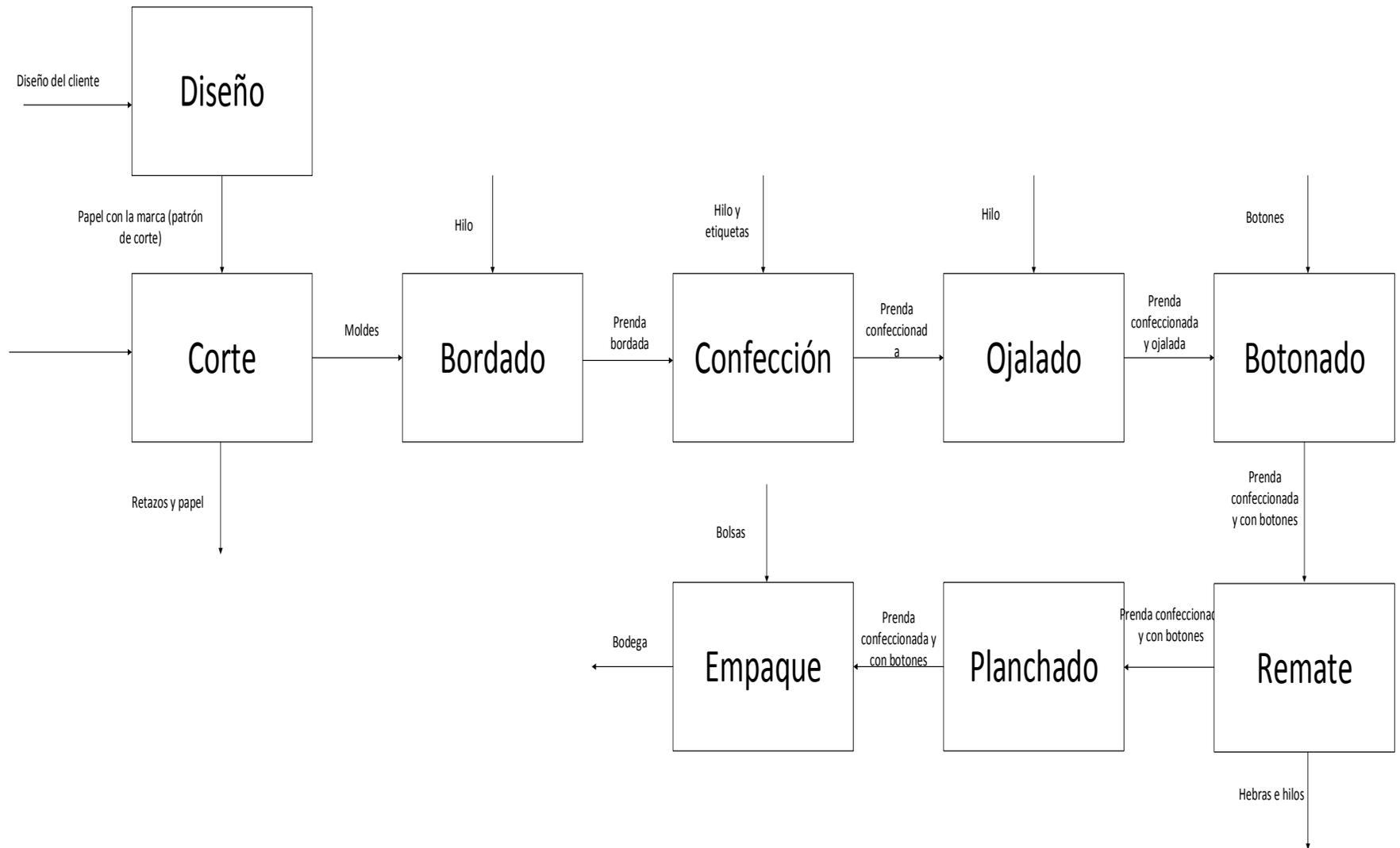
Por otro lado como se puede observar en la (Figura 5) los procesos que desarrolla la empresa Confecciones Taller 84 son diseño, corte, confección en camisas y cachuchas, ya que los otros productos de dotaciones los confeccionan satélites, una vez estos productos llegan confeccionados por lo satélites más las camisas y cachuchas que ellos mismos confeccionan, pasan al área de bordado las prendas que llevan algún logotipo para así seguir al área de ojalado y botonado donde se les integran los botones a las prendas que las necesitan, para así poder pasar al área de remate donde se verifica que las prendas cumplan con cierta calidad. Una vez inspeccionadas las prendas pasan al área de planchado y empaque para su posterior almacenamiento.



**Figura 3.** Plano segundo piso Confecciones Taller 84



**Figura 4.** Plano segundo piso Confecciones Taller 84.



**Figura 5.** Proceso desarrollado por Confecciones Taller 84

## 8. Objetivos

### 8.1 Objetivo General

- Aplicación de un Algoritmo Genético que incorpora lógica difusa para la minimización del tiempo de proceso de corte en la empresa Confecciones Taller 84.

### 8.2 Objetivos específicos

- Analizar el proceso de extendido y corte de la empresa Confecciones Taller 84 para así identificar las variables y restricciones más importantes con el fin de incluirlas en el modelo, teniendo en cuenta su representación crisp y difusa.
- Desarrollar la fuzzyficación de los valores de las variables difusas por medio de la teoría difusa para tener en cuenta los valores de las nuevas variables de tipo borroso que intervienen en el proceso de corte, con el fin de brindar una mejor representación más real de las variables involucradas.
- . Aplicación de un algoritmo genético que permita la inclusión de la lógica difusa para minimizar el tiempo del proceso de corte con el fin de manejar una cantidad mayor de pedidos por parte de la empresa Confecciones taller 84.
- Realizar un análisis Costo-Beneficio de la aplicación propuesta que evidencie los resultados operativos y económicos de la implantación del modelo de programación del proceso de corte.

## 9. Marco teórico

Al desarrollar el proyecto se abarcaron temas relacionados en la búsqueda de optimizar el proceso de corte dentro de una compañía cuya razón social es elaborar uniformes para colegios y dotaciones empresariales. Para llegar a cumplir dicho objetivo se analizaron los métodos más eficientes y útiles en encontrar soluciones, donde para una empresa mediana sea posible su implementación en aspectos de inversión y capacitación. Los dos principales pilares para la construcción del modelo son la lógica difusa o difusa y los algoritmos genéticos, donde a continuación detallaremos como se implementará en el mismo.

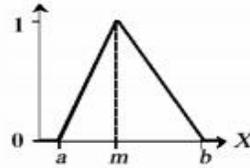
### 9.1 Lógica difusa

Para aplicar la lógica difusa es necesario entender que la mayoría de los fenómenos en los que actuamos son imprecisos, debido a cierto grado de distorsión en su naturaleza (color, textura, tamaño, forma). Cuando entramos en el contexto de la industria manufacturera, como lo son las empresas textiles y confecciones, los problemas suelen ser imprecisos y complejos debido a la variabilidad en los tipos de pedidos y en la mayoría de los casos suelen depender de actividades y decisiones humanas (Arango & Urán, 2008). Este método se utiliza más que todo en problemas donde se tienen respuestas con expresiones, como “relevante”, “muy importantes”, “satisfactorias” o “tarea simple”, la idea es formular estos tipos de conceptos matemáticamente con el fin de implementarlos en los modelos de optimización. Para lograr lo anteriormente mencionado es necesario desarrollar tres grandes categorías la fuzzyficación, evaluación y defuzzyficación.

Para lograr entender mejor este concepto y sus pasos se presenta a continuación un ejemplo sencillo de cómo implementar la lógica difusa en temas cotidianos como lo es la temperatura (Acosta, 2013) por medio de un termostato difuso, el cual la velocidad del mismo varía dependiendo de la temperatura en que se encuentre el ambiente (muy frío, frío, cálido y caliente).

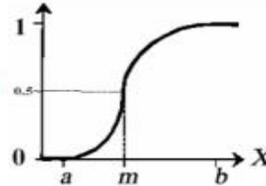
Forma Triangular

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ (x-a)/(m-a) & \text{si } x \in (a, m] \\ (b-x)/(b-m) & \text{si } x \in (m, b) \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases}$$



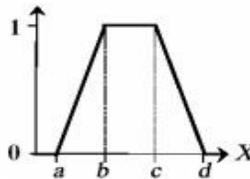
Forma S

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq a \\ 2\{(x-a)/(b-a)\}^2 & \text{si } x \in (a, m] \\ 1 - 2\{(x-a)/(b-a)\}^2 & \text{si } x \in (m, b) \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases}$$



Forma Trapezoidal

$$A(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } (x \leq a) \text{ o } (x \geq d) \\ (x-a)/(b-a) & \text{si } x \in (a, b] \\ 1 & \text{si } x \in (b, c) \\ (d-x)/(d-c) & \text{si } x \in (c, d) \end{cases}$$



Forma singleton

$$A(x) = \begin{cases} 1 & x = a \\ 0 & x \neq a \end{cases}$$

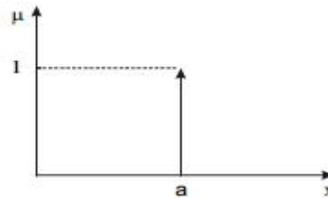


Figura 6. Funciones de pertenencia lógica difusa

Fuente: [www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_185\\_184\\_133\\_1746.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_185_184_133_1746.pdf)

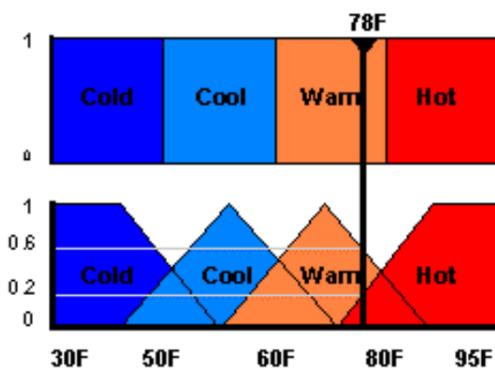


Figura 7. Función pertenencia triangular ejemplo Temperatura

Fuente: Acosta, 2013.

Método	Ecuación
COG	$y_d = \frac{\int y \mu_Y(y) dy}{\int \mu_Y(y) dy}$
COA	$y_d = \frac{\sum_{l=1}^R \delta_l \mu_{B_l}(x)}{\sum_{l=1}^R \mu_{B_l}(x)}$

Figura 8. Métodos de desfuzzyficación

Fuente: Arango & Urán, 2008.

El primer paso que se realiza en el sistema es reconocer el problema y encontrar la función de pertenencia que mejor se aplique para su solución, las más comunes de ellas son: Triangular, Trapezoidal, Forma S y Singleton, en la (Figura 6) se encuentran sus graficas con sus respectivas funciones. Para el desarrollo del ejemplo se realiza con función triangular, donde por medio de la (Figura 7) se sabe que su valor de entrada (crisp) es  $F= 78$ , el paso a seguir es la fuzzyficación, donde se encuentran los valores borrosos de esta temperatura que de acuerdo a su función de pertenencia son cálido con 0,6 y caliente con 0,2, luego se evalúan todas las reglas que se tienen de acuerdo a los valores borrosos, en este caso se relacionaron las velocidades dependiendo del ambiente (muy frio= Vel. Alta, frio= Vel. Media, cálida= Vel. Baja y caliente= Vel. Cero), al tener estos datos borrosos (fuzzyficados) la idea es continuar con la desfuzzyficación la cual se puede realizar de varias maneras pero las más utilizadas son el centro gravedad (COG) y el centro de área (COA) (Figura 8), las cuales consisten sin entrar en detalle en hallar el área bajo la curva de las gráficas con los datos borrosos, para el ejemplo y en el proyecto propuesto, se va a utilizar el COG , donde arroja un valor real (crisp) de 13,5 RPM para el termostato con las especificaciones previamente dichas.

### 9.1.1 Uso de lógica difusa en la solución de problemas de programación de cortes

La implementación de la lógica difusa en la optimización del proceso de corte dentro de la empresa Confecciones Taller 84 se usará como base la teoría de (Mok & Wong, 2006) con la lógica difusa, ésta comienza con los tiempos estándar permitidos del proceso de corte y extendido (crisp) que por medio de un muestreo de los diferentes tipos de pedidos se lograron identificar, para así comenzar con la fuzzyficación de los valores. Antes de obtener un esquema de fuzzyficación se deben realizar ciertas operaciones matemáticas. Las operaciones matemáticas que fueron implementadas fueron la suma, multiplicación y el producto por un escalar, que se definen de la siguiente manera:

- La adición de dos triplas  $\mathcal{A} = (a_1, a_2, a_3)$  y  $\mathcal{B} = (b_1, b_2, b_3)$  está definida así:

$$\mathcal{A} (+) \mathcal{B} = (a_1, a_2, a_3) + (b_1, b_2, b_3)$$

$$= (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3)$$

La suma es utilizada para calcular el tiempo de terminación borroso de los trabajos realizados.

- La multiplicación de  $\mathcal{A}$  y  $\mathcal{B}$  se define como:

$$\begin{aligned}\mathcal{A} (*) \mathcal{B} &= (a_1, a_2, a_3) * (b_1, b_2, b_3) \\ &= (a_1 b_1, a_2 b_2, a_3 b_3)\end{aligned}$$

La multiplicación es utilizada para calcular el efecto combinado de los múltiples factores de incertidumbre.

La multiplicación de un número borroso  $\mathcal{A}$  y un escalar se define como:

$$k * \mathcal{A} = k * (a_1, a_2, a_3) = (ka_1, ka_2, ka_3)$$

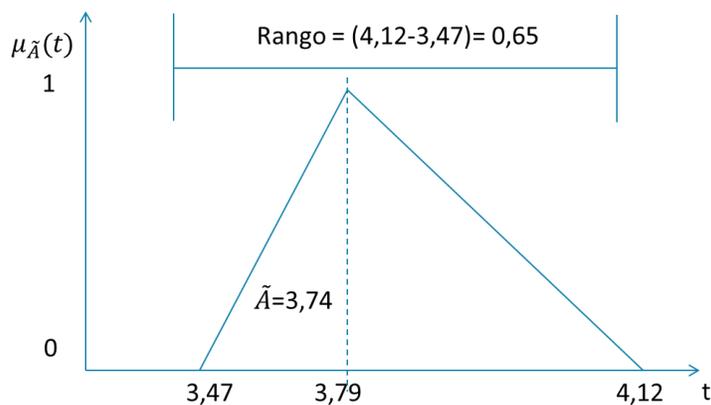
Estas operaciones fueron utilizadas para calcular los tiempos de proceso fuzzyficados tanto para el proceso de extendido como el de corte, multiplicando los tiempos estándar permitidos por el efecto de incertidumbre. El primero factor es la habilidad que poseen los operarios en el cuarto de corte, tanto para el extendido como para el corte. El segundo factor es la característica del material que el trabajo determina, ya que puede ser un material delicado, normal o duro y el tercer factor es la complejidad en el patrón de corte ya que no es lo mismo cortar una camiseta manga corta que un enterizo con bolsillos internos. La (Tabla 1) muestra los radios de ajuste para cada factor, los cuales han sido comprobados en base a datos históricos y juicios realizados por expertos en la industria textil. Cada radio de ajuste es representado como una tripleta o TFNs con sus respectivas descripciones acerca de cada factor, que permiten medir el mismo, es decir, en el caso del patrón de corte se observan tres descripciones Fácil, Promedio y complicado con sus respectivos radios de ajuste, en la mayoría de los casos la persona a cargo escoge por experiencia la descripción que considere más acorde con el trabajo.

Con el objetivo de minimizar el makespan es necesario realizar la comparación entre los números borrosos, ya que, el makespan está definido como la suma de los tiempos de proceso. La comparación entre los números borrosos es llamada “ranking” que usualmente es realizada por medio de la defuzzyficación, la defuzzyficación que se aplicó es conocida como el método del centroide que es representado por el índice del método de Yager (Figura 8).

Al tener los TFNs de cada trabajo, se ingresan en el Algoritmo genético para que de esta manera por medio del COG o método del centroide se pueda realizar la desfuzzyficación, con el fin de obtener un valor esperado (crisp) que es utilizado dentro del cálculo de la función objetivo (FO) del modelo propuesto.

Factor de incertidumbre	Descripción	Radio de ajuste
Habilidades del operario	Excelente	(0.88, 0.94, 1.00)
	Bueno	(0.98, 1.02, 1.06)
	Promedio	(1.04, 1.09, 1.14)
	Justo	(1.12, 1.20, 1.28)
	Bajo	(1.25, 1.34, 1.43)
Características del material	Duro	(0.92, 1.00, 1.06)
	Normal	(1.04, 1.09, 1.14)
	Delicado	(1.11, 1.17, 1.33)
Patrón de corte	Fácil	(0.92, 1.00, 1.06)
	Promedio	(1.04, 1.09, 1.14)
	Complicado	(1.11, 1.17, 1.33)

**Tabla 1** Números triangulares difusos que definen algunos valores inciertos  
**Fuente:** Mok & Wong, 2006



**Figura 9** Función pertenencia triangular proceso corte y extendido  
**Fuente:** Mok & Wong, 2006

Como el problema que se planteó en el proyecto presenta una gran cantidad de variables e incertidumbres el resolverlo de manera intuitiva no es aconsejable debido a su subjetividad, dado que los datos y fórmulas son determinados por la experiencia de los expertos para llegar a una solución. Por eso se tomó la decisión de realizar métodos analíticos que se basen en algoritmos

meta-heurísticos, ya que se necesita un alto rendimiento, exactitud, adaptabilidad a los cambios que presente el proceso y que no se estanque en un óptimo local (Quintero, 2009). Por esta misma razón los algoritmos heurísticos se descartaron y se prosiguió en encontrar el algoritmo que más se adapte al caso.

Un algoritmo meta –heurístico es un proceso iterativo que dirige y modifica las operaciones de otras heurísticas subordinadas para producir soluciones de alta calidad. Puede manipular una solución única (completa o incompleta) o un conjunto de ellas en cada iteración. El heurístico subordinado puede ser un procedimiento de alto (bajo) nivel, una simple búsqueda local o un método de construcción. Dentro de la familia de los algoritmos meta-heurísticos están: Procedimiento de memoria adaptable, Búsqueda tabú, Colonia de hormigas, GRASP, búsqueda del vecino más cercano (VNS), Algoritmos evolutivos, Algoritmos genéticos, Búsqueda con umbral, Recocido simulado y los híbridos de todos los anteriores (Voß, 1999).

## 9.2 Algoritmos genéticos

Entre todos los anteriores algoritmos se decidió trabajar con algoritmos genéticos, debido a que es una forma rápida de encontrar soluciones, su costo de implementación no es el más elevado, se realizan combinaciones de las soluciones, se trabaja desde una solución inicial de la población y lo más importante son procesos aleatorios y adaptativos, estas dos últimas son importantes debido a que se van a utilizar valores difusos con variables aleatorias (Muñoz, 2007).

El procedimiento que cumplen los algoritmos genéticos para su desarrollo es el siguiente:

(Guo & Wong, 2013)

1. Generar una población inicial de forma aleatoria.
2. Evaluar los cromosomas en la población actual.
3. Verificar si se cumplen con las restricciones y criterios de detención determinados, si es así, se asigna como el mejor cromosoma y la óptima solución.

4. Si no, se seleccionan los alelos para el cruce de manera aleatoria.
5. Generar los nuevos individuos con las técnicas de cruce.
6. Mutación de los alelos aleatoriamente escogidos de cromosoma actual.
7. Evaluar los nuevos cromosomas.
8. Se forma la nueva población descendencia, y se salta al paso número 3.

### **9.2.1 Uso de los algoritmos genéticos en la solución de problemas de programación**

A continuación se presentan los pasos que aplica el Algoritmo Genético para encontrar la solución adecuada:

#### 1. Creación de parámetros iniciales:

Para aplicar el Algoritmo es necesario iniciar generando dos parámetros importantes que regulan el modelo:

- Tamaño de la población inicial de cromosomas: Está determinada por la complejidad del problema y el costo computacional (mayor tamaño mayor costo).
- Tamaño de la descendencia: Es un criterio que se considera para la precisión de los resultados, aunque se debe tener cuidado con garantizar tener suficiente diversidad en la soluciones con el fin que representen a la mayor parte de la población pero eviten al mismo tiempo la convergencia prematura (Ochoa, 2004).

Al fijar los anteriores parámetros se generan aleatoriamente el orden de los cromosomas y de sus alelos el cual se representa por medio de un vector el resultado esperado.

#### 2. Proceso de evaluación:

Al tener la población y cromosomas organizados se evalúan de acuerdo a sus variables y restricciones, para poder evaluar la función objetivo, y dependiendo del problema será minimizar o maximizar el resultado.

### 3. Verificación:

Si el número de las iteraciones programadas en el algoritmo termina y además se cumplen todas las restricciones, se tendrá la solución óptima del problema.

### 4. Proceso de selección:

A partir de los valores obtenidos en las funciones objetivo se realiza la selección de los trabajos (alelos) que se cruzarán en la siguiente generación escogiendo en medida de lo posible a los cromosomas con las mejores soluciones. Se puede realizar de dos maneras: por ruleta y por torneo, los cuales consisten en métodos probabilísticos, basados en que sobrevive el más apto.

### 5. Proceso de cruce:

El objetivo del cruce es combinar elementos de información de diferentes individuos, de modo que las características interesantes que estaban dispersas en diferentes individuos queden reunidas en uno nuevo, confiando en que los individuos obtenidos de esta manera representen soluciones de mejor calidad. (Sánchez, 2007)

Al igual que los anteriores procesos, el cruce funciona con aleatoriedad, combinando dos cromosomas conformados por trabajos (padres) para crear uno nuevo individuo (hijo). Existen varios tipos de cruce pero las más importantes son: Cruce simple, Cruce por dos puntos de corte y Cruce conforme a una máscara o Cruce Uniforme (Ochoa, 2004).

### 6. Proceso de mutación:

Esta rutina es la encargada de garantizar que en la población haya diversidad lo que hace que la exploración de la solución óptima en el espacio de búsqueda sea más amplia permitiendo que no se reproduzcan modelos fijos de individuos en las generaciones siguientes (Uribe & Manuel, 2010).

### 7. Evaluación de cromosomas:

Por último se evalúa la población de los nuevos cromosomas para encontrar los individuos que más se adaptaron durante todas las generaciones y así tener la solución más adecuada y que brinde una solución al problema planteado.

## 10. Metodología

<b><u>Objetivo Especifico 1</u></b>				
Analizar el proceso de extendido y corte de la empresa Confecciones Taller 84 para así identificar las variables y restricciones más importantes con el fin de incluirlas en el modelo, teniendo en cuenta su representación <i>crisp</i> y difusa.				
<b>ACTIVIDADES</b>	<b>ASIGNATURAS</b>	<b>HERRAMIENTAS</b>	<b>FUENTES DE INFORMACIÓN</b>	<b>RESULTADOS ESPERADOS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descripción del proceso en su situación inicial.</li> <li>• Planteamiento de las características y condiciones logísticas del sistema.</li> <li>• Identificación y definición de los parámetros de entrada.</li> <li>• Definir variables de salida.</li> <li>• Plantear en palabras la función objetivo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimización de operaciones.</li> <li>• Logística</li> <li>• ingeniería de procesos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entrevistas con operarios y gerente de producción.</li> <li>• Microsoft office (Visio).</li> <li>• Consulta fuentes bibliográficas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Confecciones Taller 84</li> <li>• Niebel, Benjamin W &amp; Freivalds, Andris (2009) Ingeniería Industrial, Métodos, estándares y diseño del trabajo. México D.F. Mc Graw Hill.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descripción general del proceso de extendido y corte.</li> <li>• Parametros de entrada y variables de salida.</li> <li>• Función objetivo en palabras del modelo.</li> </ul>

<b><u>Objetivo Especifico 2</u></b>				
Desarrollar la <i>fuzzyficación</i> de los valores de las variables difusas por medio de la teoría difusa para tener en cuenta los valores de las nuevas variables de tipo borroso que intervienen en el proceso de corte, con el fin de brindar una mejor representación más real de las variables involucradas.				
<b>ACTIVIDADES</b>	<b>ASIGNATURAS</b>	<b>HERRAMIENTAS</b>	<b>FUENTES DE INFORMACIÓN</b>	<b>RESULTADOS ESPERADOS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtener los tiempos estándar permitidos.</li> <li>• Obtener la tripleta de números borrosos (<i>fuzzyficación</i>) con ayuda de la (Tabla 1).</li> <li>• Elaborar comparación entre los números borrosos Implementando el método de COG, para obtener los tiempos esperados en que la operación se realizará (<i>desfuzzyficación</i>).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingeniería de procesos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entrevistas con los operarios.</li> <li>• Microsoft office Excel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weldon A. Lodwick, Janusz Kacprzyk (Eds). Fuzzy Optimization. Springer.</li> <li>• Masatoshi sakawa, Ichiro Nishizaki, Hideki Katagiri. Fuzzy Stochastic Multiobjective programming. Springer.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempos estándar permitidos.</li> <li>• Tripleta de números borrosos.</li> <li>• Tiempos esperados (<i>crisp</i>) en que la operación se realizará.</li> </ul>

**Objetivo Especifico 3**

Aplicación de un algoritmo genético que permita la inclusión de la lógica difusa para minimizar el tiempo del proceso de corte con el fin de manejar una cantidad mayor de pedidos por parte de la empresa Confecciones taller 84.

ACTIVIDADES	ASIGNATURAS	HERRAMIENTAS	FUENTES DE INFORMACIÓN	RESULTADOS ESPERADOS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar la representación de los cromosomas y la función <i>fitness</i> para el modelo.</li> <li>• Definir el método para generar la población inicial.</li> <li>• Definir los parámetros para la selección de los cromosomas que servirán para ser reproducidos.</li> <li>• Definir parámetros de mutación.</li> <li>• Establecer parámetros de terminación para las iteraciones.</li> <li>• Establecer función objetivo teniendo en cuenta las variables difusas.</li> <li>• Programar el algoritmo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Logística</li> <li>• Ingeniería de procesos</li> <li>• Optimización de operaciones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microsoft office (Excel, Word)</li> <li>• R Studio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hillier, F. S., &amp; Lieberman, G. J. (2006). Introducción a la investigación de operaciones. Mexico D.F. McGraw-Hill.</li> <li>• Entrevista con jefe de producción.</li> <li>• P. Y.Mok, C.K Kwong, W.K.wong. Optimisation of fault-tolerant fabric-cutting schedules using genetic algorithms and fuzzy set theory.</li> <li>• Pik-Yin Mok and Wai-Keung Wong. Optimization of fault-tolerant Fabric-cutting Table Planning in a Just-In-Time apparel Manufacturing Environment.</li> <li>• <a href="http://blog.eStudio.org">http://blog.eStudio.org</a></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• .</li> <li>• Aplicación del algoritmo genético incluyendo la lógica difusa.</li> <li>• Solución para un caso real usando la metodología propuesta.</li> </ul>

**Objetivo Especifico 4**

Realizar un análisis Costo-Beneficio de la aplicación propuesta que evidencie los resultados operativos y económicos de la implantación del modelo de programación del proceso de corte.

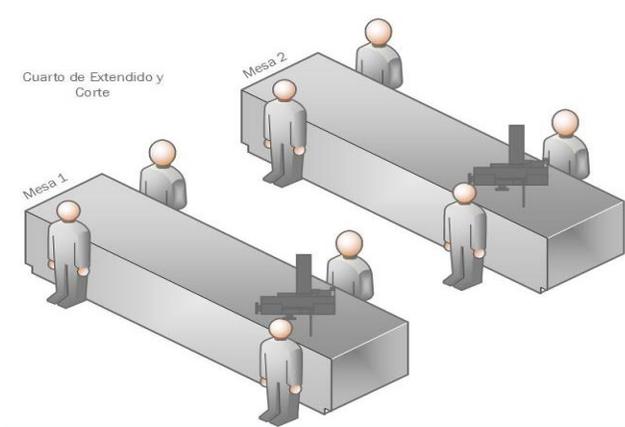
<b>ACTIVIDADES</b>	<b>ASIGNATURAS</b>	<b>HERRAMIENTAS</b>	<b>FUENTES DE INFORMACIÓN</b>	<b>RESULTADOS ESPERADOS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calcular el número de prendas diarias en promedio que se fabrican.</li> <li>• Calcular el costo promedio por una prenda.</li> <li>• Comparar la situación inicial con la solución obtenida usando la metodología propuesta, en términos monetarios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparación y Evaluación de proyectos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Microsoft office (Excel)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Registros de los costos de las diferentes prendas.</li> <li>• Registros de unidades producidas diarias por mes.</li> <li>• Jaramillo, A. M. (2008). Preparación y Evaluación de Proyectos. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo promedio de una prenda.</li> <li>• Cantidad promedio de prendas cortadas en un día.</li> <li>• Resultados que evidencien la utilidad del modelo.</li> </ul>

## 10.1 Metodología Aplicada

### 10.1.1 Análisis del proceso de extendido y corte

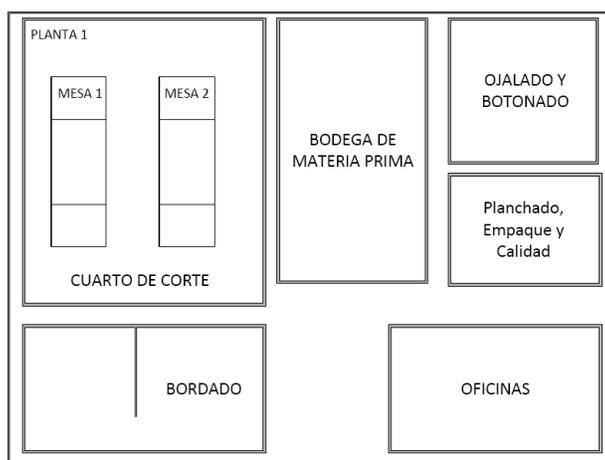
#### Descripción general del espacio:

El cuarto de corte está compuesto por 2 mesas de 18 metros, sobre las cuales se realizan los procesos de extendido y corte de las ordenes de trabajo. En cada una de las mesas se encuentran asignados cuatro operarios (Figura 10), que cumplen con turno de 8 horas al día.



**Figura 10** Representación gráfica del cuarto de corte

**Fuente:** Creada por los Autores



**Figura 11** Layout, 1 piso

**Fuente:** Creada por los Autores

### **Descripción general de los procesos:**

El proceso de extendido (Figura 12) es realizado por dos operarios en cada proceso, uno de ellos se encarga de analizar la ficha técnica de la orden mientras el segundo se desplaza en busca del material que se va a extender, los tiempos de extendido dependen de los siguientes factores:

- Habilidad de los operarios
- Característica del material a extender

El alistamiento para el extendido puede tomar un poco más de tiempo cuando se trabajan con rollos nuevos que con rollos usados ya que es necesario levantar un peso mayor y desempacar un nuevo rollo.

El proceso de corte (Figura 13) inicia cuando se extiende un trabajo y está listo para el corte, en estas mesas también se encuentran dos operarios, los cuales colocan el trazo (Figura 14) para guiarse y así poder cortar la prenda (Figura 15). La diferencia del proceso de extendido es la incorporación de un nuevo factor de incertidumbre que depende del pedido, terminando así con los siguientes factores:

- Habilidad del operario.
- Dificultad en el patrón de corte.
- Característica del material

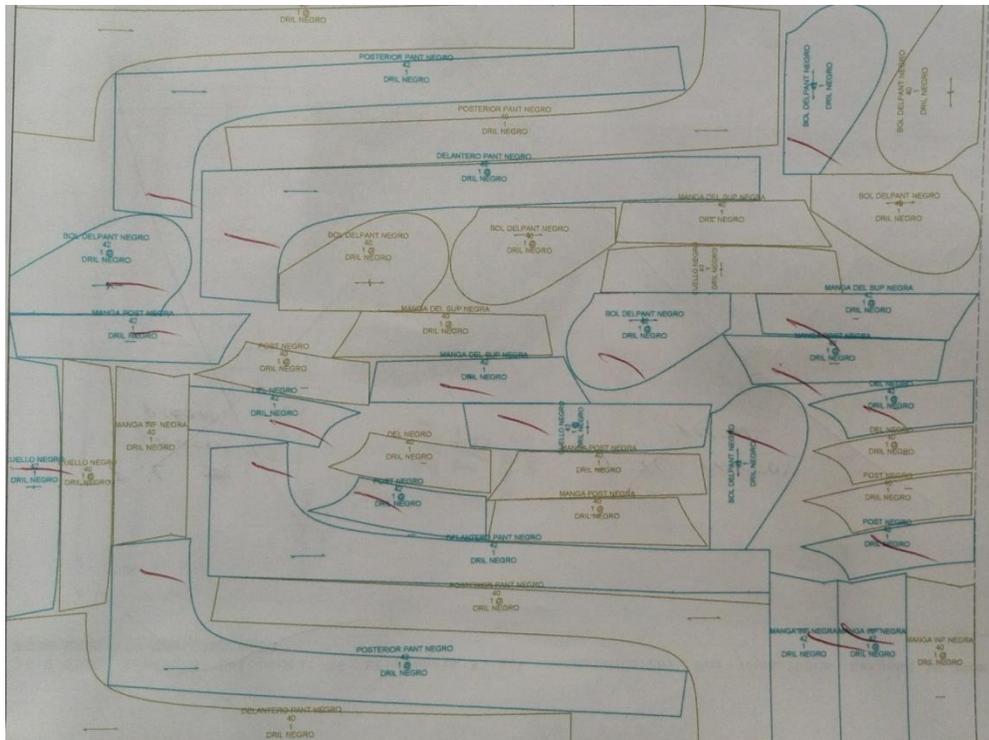
Las maquinas cortadoras no necesitan de un alistamiento previo, pero si necesitan de un mantenimiento el cual no es problema ya que se manejan fechas para el mantenimiento de cada máquina y se cuentan con 7 cortadoras para que en el caso de una eventualidad el proceso no se vea afectado.



**Figura 12** Proceso de Extendido, Confecciones Taller 84



**Figura 13** Proceso de Corte, Confecciones Taller 84



**Figura 14** Molde o trazo de la prenda, Confecciones Taller 84



**Figura 15** Prendas durante el proceso de corte, Confecciones Taller 84

## **Parámetros de entrada:**

Durante la observación realizada en los 5 meses de trabajo observamos que los principales parámetros de entrada y variables de salida de los procesos son:

Entrada:

- Tiempos de proceso de extendido:

Se calculan desde el momento en que los operarios comienzan a tender la primera capa de tela hasta que cortan la última capa de tela, los tiempos de alistamiento, como ir por el rollo a la bodega, montar el rollo en la base e ir por la ficha técnica del trabajo no se tuvieron en cuenta.

- Tiempos de proceso de corte:

Se tomaron los tiempos desde que los operarios encienden las cortadoras e iniciar la operación. Los tiempos de alistamiento, como colocar el molde sobre el trabajo extendido, encender la maquinas cortadoras y afilar la cuchilla, no fueron tenidos en cuenta.

- Longitud de cada trabajo:

Es el metraje de tela que requieren los diferentes trabajos a involucrar en el proceso.

- Habilidad del operario:

Es el tipo de destreza o aptitud con la que los operarios realizan las etapas de extendido y corte, por lo tanto si un operario posee una destreza alta para extender o cortar los tiempos de las etapas se reducirán, pero si por el contrario un operario con una aptitud baja realiza las etapas de extendido y corte los tiempos aumentaran.

- Dificultad del patrón de corte de cada trabajo:

Representa la dificultad de cada trabajo en el corte, esta dificultad se define por el número de trazos o ángulos que tenga el patrón de corte, ya que a mayor número de ángulos o secciones, como bolsillos, que tenga cada trabajo la dificultad aumenta, es más complicado cortar un pantalón camuflado con 8 bolsillos que un pantalón con un bolsillo.

- Tipo de material de cada trabajo:

Representa la característica del material con el que se deben realizar cada uno de los trabajos. Los materiales duros son más fáciles de extender. No es lo mismo extender una camisa en drill (material pesado), que una camisa en seda (material delicado), ya que la seda requerirá de más tiempo para ser extendida.

### **Variables de Salida:**

- Asignación y secuenciación de los diferentes trabajos a las mesas de extendido y corte.
- El tiempo de terminación de cada operación tanto en el extendido como en el corte.

### **Función Objetivo:**

Teniendo en cuenta los parámetros de entrada, las variables de salida y el objetivo del modelo de minimizar el makespan la función objetivo deberá buscar minimizar el tiempo que transcurre desde que el primer trabajo llega a la mesa de extendido y la terminación del último trabajo en la operación de corte.

### 10.1.2 Fuzzyficación de variables difusas

En los proceso de extendido y corte se incorporaron las incertidumbres generadas por las especificaciones de los trabajos y las habilidades humanas para un sistema de corte manual. La fuzzyficación se realizó con la manipulación de los tiempos estándar permitidos que se obtuvieron a lo largo de las observaciones de los tiempos de los diferentes trabajos. En la (Figura 16), se especifica un ejemplo con los enterizos Michellin de tallas 38, 40, 42.

Enterizos Michellin												
Trabajo 42/12				trabajo 40/10				Trabajo 38/16				
Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	
24,57	26,21	21,27	21,28	24,14	16,10	21,72	22,50	17,27	17,31	23,56	15,02	
19,67	24,67	25,14	18,20	23,86	19,94	21,37	20,69	16,16	20,84	18,39	18,27	
23,86	27,07	24,58	23,33	19,07	22,11	20,82	20,64	16,03	18,16	15,99	17,52	
22,63	21,74	17,98	25,58	18,54	23,45	19,18	21,66	20,83	19,93	19,44	16,87	
27,13	21,62	19,18	21,71	20,24	17,19	18,38	18,18	15,75	16,41	23,64	15,05	
23,46	21,69	20,15	18,97	25,65	25,05	20,63	17,65	17,19	17,66	22,34	19,45	
17,21	25,82	19,47	20,53	18,42	25,28	16,65	22,96	22,09	20,92	19,74	20,62	
20,68	26,69	17,45	24,70	19,61	21,53	24,21	17,46	21,03	18,34	15,88	15,55	
23,27	22,21	27,48	17,53	18,04	16,52	24,61	15,81	17,96	19,09	15,61	24,36	
20,93	20,65	21,16	26,15	20,39	15,78	17,29	24,11	19,97	24,23	17,76	22,41	
20,59	26,14	16,94	16,88					15,03	20,19	18,29	21,18	
24,13	18,62	17,21	27,15					23,69	21,89	18,43	21,95	
								23,90	15,95	16,67	18,23	
								20,69	21,33	21,97	15,51	
								15,29	16,51	22,29	14,91	
								16,17	21,87	17,22	16,46	
Totales	268,13	283,13	248,01	262,01	207,96	202,95	204,86	201,66	299,05	310,63	307,22	293,36
Promedio (s)		265,32				204,36				302,565		
Tiempo de extendido (m)		4,42				3,41				5,04		
Longitud tela (m)		251,23				240,32				232,04		
	4,34	4,26	4,42	4,25	4,28	4,27	4,17	4,21	4,07	3,95	4,04	4,05
Tiempo de corte (m)		12,95				12,70				12,08		
Material	Drill											
Tipo de dificultad	Promedio											

**Figura 16** Especificaciones y tiempos de los enterizos Michellin

**Fuente:** Creado por los Autores.

De esta manera se obtuvieron los tiempos estándar permitidos tanto para la operación de extendido, como para la operación de corte. Las incertidumbres son representadas en forma de números borrosos triangulares que son denotados por una triplete de la forma  $(a_1, a_2, a_3)$ .

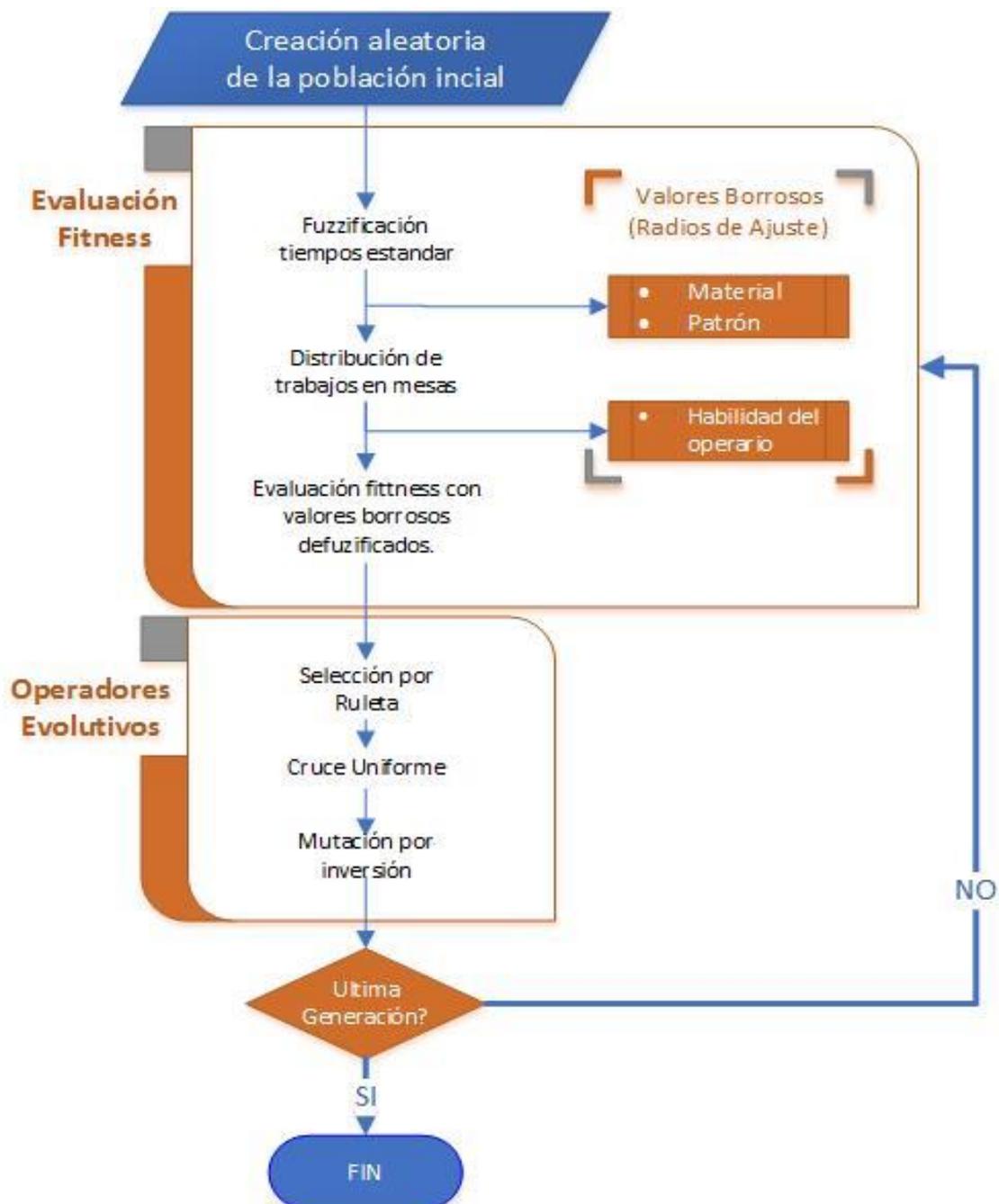
Para ilustrar el esquema de fuzzyficación, se tomara el trabajo de los enterizos Michelin para la talla 40, por lo tanto se tiene un tiempo de extendido de 3,41 minutos y un tiempo de corte de 12,70 minutos, este trabajo será procesado en una mesa de extendido y otra de corte donde los operarios cuentan con una habilidad buena y excelente respectivamente, además se asume que el trabajo tiene una característica de material dura y el patrón de corte es promedio. Teniendo en cuenta todos los parámetros los cálculos serían los siguientes:

$$\begin{aligned} \textit{Extendido} &= 3.41 * (0.98, 1.02, 1.06) * (1.04, 1.09, 1.14) \\ &= (3.47, 3.79, 4.12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \textit{Corte} &= 12.70 * (0.88, 0.94, 1.00) * (1.04, 1.09, 1.14) * (1.04, 1.09, 1.14) \\ &= (12.08, 14.18, 16.50) \end{aligned}$$

Una vez obtenida la tripleta de números borrosos, con la ayuda de la tabla de los radios de ajuste (Tabla 1), se introduce en el algoritmo genético para que encuentre el valor esperado del extendido y corte (desfuzzyficación).

### 10.1.3 Desarrollo del algoritmo genético



**Figura 17** Diagrama de Flujo del Algoritmo Genético

**Fuente:** Creada por los Autores

### 10.1.4 Parámetros en algoritmo genético

Dentro del algoritmo genético se destacan 8 parámetros que dependiendo de la dificultad, tamaño y valores esperados en el modelo, siempre van a cambiar, ya que, necesitan adaptarse al entorno del problema. Estos parámetros son los siguientes: Tipo de Población, Tamaño de la población, Cantidad de iteraciones o individuos, Tipo de selección (Representación), Tipo de cruce, Tipo de mutación, Probabilidad de mutación y Probabilidad de cruce (Figura 17).

Para lograr determinar el valor de algunos parámetros, se decidió dejar correr varias veces el programa, variando el tamaño de la población y las iteraciones, con el objetivo saber cómo se comporta el modelo con los mismos. En el (Anexo 1) se observa en detalle los resultados obtenidos con cada conjunto de parámetros modificados, con su debido resultado y tiempo de finalización.

#### Tipo de población

Dentro del algoritmo genético existen tres tipos de población: binario, valores reales y permutaciones, para lograr la solución al modelo el tipo que corresponde a lo esperado es el de permutación, ya que, necesitamos que a partir de un conjunto de números enteros se distribuyan y logren el adecuado orden, de trabajos programados (Figura 18)

Cromosoma	3	6	1	8	5	10	4	2	7	9
Trabajos	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10

**Figura 18** Representación del cromosoma.

#### Tamaño de la Población

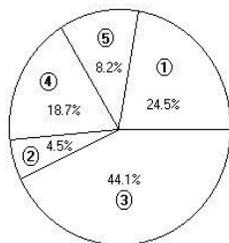
Para decidir el tamaño de la población se realizaron varias pruebas (Anexo 1) para evaluar el comportamiento del algoritmo con los demás valores fijos y se concluyó que la población adecuada para este caso es 150 individuos, por dos motivos: El tiempo de ejecución, debido a que se espera tener una solución rápida al problema, y 45 min se considera aceptable para Confecciones Taller 84, y el resultado obtenido, ya que, fue el más alto en el tiempo permitido, comparándolo con valores superiores, que tardan más de 160 min en resolver, lo cual no sería conveniente para su uso.

### Cantidad de Iteraciones

Al precisar el tamaño de la población, se siguió con las iteraciones o la cantidad individuos que el algoritmo realizará, para ello se generaron varias soluciones y se observó que al tener una gran cantidad de cromosomas o individuos, la probabilidad de encontrar una mejor solución aumenta, pero por razones en tiempo de ejecución, el número de iteraciones se fijó en 100 (Anexo 1).

### Tipo de selección

Con respecto al tipo de selección, se decidió escoger el método de la ruleta (Figura 19), ya que, en este tipo de entorno la probabilidad de seleccionar el mejor individuo es alta, debido a que cada uno de los individuos de la población se le asigna una parte proporcional a su ajuste de una ruleta, de tal forma que la suma de todos los porcentajes sea la unidad. Los mejores individuos recibirán una porción de la ruleta mayor que la recibida por los peores. Además de cumplir con lo esperado este tipo de selección es el más usado, en estos tipos de problemas. (Wong, Mok, & Leung, 2005).

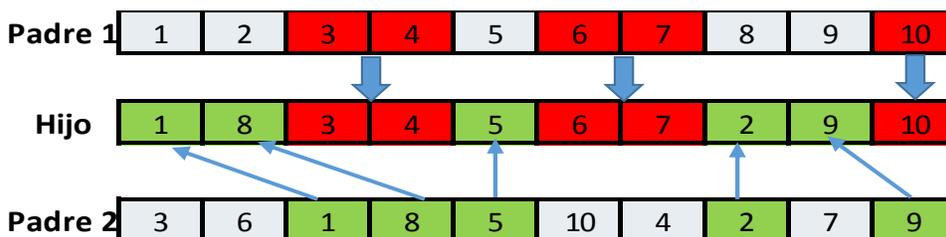


**Figura 19** Ejemplo de Selección por Ruleta

**Fuente:** jessy-inteligenciartificial.blogspot.com

### Tipo de cruce

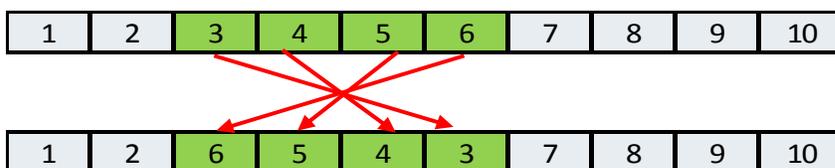
Para lograr mantener siempre los genes de las soluciones más elevadas, se decidió realizar un cruce uniforme (Figura 20) entre dos padres escogidos aleatoriamente entre los individuos, por medio de una máscara binaria, la cual, aleatoriamente selecciona partes del padre 1 y del padre 2, para crear el hijo, asegurando así, que la variabilidad que existe en el proceso de extendido y corte se mantenga e intente disminuir su makespan con la evolución de los cromosomas (Wong, Mok, & Leung, 2005).



**Figura 20** Ejemplo representación Cruce Uniforme  
**Fuente:** Creada por los Autores

### Tipo de mutación

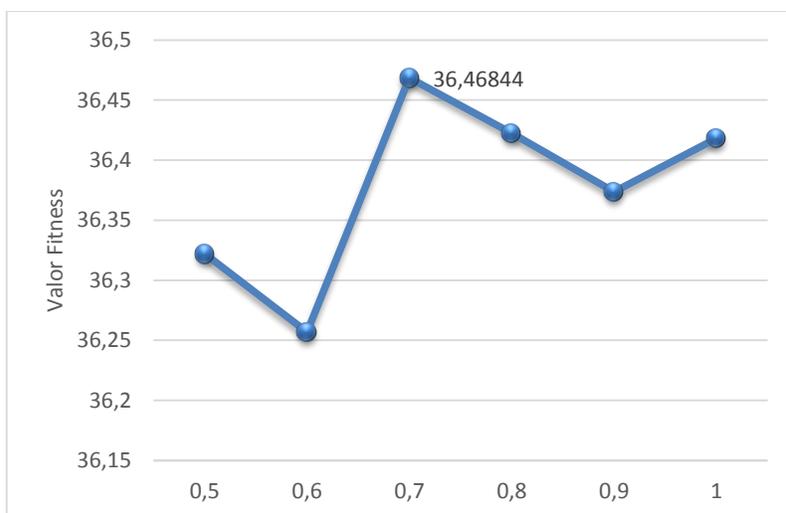
Con el tipo de mutación inversa, lo que se está asegurando es que los cromosomas sean cambiantes, debido a que más de un gen está mutando a la vez, formando así, diferentes individuos con diferentes valores fitness. (Wong, Mok, & Leung, 2005).



**Figura 21** Ejemplo Representación Mutación inversa  
**Fuente:** Creada por los Autores

### Probabilidad de cruce

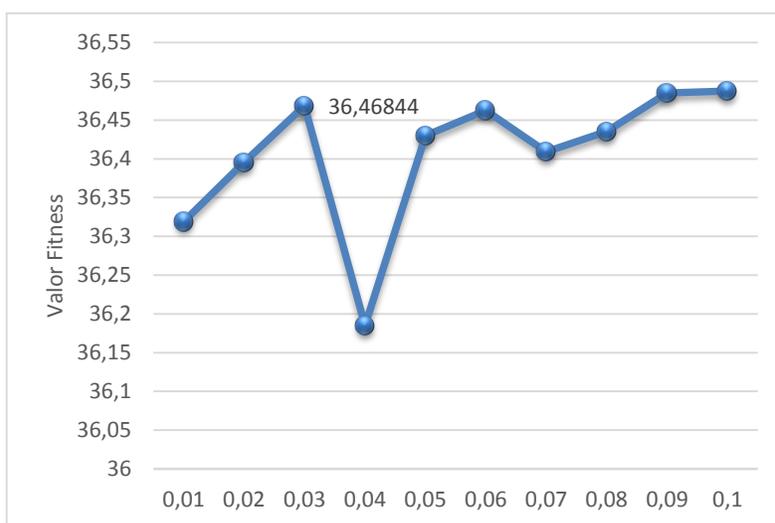
La forma en que se determinó el valor de la probabilidad de cruce se basó, en los supuestos que el resultado depende de la variedad de los cromosomas, y por ende debe ser muy cambiante para lograr evaluar la mayor posible de soluciones; los valores comunes de probabilidad de cruce oscilan entre 50 y 100% según investigaciones y pruebas en la misma industria por expertos (Behnamian, Fatemi Ghomi, Jolai, & Amirtaheri, 2011), (Zhang & Wu, 2011), (Al-Hinai & ElMekkawy, 2011), (Zhang, Gao, & Shi, 2010), (Chang, Huang, & Cheng, 2012), al encontrar estos rangos se realizaron pruebas con ellas y se fijó en  $P_c = 70\%$  (Figura 22) como la probabilidad de cruce en el modelo, lo que deja crear los individuos (trabajos) con partes del cromosoma viejo que posiblemente ayudaran al nuevo cromosoma a ser una mejor solución y poder llegar a sobrevivir en las siguientes generaciones.



**Figura 22 Pruebas en Probabilidad de Cruce**

### Probabilidad de mutación

De la misma manera que la probabilidad de cruce, la probabilidad de mutación, oscila entre un rango, en este caso es bajo, ya que, no es común que dentro del cromosoma mute la mayoría de genes, debido a que se pierde la información importante del mismo, por eso está en valores entre 0 y 0,1%, según los autores expertos en el tema (Kodaganallur, Sen, & Mitra, 2013), (Sakawa & Kubota, 1998), (Wong, Mok, & Leung, 2005), al realizar las pruebas (**Figura 23**) con estos valores se fijó en 0,03%, ya que, se aseguraran cambios dentro del cromosoma.



**Figura 23 Pruebas en Probabilidad de Mutación**

### 10.1.5 Software utilizado



**Figura 24** Logo del Software, R Studio

**Fuente:** <http://www.rStudio.com/>

Las variables que se utilizaron para seleccionar el software en el cual se programó el algoritmo genético se basaron en tres grandes aspectos:

- Costo
- Facilidad
- Eficiencia.

Con respecto al costo vale la pena resaltar que R es un software libre que permite el análisis estadístico y gráfico con una gran variedad de paquetes dentro de la biblioteca, que al igual que el software son totalmente gratis y pueden ser descargadas por internet. Por facilidad y Eficiencia, R posee un entorno de desarrollo integrado llamado R Studio que para una persona con bases en programación puede ser sencillo su manejo, ya que, muestra todo tipo de ayudas para entender y poder desplazarse dentro de la plataforma.

La gran ventaja de R para el caso planteado, es la ayuda del paquete integrado en R Studio llamado GA donde (Scrucca, 2013) explica detalladamente, cuales son los parámetros que pueden ser ingresados al algoritmo y de qué manera; además presenta ejemplos fáciles de entender para el lector, y que será de gran ayuda en el momento de estructurar el algoritmo. La siguiente es la representación del paquete GA con los principales parámetros dentro del software que según el problema a desarrollar varían prácticamente todos los parámetros:

```
ga ( Tipo de Variable (type = c ("binary", "real-valued", "permutation")),
    Función Objetivo (fitness),
    Valores mínimos del vector (min),
    Valores máximos del vector (max),
    Población (population),
    Tipo de Selección (selection),
    Tipo de Cruce (crossover),
```

Tipo de Mutación (*mutation*),  
 Tamaño de la Población (*popSize*),  
 Probabilidad de cruce (*pcrossover*),  
 Probabilidad de mutación (*pmutation*),  
 Numero de Iteraciones (*maxiter*) )

**Figura 25** Representación de la función ga, dentro del paquete a utilizar.

**Fuente:** Paquete GA, R Studio

### 10.1.6 Ingreso y representación de parámetros en R Studio

Después de tener todos los parámetros definidos por el algoritmo, el siguiente paso es ejecutar el modelo hasta que cumpla con todos los requisitos (Anexo 6). El resultado será la (Figura 26), la cual muestra el tamaño inicial de la población (100 individuos), el número de iteraciones (100), su probabilidad de cruce (0,7) y probabilidad de mutación (0,03), dando como resultado 36,28485 y un vector de 44 números enteros los cuales son los trabajos a realizar. En el caso del proyecto realizado, el cromosoma representaría el orden de los trabajos a realizar, que posteriormente en el modelo completo se distribuyen en las mesas, dependiendo de los parámetros de entrada mencionadas en la sección (Fuzzyficación de variables difusas).Fuzzyficación de variables difusas

```

+-----+
|           Genetic Algorithm           |
+-----+

GA settings:
Type                = permutation
Population size     = 100
Number of generations = 100
Crossover probability = 0.7
Mutation probability = 0.03

GA results:
Iterations          = 100
Fitness function value = 36.28485
Solutions          =
  x1 x2 x3 x4 x5 x6 x7 x8 x9 x10 x11 x12 x13 x14 x15 x16 x17 x18 x19 x20 ... x44
[1,] 17  5 42  1 18  2  7 14 12 41  6  8  3 29 30 33 10  9 25 15  ... 35

```

**Figura 26** Resultado a ejemplo del modelo, con el paquete GA de R studio.

**Fuente:** Plataforma, R Studio

La función objetivo implementada en el algoritmo genético se basó en ecuaciones planteadas por (Mok, Kwong, & Wong, 2006), la cual por sus resultados y experiencia de uso en el mismo campo de trabajo, es adecuado su manejo. Las siguientes son las representaciones de las ecuaciones que forman la FO para cada resultado del cromosoma ( $\sigma$ ):

$$\mathbf{Makespan}(\sigma) = \left( \frac{T_{\text{objetivo}}}{T_{\text{makespan}}(\sigma)} \right) * W_T$$

**Ecuación 1.** Minimización en el tiempo de Makespan

**Fuente:** Mok & Wong, 2006

La primera es el valor makespan o tiempo total del proceso (*Ecuación 1*) donde  $T_{\text{Objetivo}}$  es el tiempo objetivo que tiene la empresa para cierta cantidad de pedidos, en el caso de CONFECCIONES TALLER 84, su objetivo es lograr cumplir su cantidad de pedidos por turno, en 5 horas, ya que son las horas en las que los empleados están totalmente activos, el  $T_{\text{makespan}}(\sigma)$  es el tiempo max entre las dos mesas utilizadas para el proceso de extendido y corte, debido a que sería el cuello de botella del mismo, y  $W_t$  es un parámetro de peso para dar prioridad a la ecuación. Ésta ecuación busca reducir el tiempo del makespan con respecto al orden  $\sigma$  de los pedidos, buscando que el  $T_{\text{Objetivo}}$  y el  $T_{\text{makespan}}$  sean muy cercanos, para que la ecuación de un valor máximo.

$$\mathbf{Consistencia}(\sigma) = \sum_{k=1}^2 \left( \frac{\sum_{j=1}^m \text{var}_k(\sigma, j)}{\max_{j=1, \dots, m}(\text{var}_k(\sigma, j))} \right) * W_{c,k}$$

**Ecuación 2.** Minimización en la variación entre proceso de corte y extendido.

**Fuente:** Mok & Wong, 2006

La segunda ecuación referenciada para la FO es la consistencia de los procesos (*Ecuación 2*) donde  $\text{var}_k(\sigma, j)$  es el valor *del rango* borroso (Figura 9) del proceso de extendido ( $k=1$ ) y corte ( $k=2$ ) en la mesa  $j$ , el  $\max(\text{var}_p(\sigma, k))$  es el valor máximo del *rango* entre las mesas,  $w_{cp}$  es un parametro de peso, el objetivo de esta función es lograr que los valores *del rango* total del tiempo borroso por mesa y por proceso sean lo mas parecidas entre ellas, y asi buscar que los tiempos sean coherentes, es decir, el algoritmo va a procurar que la homegenidad de la distribución de trabajos en las mesas  $j$  se cumpla, por eso si el valor que da como resultado la forma  $\text{var}_p(\sigma, j) / \max(\text{var}_p(\sigma, j))$ , es cercano a 1, quiere decir que sus resultados son similares.

$$\mathbf{Rango}(\sigma) = \sum_{k=1}^2 \left( \frac{\min (var_k(\sigma, j))}{\max_{j=1, \dots, m} (var_k(\sigma, j))} \right) * W_{,k}$$

**Ecuación 3.** Minimización del Rango

**Fuente:** Mok & Wong, 2006

Y por último se intenta controlar y minimizar el *rango* (Figura 9) del tiempo total de las mesas, para que su valor no tenga demasiada amplitud, ya que, entre menos sea éste valor, mayor será la pertenencia del trabajo, es decir, que su variación del tiempo va a ser más corta, por lo tanto, la certeza de que el valor medio no cambie demasiado, aumenta. Los valores  $\lambda_p$  (Ecuación 3), son constantes, y para el caso de los tiempos de trabajo se tomaron como el *spread* más bajo de cada mesa, debido a que se busca igualar el valor max y el min para lograr lo anteriormente mencionado ,y por ultimo  $W_{vp}$  es un parámetro de peso dentro de la función.

Para finalizar se suman estos tres resultados para obtener la función objetivo (Ecuación 4) , el cual minimizará el tiempo del proceso, asegurando mayor fiabilidad de los datos y el rendimiento de los trabajos realizados, para incorporar la función objetivo en el algoritmo genético, la idea es buscar el valor máximo del mismo, ya que, según las ecuaciones planteadas por el autor y corroboradas por el modelo actual, entre más grande sea el resultados de la FO , el makespan total será menor. En la Ecuación 1, se entiende fácilmente, donde al disminuir  $T_{makespan}$ , aumenta el valor de su función.

$$\mathbf{Función\ Objetivo} (\sigma) = \mathbf{Makespan} (\sigma) + \mathbf{Concistencia} (\sigma) + \mathbf{Rango}(\sigma)$$

**Ecuación 4.** Función objetivo

**Fuente:** Mok & Wong, 2006

## 11. Resultados

Para evaluar los resultados obtenidos en la metodología propuesta, la forma más apropiada consiste en comparar los resultados obtenidos por dos métodos de distribución diferente: El primero es el generado por Confecciones Taller 84, el cual la persona encargada del área de producción distribuye a su parecer los trabajos (prioridad de clientes y experiencia), dejando la mayoría de veces una mesa más cargada de trabajo que la otra. El otro método de distribución es el propuesto con ayuda del algoritmo genético, el cual la prioridad de los clientes no es el pilar del mismo, lo que se desea es encontrar una homogeneidad de los trabajos en ambas mesas, buscando reducir los tiempos de terminación de los trabajos o en otras palabras el makespan del proceso de corte y extendido. Vale la pena mencionar que los resultados de ambos métodos de distribución tienen incluidas las variables difusas, los cuales aseguran resultados más cercanos a la realidad.

### 11.1 Distribución propuesta por Confecciones Taller 84

Con la distribución establecida por Confecciones Taller 84, se encontró que en la mesa 1 (Anexo 2) el total de las prendas realizadas fueron 1014, mientras que en la mesa 2 (Anexo 3), 399 prendas (Tabla 2), lo que representa un peso del 72% de prendas en la mesa 1, generando demasiado stock en la mesa de trabajo, y un poco uso del espacio de la zona de corte (2 mesas de 18 m).

Referencia	Trabajos	Prendas	% Trabajos	% Prendas
Mesa 1	22	1014	50%	72%
Mesa 2	22	399	50%	28%
Totales	44	1413	44	1413

Tabla 2 Cantidades, Distribución propuesta por Confecciones

Mesa	Actividad	Makespan (min)	Makespan (hh:mm)
Mesa 1	Extendido	381,942	6:21
Mesa 1	Corte	397,591	6:37
Mesa 2	Extendido	321,919	5:21
Mesa 2	Corte	341,024	5:41

Tabla 3 Tiempos Totales, Confecciones Taller 84

Según la (Tabla 3) que muestra los tiempos totales de proceso por mesa se fija como tiempo makespan el tiempo de finalización en la mesa 1 con 6 horas con 37 minutos, teniendo una diferencia aproximada de una hora entre ambas mesas. En la (Figura 27) se ilustran los resultados obtenidos en su orden respectivo (Tabla 7), reflejando una desigualdad de los trabajos realizados en ambas mesas, y un tiempo de espera más representativo en la mesa 2, debido al poco rendimiento que brindan los operarios de dichas operaciones, al realizar menor volumen de trabajos.

### 11.2 Distribución obtenida con la metodología propuesta

Con la nueva distribución de los trabajos, se ve uniformidad en las cantidades producidas, ya que, como se ve en la (Tabla 4), las cantidades de prendas producidas están equitativas con una diferencia del 7,3% entre ambos, teniendo la mesa 1 (Anexo 4) el 42% de las prendas, y la mesa 2 (Anexo 5) el 58% lo que genera, un stock menor en cada mesa, y por lo tanto un tiempo de ocio menor, debido a que la metodología propuesta busca disminuir todos esos tiempos makespan menor.

Referencia	Trabajos	Prendas	% Trabajos	% Prendas
<b>Mesa 1</b>	19	597	43%	42%
<b>Mesa 2</b>	25	816	57%	58%
<b>Totales</b>	44	1413	44	1413

**Tabla 4** Cantidades, Distribución propuesta por los autores

Mesa	Actividad	Makespan (min)	Makespan (hh:mm)
<b>Mesa 1</b>	Extendido	334,4334	5:34
<b>Mesa 1</b>	Corte	353,7727	5:53
<b>Mesa 2</b>	Extendido	369,1237	6:09
<b>Mesa 2</b>	Corte	381,5588	6:24

**Tabla 5** Tiempos Totales, Propuesta de los Autores.

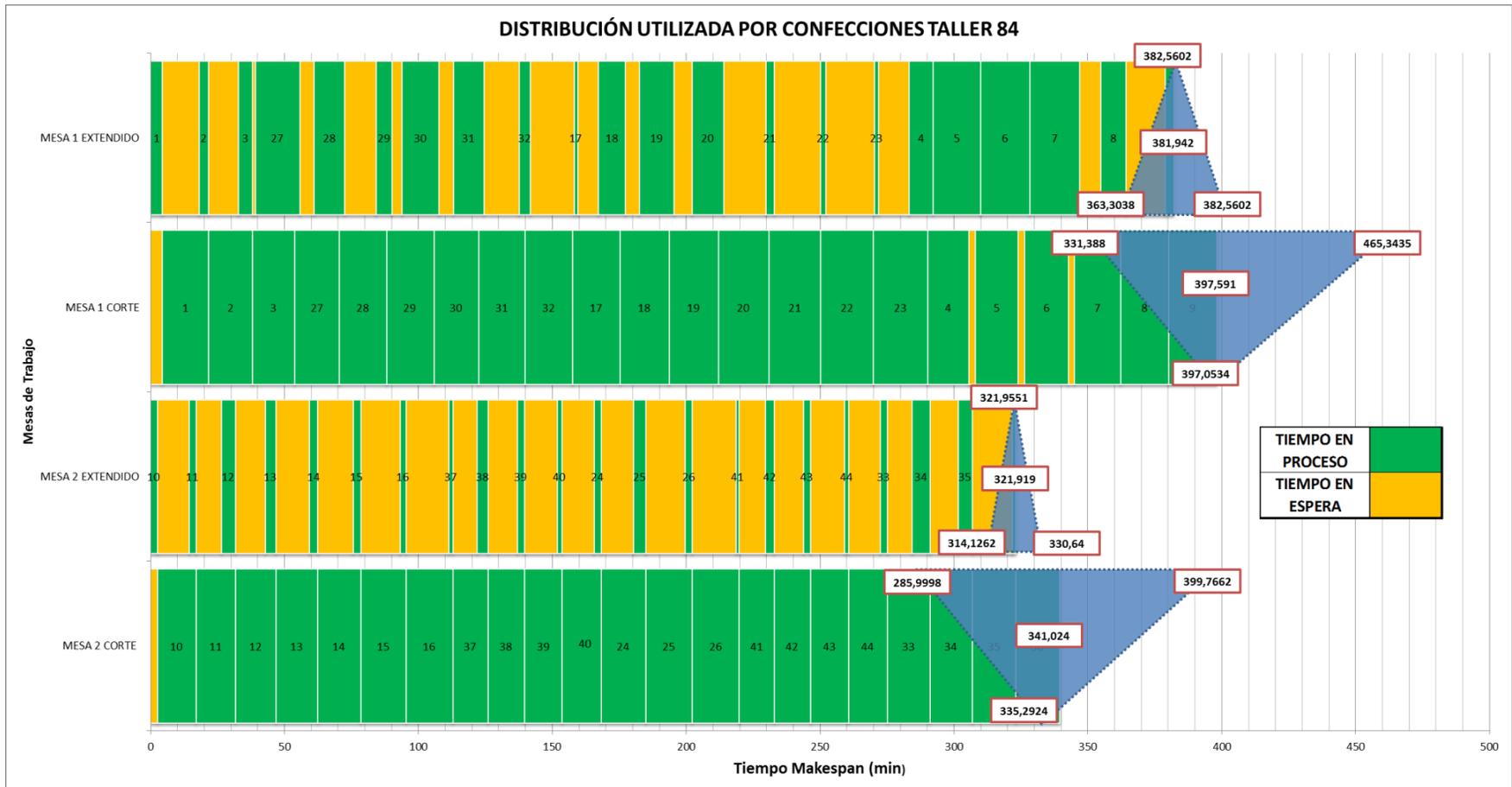
**Fuente:** Creada por los Autores.

En la (Figura 28) se puede observar la distribución obtenida con la metodología propuesta, con sus valores de TFN respectivos, por mesa y por proceso, los cuales representan los rangos que pueden llegar a tener los tiempos de los mismos con su tiempo esperado de finalización (desfuzzyficación). En este caso los tiempos de ocio, que estaban muy cargados hacia una mesa en la propuesta de Confecciones Taller 84, se distribuyeron en ambas mesas (Tabla 8), generando que el tiempo productivo de los empleados aumente, por lo que el tiempo total del proceso disminuye. En este caso la mesa 2 fue la que determinó el makespan del proceso con 6 horas con 24 minutos, teniendo una diferencia de aproximadamente 30 min con respecto al tiempo de finalización de la mesa 1 (Tabla 5).

<b>Mesa</b>	<b>Actividad</b>	<b>CONFECCIONES TALLER 84</b>	<b>METODOLOGIA PROPUESTA</b>	<b>DIFERENCIA</b>
<b>Mesa 1</b>	<b>Extendido</b>	6:21	5:34	0:47
<b>Mesa 1</b>	<b>Corte</b>	6:37	5:53	0:43
<b>Mesa 2</b>	<b>Extendido</b>	5:21	6:09	0:47
<b>Mesa 2</b>	<b>Corte</b>	5:41	6:24	0:43

**Tabla 6** Comparación de los tiempos en la Mesa 1 y Mesa 2

**Fuente:** Creada por los Autores.



**Figura 27** Diagrama de Gantt, Propuesta Confecciones Taller 84

**Fuente:** Creada por los Autores

<b>MESA 1</b>	1	2	3	27	28	29	30	31	32	17	18	19	20	21	22	23	4	5	6	7	8	9
<b>MESA 2</b>	10	11	12	13	14	15	16	37	38	39	40	24	25	26	41	42	43	44	33	34	35	36

**Tabla 7** Representación del cromosoma, propuesta por Confecciones Taller 84

**Fuente:** Creada por los Autores



### 11.3 Beneficio del makespan con la metodología propuesta

En la (Tabla 6) , se puede observar la diferencia entre los tiempos de corte y extendido de las dos propuestas, dando como resultado valores aproximados a 45 min como diferencia entre los dos métodos de distribución de trabajos, lo que refleja un buen cambio en los tiempos totales de los procesos, adicionalmente se evidencia que los valores makespan variaron de mesa, ya que, en la propuesta de Confecciones Taller 84, su tiempo lo definió la mesa 1, debido a la carga de trabajo que previamente se explicó, y en la propuesta obtenida con los algoritmos genéticos , la mesa 2, obtuvo el valor del makespan, esto se dio por la variedad que se le aplicó a cada mesa de la propuesta planteada, ya que, se buscó agrupar los trabajos adecuados, logrando una homogeneidad en ambas mesas, pasando de un 44% de diferencia a 16% con respecto a las prendas elaboradas (Tabla 9), logrando mayor eficiencia del proceso, del espacio y de los operarios.

Referencia	% Prendas T84	% Prendas Propuesto
Mesa 1	72%	42%
Mesa 2	28%	58%
Diferencia	44%	16%

**Tabla 9** Porcentaje de utilización de las mesas con respecto a las prendas elaboradas

Con ayuda de la (Tabla 10) se determinó el beneficio total de tiempo, realizando el cálculo de la reducción del tiempo obtenido con la metodología propuesta, frente a la propuesta que sugirió Confecciones Taller 84, dio que se reduce en 13 minutos por turno, o 26 por día, que representa un 4,167%, el cual para la empresa es de gran ayuda, debido que se podrá utilizar este tiempo para fabricar más prendas y/o completar pedidos pendientes.

Valor de Makespan	(hh:mm)
<b>CONFECCIONES TALLER 84</b>	6:37
<b>PROPUESTO</b>	6:24
<b><u>AHORRO POR TURNO</u></b>	<b><u>0:13</u></b>

**Tabla 10** Ahorro con la propuesta de los Autores.

**Fuente:** Creada por los autores

## 12. Análisis costo-beneficio

### 12.1 Captura de datos

La captura de datos y el análisis se realizó con la ayuda de la supervisora de planta, la encargada del área de diseño y del director comercial. Durante la elaboración del análisis de costo-beneficio se tuvieron en cuenta los trabajos que tienen una mayor frecuencia, es decir los trabajos que más solicitan los clientes. Además con el fin de detallar los costos por prendas de una manera más específica, con ayuda de la supervisora de planta también se concluyó que de los trabajos promedio totales realizados en un día (ver documento anexo “Análisis-beneficio, Hoja: Memorias de cálculo”), se elaboran con la misma proporción, es decir el número de prendas finales de cada trabajo de la (Tabla 11) es igual en promedio.

Tipos de trabajo	Prendas diarias
Enterizos Michellin	265
Camisa y Pantalón Tellandas con bolsillo	265
Camisa y Pantalón Tellandas sin bolsillo	265
Camisa- Manga corta Combinada MC Esso	265
Camisa- manga corta combinada Mobil	265
Camisa Combinada Manga larga – Mujer	265
Camiseta Combinada contratista MC – Mujer	265
Camiseta Combinada MC – Mujer	265
Total prendas promedio diarias	2119

**Tabla 11:** Tipos de trabajos con alta frecuencia

Los egresos que se tuvieron en cuenta dentro del flujo de caja fueron los siguientes:

- Costos de materia prima:

Se introdujeron los costos correspondientes a la tela, cantidad de hilo, botones y cremalleras necesarias para elaborar cada uno de los trabajos de la (Tabla 11).

- Costos de diseño:

En los costos de diseño se tuvieron en cuenta costos como el papel Kraft que se utiliza para diseñar los patrones de corte, además se estimó la cantidad de tinta para cada patrón de corte. En

la reunión con la encargada del área se estimó que en promedio se realizan 5 patrones de corte cada trabajo de la (Tabla 11), los 5 patrones se deben a que en promedio cada trabajo se realiza en 5 tallas diferentes.

- Costos de distribución:

Los costos de distribución fueron estimados con la colaboración del encargado de los despachos. El costo de la gasolina por trabajo, así como el costo del operario que entrega los pedidos por trabajo fueron calculados para cada prenda.

- Retención en la fuente:

El impuesto a la actividad industrial de producir prendas de vestir fue tenido en cuenta.

- Salarios y prestaciones:

Los salarios de los operadores de planta, analistas, nivel 1 administradores y nivel 2 administradores fueron calculados con todas las prestaciones de ley.

- Otros costos:

En la sección de otros costos se tuvo en cuenta los costos de servicios públicos, mantenimiento de máquinas, autos y computadores.

Todos los costos fueron calculados y estimados gracias a la colaboración de las diferentes áreas de Confecciones Taller 84 (Ver documento anexo “Análisis-beneficio, Hoja: Memorias de cálculo”).

## 12.2 Parámetros del análisis.

Confecciones Taller 84 solicitó que en la evaluación del proyecto propuesto se manejara una tasa de retorno mínima del 10%. Además solicitaron que las ventas se incrementarían en un 6% y los costos en 4%.

Con base en los resultados obtenidos por el algoritmo genético propuesto se evidenció que con la implementación del modelo la producción de Confecciones Taller 84 la producción se incrementaría un 4,167%.

Una evaluación del proyecto a 5 años fue solicitada por Confecciones Taller 84 debido a que la empresa considera que la vida útil de un software como *R-studio* es de 5 años.

## 12.3 Análisis del valor presente neto.

Al calcular el flujo de caja sin la implementación del algoritmo genético, es decir en la situación actual y basándonos en las apreciaciones realizadas en la sección 11. 9.1, obtuvimos el siguiente flujo de caja (Figura 29).

TRM	10%					
Costos y beneficios sin algoritmo.	1	2	3	4	5	
Ingresos en efectivo						
Ventas	\$ 17.964.230.254	\$ 19.042.084.070	\$ 20.184.609.114	\$ 21.395.685.661	\$ 22.679.426.800	
Costos						
Costo Materia Prima	\$ 9.824.292.000	\$ 10.217.263.680	\$ 10.625.954.227	\$ 11.050.992.396	\$ 11.493.032.092	
Costos de diseño	\$ 207.916.000	\$ 216.232.640	\$ 224.881.946	\$ 233.877.223	\$ 243.232.312	
Costos de distribución	\$ 26.112.179	\$ 27.156.667	\$ 28.242.933	\$ 29.372.651	\$ 30.547.557	
Retefuente	\$ 74.371.913	\$ 77.346.790	\$ 80.440.661	\$ 83.658.288	\$ 87.004.619	
Salarios y prestaciones	\$ 1.241.029.004	\$ 1.290.670.164	\$ 1.342.296.971	\$ 1.395.988.849	\$ 1.451.828.403	
Otros Costos	\$ 1.038.575.000	\$ 1.080.118.000	\$ 1.123.322.720	\$ 1.168.255.629	\$ 1.214.985.854	
Total costos	\$ (12.412.296.097)	\$ (12.908.787.940)	\$ (13.425.139.458)	\$ (13.962.145.036)	\$ (14.520.630.838)	
Flujo neto total	\$ 5.551.934.158	\$ 6.133.296.129	\$ 6.759.469.656	\$ 7.433.540.624	\$ 8.158.795.963	
VPN	\$ 25.337.720.897					

**Figura 29:** VPN a 5 años de la situación actual.

Donde se tuvieron en cuenta los ingresos y egresos, con el fin de obtener el valor presente neto con una proyección a 5 años.

Con la implementación del algoritmo propuesto se tiene que incurrir en una inversión que está compuesta por:

- Consultoría conceptual en la etapa inicial del proyecto, la cual representa las horas dedicadas por parte del equipo consultor para analizar, preparar, desarrollar, diseñar y ejecutar el modelo.
- Consultoría de transformación y apoyo: esta consultoría permitirá el sostenimiento del algoritmo en el largo plazo, este sostenimiento y mejoramiento será realizado por un consultor que se encargara de resolver las dudas acerca del modelo, resolver cualquier falla del modelo y proponer mejoras al mismo, durante los 5 años de ejecución.

Además se tendrá que invertir en un nuevo computador que cumpla con un procesador i5 donde se podrá correr el modelo con una mayor velocidad.

El valor presente neto calculado a 5 años con la implantación del modelo propuesto incrementó en 4,167% la producción como se muestra en la (Tabla 12).

Aumento de la producción		
%	Unidades	Unidades para cada prenda
4,167%	88	11

**Tabla 12:** Aumento de la producción

Gracias a la discriminación de costos por prenda se pudo obtener que el aumento en la producción se vio reflejado en las cuentas de ingresos costos de materias primas, costos de distribución, costos de diseño debido a que se van a producir 88 unidades más por día (Ver documento anexo “Análisis-beneficio, Hoja: Memorias de cálculo”).

Los demás egresos fueron incrementados en un 4% y las ventas se ajustaron de acuerdo a la expectativa de crecimiento de Confecciones Taller 84 del 6% anual.

TRM	10%					
Costos y beneficios Con algoritmo.	0	1	2	3	4	5
<b>Inversión</b>						
R-Studio programa	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Consultoría	\$ 54.000.000	\$ 42.000.000	\$ 43.680.000	\$ 45.427.200	\$ 47.244.288	\$ 49.134.060
Computador	\$ 1.800.000					
<b>Ingresos en efectivo</b>						
Ventas		\$ 18.711.265.405	\$ 19.833.941.330	\$ 21.023.977.810	\$ 22.285.416.478	\$ 23.622.541.467
<b>Costos</b>						
Costo Materia Prima		\$ 10.232.641.287	\$ 10.641.946.939	\$ 11.067.624.816	\$ 11.510.329.809	\$ 11.970.743.001
Costos de diseño		214901196,6	223.497.244	232.437.134	241.734.620	251.404.004
Costos de distribución		\$ 27.200.274	\$ 28.288.285	\$ 29.419.816	\$ 30.596.609	\$ 31.820.473
Retefuente		\$ 77.464.639	\$ 80.563.224	\$ 83.785.753	\$ 87.137.183	\$ 90.622.671
Salarios y prestaciones		\$ 1.241.029.004	\$ 1.290.670.164	\$ 1.342.296.971	\$ 1.395.988.849	\$ 1.451.828.403
Otros Costos		\$ 1.038.575.000	\$ 1.080.118.000	\$ 1.123.322.720	\$ 1.168.255.629	\$ 1.214.985.854
Total egresos		\$ (12.831.811.400)	\$ (13.345.083.856)	\$ (13.878.887.210)	\$ (14.434.042.699)	\$ (15.011.404.407)
<b>Flujo neto total</b>	\$ 55.800.000	\$ 5.879.454.005	\$ 6.488.857.474	\$ 7.145.090.599	\$ 7.851.373.779	\$ 8.611.137.060
<b>VPN</b>	\$ 26.841.095.185					

**Figura 30:** VPN a 5 años con la el algoritmo propuesto

## 12.4 Resultados del análisis

Al comparar los dos modelos el VPN (Tabla 13) se observa que el VPN del algoritmo genético es mayor debido a que la producción aumenta, lo cual implica que los costos de materias primas, diseño, distribución aumenten.

Comparación VPN	
Sin algoritmo	\$ 25.337.720.897
Con algoritmo	\$ 26.841.095.185

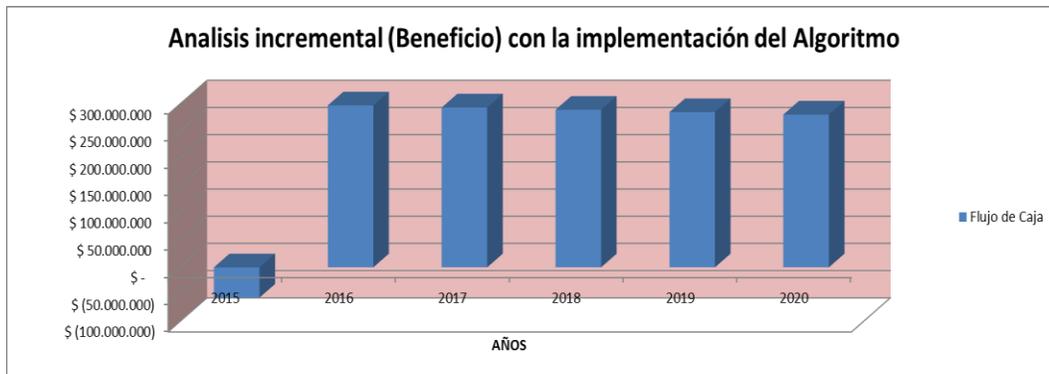
**Tabla 13:** comparación entre VPN sin algoritmo y con algoritmo.

El factor de relación costo-beneficio (Tabla 14) evidencia que la inversión se recupera en su totalidad y que además se obtiene aproximadamente 26 veces el dinero invertido. Este factor se obtiene gracias a que la inversión del proyecto propuesto no es tan alta comparada con la diferencia entre los VPN.

<b>Factor de relación beneficio / Costo</b>	26,94
---	-------

**Tabla 14:** Factor Costo-Benéfico.

Los beneficios que se obtienen durante cada año están descritos en la Figura 31, donde se observa que el 4,167% de aumento en la producción diaria refleja unos beneficios altos para Confecciones Taller 84.



**Figura 31:** Beneficios por año.

### 13. Conclusiones

- El modelo matemático desarrollado y ejecutado mediante algoritmos genéticos con lógica difusa, logró minimizar el makespan de la empresa Confecciones Taller 84 en 26 minutos diarios, gracias a que se mejoró la distribución de los trabajos asignados a cada mesa.
- Mediante el modelo propuesto se logró incrementar la eficiencia del proceso en 4,167%, el tiempo ahorrado se podrá utilizar para elaborar más prendas, logrando disminuir los tiempos de proceso e incrementando las ganancias.
- La inclusión de la lógica difusa en el algoritmo genético permite analizar variables como la habilidad del operario, características de la tela y la dificultad del patrón de corte, con el fin de obtener un modelo más ajustado a la realidad y por lo tanto más robusto, características que no tenían los anteriores modelos de la programación de la producción resueltos mediante la aproximación de algoritmos genéticos.

- El factor de costo-beneficio que se obtuvo demuestra que los beneficios que se obtienen con la implementación del modelo de producción resuelto por medio de la aproximación de algoritmo genético comparado con el modelo actual, alcanzan a cubrir la inversión inicial y además se obtienen ganancias por aproximadamente 19 veces la inversión inicial.

#### **14. Recomendaciones**

- Se recomienda que para investigaciones futuras se desarrolle un modelo que permita tener en cuenta los tiempos de alistamiento tanto para el proceso de extendido, como para el proceso de corte.
- Desarrollar otras Meta-heurísticas como Grasp, Búsqueda Tabú, Colonia de hormigas, Búsqueda Scatter, entre otras con el fin de comparar las soluciones y determinar que método de solución funciona mejor para el modelo propuesto.
- Plantear y ejecutar un diseño de experimentos que permita identificar cuáles factores afectan de una manera significativa la eficiencia en el desarrollo del algoritmo genético.

## 15. Referencias Bibliográficas

- Abeysooriya, R. .. (2012). Canonical genetic algorithm to optimize cut order plan solutions in apparel manufacturing.
- Al-Hinai, N., & ElMekkawy, T. (2011). Robust and stable flexible jobs hop scheduling with random machine. *Production Economics*.
- Arango, M. D., & Urán, C. A. (2008). Aplicaciones de lógica difusa a las cadenas de suministro.
- Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S., Jolai, F., & Amirtaheri, O. (2011). Minimizing makespan on a three-machine flowshop batch scheduling problem with transportation using genetic algorithm. *Applied Soft Computing*.
- Chang, P.-C., Huang, W.-H., & Cheng, T. (2012). A block mining and re-combination enhanced genetic algorithm for the permutation flowshop scheduling problem. *Production economics*.
- DANE. (Julio de 2014). *Muestra Mensual Manufacturera*. Recuperado el 22 de septiembre de 2014, de [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/mmm/Pres\\_MMM\\_jul14.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/mmm/Pres_MMM_jul14.pdf)
- Dawn, M. R., & Shierb, D. R. (Noviembre de 2007). Cut Scheduling in the Apparel Industry. *Science Direct*.
- Guo, Z., & Wong, W. K. (2013). Fundamentals of artificial intelligence techniques for apparel management applications. 13-40.
- Kodaganallur, V., Sen, A., & Mitra, S. (2013). Application of graph search and genetic algorithms for the single machine scheduling scheduling problem with sequence-dependent setup times and quadratic penalty function of completion times.
- Mayorga, D. (06 de 12 de 2013). *El espectador*. Recuperado el 22 de 09 de 2014, de Un año para la industria textil y las confecciones: <http://www.elespectador.com/noticias/economia/un-ano-industria-textil-y-confecciones-articulo-462679>
- Mok, P. (2011). Intelligent apparel production planning for optimizing manual operations using fuzzy set theory and evolutionary algorithms.
- Mok, P., Kwong, C., & Wong, W. (2006). Optimisation of fault-tolerant fabric-cutting schedules using genetic algorithms and fuzzy set theory. *European Journal of Operational Research*.
- Mok, P., Kwong, C., & Wong, W. (2007). Optimization of fault-tolerant fabric-cutting schedules. *Science Direct*.
- Mok, P.-Y., & Wong, W. (4 de Julio de 2006). *Optimization Of Fault-Tolerant Fabric-Cutting Table Planning in a Just-In-Time Apparel Manufacturing Environment*. Recuperado el 23 de Agosto de 2014, de IIE Xplore: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4018363>
- Muñoz, A. D. (2007). Metaheurísticas. Dykinson.

- Ochoa, D. S. (31 de Marzo de 2004). Equilibrio de líneas de ensamble en la industria del vestido: un enfoque mediante algoritmos genéticos híbridos. *Tesis*.
- Quintero, M. A. (2009). Métodos heurísticos para la planificación y el manejo forestal.
- Sakawa, M., & Kubota, R. (1998). Fuzzy programming for multiobjective job shop scheduling with fuzzy processing time and fuzzy due date through genetic algorithms. *European Journal of operational research*.
- Sánchez, Á. G. (2007). *Técnicas Metaheurísticas*. Obtenido de <http://www.iol.etsii.upm.es/arch/metaheuristicas.pdf>
- Scrucca, L. (2013). GA: A Package for Genetic Algorithms in R. *Journal of Statistical Software*.
- Tiempo, E. (22 de 09 de 2014). *El Tiempo*. Recuperado el 22 de 09 de 2014, de <http://www.eltiempo.com/economia/indicadores/negociacion-de-dolares-en-colombia/14572955>
- Uribe, T., & Manuel, B. (2010). Control optimizado con algoritmos genéticos para modelo didáctico de control de tensión para procesos textiles.
- Vélez, L. G., Rodríguez, E. F., & Camacho, M. T. (Agosto de 2013). *Super Sociedades*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2014, de <http://www.supersociedades.gov.co/Documents/Informe-Sector-Textil-Oct152013.pdf>
- Voß, S. (1999). Meta-heuristics: The State of the Art.
- Wong, W. (1 de Agosto de 2000). Optimization of spreading and cutting sequencing model.
- Wong, W. K., Kwong, C. K., & Mok, P. (2013). Optimizing fabric spreading and cutting schedules in apparel production using genetic algorithms and fuzzy set theory.
- Wong, W., & Leung, S. (2013). Optimizing cut order planning in apparel production using evolutionary strategies.
- Wong, W., Mok, P., & Leung, S. (2005). Developing a genetic optimisation approach to balance an apparel assembly line. *Springer-Verlag London Limited*.
- Zhang, G., Gao, L., & Shi, Y. (2010). An effective genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. *Expert systems with applications*.
- Zhang, R., & Wu, C. (2011). Bottleneck machine identification method based on constraint. *Information Sciences*.

## 16. Apéndices

### 16.1 Anexo 1 (Evaluación del AG)

Tamaño Población	Iteraciones	Pc	Pm	Función Objetivo	Tiempo Aproximado (min)
10	10	0,7	0,03	33,2486	5
20	10	0,7	0,03	34,2132	5
30	10	0,7	0,03	35,6245	5
50	10	0,7	0,03	35,2973	5
50	30	0,7	0,03	36,1315	5
50	50	0,7	0,03	35,7989	8
60	50	0,7	0,03	36,215	10
60	60	0,7	0,03	36,1964	12
70	50	0,7	0,03	36,1778	20
70	60	0,7	0,03	36,267	32
70	70	0,7	0,03	36,3561	25
80	50	0,7	0,03	35,8702	36
80	80	0,7	0,03	36,3217	34
90	80	0,7	0,03	36,2981	33
90	90	0,7	0,03	34,657	39
100	50	0,7	0,03	35,7254	35
100	60	0,7	0,03	36,305	37
100	90	0,7	0,03	36,4016	40
100	100	0,7	0,03	36,2848	42
120	80	0,7	0,03	35,4893	72
120	100	0,7	0,03	36,3814	46
120	120	0,7	0,03	36,3297	65
150	50	0,7	0,03	36,0258	40
150	100	0,7	0,03	36,4493	45
150	120	0,7	0,03	36,4235	48
150	150	0,7	0,03	36,3815	52
170	50	0,7	0,03	36,3654	60
170	100	0,7	0,03	35,1598	87
170	170	0,7	0,03	36,418	96
180	100	0,7	0,03	36,3791	115
180	180	0,7	0,03	35,9864	100
200	50	0,7	0,03	36,3002	120
200	80	0,7	0,03	36,3421	172
200	100	0,7	0,03	36,4443	116
200	150	0,7	0,03	36,426	182
300	50	0,7	0,03	35,4987	160

Anexo 1 Evaluación del Algoritmo Genético.

## 16.2 Anexo 2 (Distribución propuesta por Confecciones Taller 84 en la Mesa 1)

TRABAJOS MESA 1			
Referencia	Talla	Cantidad	Material
Enterizos Michellin	42	12	Dril
Enterizos Michellin	40	10	Dril
Enterizos Michellin	38	16	Dril
Camisa- Manga corta Combinada MC Esso	M	120	Twil
Camisa- Manga corta Combinada MC Esso	L	80	Twil
Camisa- Manga corta Combinada MC Esso	XL	40	Twil
Camisa- manga corta combinada Mobil	M	100	Twil
Camisa- manga corta combinada Mobil	L	80	Twil
Camisa- manga corta combinada Mobil	XL	30	Twil
Chaqueta Rompevientos con capucha	XS	10	Vendaval
Chaqueta Rompevientos con capucha	S	70	Vendaval
Chaqueta Rompevientos con capucha	M	89	Vendaval
Chaqueta Rompevientos con capucha	L	79	Vendaval
Chaqueta Rompevientos con capucha	XL	20	Vendaval
Chaqueta Rompevientos con capucha	2XL	5	Vendaval
Chaqueta Rompevientos con capucha	3XL	3	Vendaval
Camisa y Pantalón Tellantas con bolsillo	34	30	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas con bolsillo	36	60	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas con bolsillo	38	60	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas con bolsillo	40	60	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas con bolsillo	42	30	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas con bolsillo	44	10	Dril

**Anexo 2:** Distribución propuesta, Confecciones Taller 84 – Mesa 1

**Fuente:** Creada por los autores

### 16.3 Anexo 3 (Distribución propuesta por Confecciones Taller 84 en la Mesa 2)

TRABAJOS MESA 2			
Referencia	Talla	Cantidad	Material
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	34	10	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	36	8	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	38	19	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	40	14	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	42	11	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	44	9	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	46	7	Dril
Camiseta Comb contratista MC - Mujer	S	11	Twil
Camiseta Comb contratista MC - Mujer	M	34	Twil
Camiseta Comb contratista MC - Mujer	L	20	Twil
Camiseta Comb contratista MC - Mujer	XL	6	Twil
Blusa 3/4 Rojo MI	S	20	Tela Lafayette
Blusa 3/4 Rojo MI	M	30	Tela Lafayette
Blusa 3/4 Rojo MI	L	15	Tela Lafayette
Camiseta Comb MC - Mujer	S	10	Twil
Camiseta Comb MC - Mujer	M	25	Twil
Camiseta Comb MC - Mujer	L	19	Twil
Camiseta Comb MC - Mujer	XL	11	Twil
Camiseta Com Mangalarga - Mujer	S	20	Twil
Camiseta Com Mangalarga - Mujer	M	50	Twil
Camiseta Com Mangalarga - Mujer	L	40	Twil
Camiseta Com Mangalarga - Mujer	XL	10	Twil

Anexo 3 Distribución propuesta, Confecciones Taller 84 – Mesa 2

Fuente: Creada por los Autores

### 16.4 Anexo 4 (Distribución metodología propuesta en la Mesa 1)

TRABAJOS MESA 1			
Referencia	Talla	Cantidad	Material
Camisa y Pantalón Tellantas con bolsillo	36	60	Dril
Chaqueta Rompevientos con capucha	2XL	5	Vendaval
Enterizos Michellin	38	16	Dril
Camiseta Comb contratista MC - Mujer	L	20	Twil
Camisa y Pantalón Tellantas con bolsillo	34	30	Dril
Chaqueta Rompevientos con capucha	S	70	Vendaval
Camisa y Pantalón Tellantas con bolsillo	38	60	Dril
Camisa- manga corta combinada Mobil	L	80	Twil
Camisa y Pantalón Tellantas con bolsillo	40	60	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	34	10	Dril
Chaqueta Rompevientos con capucha	XS	10	Vendaval
Camiseta Comb contratista MC - Mujer	XL	6	Twil
Camisa y Pantalón Tellantas con bolsillo	44	10	Dril
Chaqueta Rompevientos con capucha	XL	20	Vendaval
Camisa y Pantalón Tellantas con bolsillo	42	30	Dril
Enterizos Michellin	40	10	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	40	14	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	46	7	Dril
Chaqueta Rompevientos con capucha	L	79	Vendaval

Anexo 4 Distribución propuesta, por los Autores – Mesa 1

**Fuente:** Creada por los Autores.

### 16.5 Anexo 5 (Distribución metodología propuesta en la Mesa 2)

TRABAJOS MESA 2			
Referencia	Talla	Cantidad	Material
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	44	9	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	38	19	Dril
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	36	8	Dril
Camisa- Manga corta Combinada MC Esso	L	80	Twil
Camisa- Manga corta Combinada MC Esso	XL	40	Twil
Camiseta Comb MC – Mujer	L	19	Twil
Chaqueta Rompevientos con capucha	M	89	Vendaval
Camisa- Manga corta Combinada MC Esso	M	120	Twil
Blusa 3/4 Rojo MI	M	30	Tela Lafayette
Camiseta Com Mangalarga - Mujer	S	20	Twil
Camisa- manga corta combinada Mobil	XL	30	Twil
Camiseta Comb MC - Mujer	M	25	Twil
Blusa 3/4 Rojo MI	S	20	Tela Lafayette
Chaqueta Rompevientos con capucha	3XL	3	Vendaval
Enterizos Michellin	42	12	Dril
Camiseta Comb contratista MC - Mujer	S	11	Twil
Camiseta Comb MC - Mujer	S	10	Twil
Camiseta Com Mangalarga – Mujer	L	40	Twil
Camiseta Comb MC – Mujer	XL	11	Twil
Camiseta Com Mangalarga – Mujer	M	50	Twil
Camisa y Pantalón Tellantas - Sin bolsillo	42	11	Dril
Camisa- manga corta combinada Mobil	M	100	Twil
Camiseta Com Mangalarga – Mujer	XL	10	Twil
Blusa 3/4 Rojo MI	L	15	Tela Lafayette
Camiseta Comb contratista MC - Mujer	M	34	Twil

Anexo 5 Distribución propuesta por los Autores – Mesa 2

Fuente: Creada por los Autores

## 16.6 Anexo 6 (Ejemplo de la decodificación del cromosoma aplicado al algoritmo genético)

A continuación se presentará un ejemplo de cómo se va a evaluar el resultado obtenido por cada cromosoma creado en el algoritmo genético, el siguiente es una representación de 22 trabajos a realizar, con los siguientes parámetros los cuales dependen del entorno de trabajo y de los resultados esperados:

PARAMETROS	
Trabajos	22
Mesas	2
Largo mesa	12 m
Tiempo Objetivo	150 min

Cada uno de estos trabajos fueron analizados y caracterizados con los tiempos estándar (Extendido y Corte) de los trabajos más realizados por Confecciones Taller 84 multiplicados por los factores de ajuste o variables borrosas respectivas como lo son el tipo de material a utilizar y la dificultad del patrón de corte, los cuales son completamente conocidos antes de iniciar el proceso de extendido y corte (Tabla 15)

TIEMPO CORTE	VALORES FUZZY CORTE			FABRIC CH (FC)	MARKER PAT (MP)
12,96	12,400128	14,1264	15,660864	<i>Coarse</i>	<i>Average</i>
12,69	12,141792	13,8321	15,334596	<i>Coarse</i>	<i>Average</i>
12,09	11,567712	13,1781	14,609556	<i>Coarse</i>	<i>Average</i>
11,7	11,19456	12,753	14,13828	<i>Coarse</i>	<i>Average</i>
12,3	11,76864	13,407	14,86332	<i>Coarse</i>	<i>Average</i>
12,57	12,026976	13,7013	15,189588	<i>Coarse</i>	<i>Average</i>
13,08	12,514944	14,2572	15,805872	<i>Coarse</i>	<i>Average</i>
13,47	12,888096	14,6823	16,277148	<i>Coarse</i>	<i>Average</i>
13,86	13,261248	15,1074	16,748424	<i>Coarse</i>	<i>Average</i>
11,46	11,702952	13,4082	16,156308	<i>Coarse</i>	<i>Complicate</i>

Tabla 15 Valores borrosos del proceso de corte

1. El primer paso es la creación aleatoria del cromosoma de longitud igual a la cantidad de trabajos a programar (Tabla 16).

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22
13	9	3	19	1	7	22	15	18	8	20	17	4	21	10	11	6	14	12	5	16	2

Tabla 16 Representación del Cromosoma con los 22 trabajos

2. Luego sigue la distribución de trabajos en las dos mesas de acuerdo a la longitud total de las mesas y de cada uno de los trabajos, donde según las indicaciones en producción solo se puede colocar un trabajo encima de otro para conservar la calidad de la tela, restringiendo que el doble de la suma de los trabajos asignados debe ser menor a la longitud total de la mesa (Tabla 17).

Mesa 1 (cm)	242,7	263,1	232	94,8	251,2	244,2	102	261,6	92,4	255	97,1	89,3
Mesa 2 (cm)	220,3	99,6	218,6	226,4	235,9	253,2	233,4	228,8	268,9	240,3		

Tabla 17 Longitudes de los trabajos distribuidos en la Mesa 1 y Mesa 2

Mesa 1	13	9	3	19	1	7	22	15	18	8	20	17
Mesa 2	4	21	10	11	6	14	12	5	16	2		

Tabla 18 Distribución del cromosoma en la Mesa 1 y Mesa 2

3. Al tener las mesas definidas, el paso a seguir es sumar los tiempos borrosos de cada trabajo para determinar el *TFN* (*Triangular Fuzzy Number*) del tiempo total (Tabla 19) y así poder multiplicar los valores triangulares determinados, por los factores de ajuste de la habilidad de los operarios asignados a la respectiva mesa (Tabla 20) y obtener los resultados de la Tabla 21, para luego realizar el proceso de defuzzyfiación mediante el método del centroide de cada uno de los trabajos y encontrar los tiempos esperados de finalización para cada mesa (Tabla 22), el cual es desarrollado mediante la función `defuzz()` ubicada en la biblioteca `FuzzyToolkitUoN` de R studio.

Mesas	TFN's (min)
Mesa 1 Extendido	(78.93,84.41,88.94)
Mesa 1 Corte	(159.61,179.15,200.45)
Mesa 2 Extendido	(62.05,67.33,71.33)
Mesa 2 Corte	(126.46,143.89,166.43)

Tabla 19 Triangular Fuzzy Numbers( TFN's) de los tiempos totales de cada procesa en la Mesa 1 y Mesa 2

Mesas	Habilidad	Factores de Ajuste
Mesa 1 Extendido	Buena	(0.98,1.02,1.06)
Mesa 1 Corte	Pobre	(1.12,1.2,1.28)
Mesa 2 Extendido	Excelente	(0.88,0.94,1)
Mesa 2 Corte	Buena	(0.98,1.02,1.06)

Tabla 20 Factores de Ajuste del conjunto borroso de Habilidad del Operario.

Mesas	TFN's (min)
Mesa 1 Extendido	(77.352,86.098,94.28)
Mesa 1 Corte	(178.77,214.98,256.58)
Mesa 2 Extendido	(54.60,63.29,71.33)
Mesa 2 Corte	(123.93,146.77,176.42)

Tabla 21 Valores triangulares borrosos de los tiempos totales de cada proceso en cada mesa.

Mesas	Valores Desffuzificados (min)
Mesa 1 Extendido	85,6126
Mesa 1 Corte	217,4536
Mesa 2 Extendido	62,78488
Mesa 2 Corte	148,6786

Tabla 22 Valores desffuzificados por el método del centroide de los tiempos totales de cada proceso en cada mesa.

4. Con los tiempos totales esperados de cada proceso y sus respectivos TFN's , se prosigue a la incorporación de los mismos dentro de la función Fitness, la cual se divide en tres valores: Makespan, Consistencia y Rango, que buscan en conjunto minimizar el tiempo del makespan y además encontrar la homogeneidad en la distribución de los trabajos en las mesas.

a. Makespan:

Primero se determina el Makespan del proceso, el cual es el valor máximo entre todas las mesas, donde al observar la Tabla 22, se determina como el tiempo de finalización del proceso la Mesa 1 con 217,4536 min. Su objetivo es reducir el tiempo del Makespan.

T objetivo	150 min
T Makespan	217,4536
Wt	16

$$\text{Makespan} (\sigma) = \frac{150 \text{ min}}{217,4536 \text{ min}} * 16 = \underline{\underline{11,03683}}$$

## b. Consistencia

Para medir la consistencia se utiliza el valor del rango (Figura 9) de los TFN's finales de cada proceso en su respectiva mesa ( $var_k(\sigma, j)$ ) para buscar que la homogeneidad de los trabajos por mesa se cumpla.

Rangos ( $var_k(\sigma, j)$ )	Mesa 1	Mes 2
Extendido	16,93	16,72
Corte	77,80	52,48

$$\text{Consistencia}(\sigma) = \sum_{k=1}^2 \left( \sum_{j=1}^m \frac{var_k(\sigma, j)}{\max_{j=1, \dots, m}(var_k(\sigma, j))} \right) * W_{c,k}$$

$$\text{Consistencia}(\text{extendido}) = \frac{16,93}{16,93} + \frac{16,72}{16,93} = 1,9879$$

$$\text{Consistencia}(\text{corte}) = \frac{77,80}{77,80} + \frac{52,48}{77,80} = 1,6744$$

$$\text{Consistencia} = (1,9879 + 1,6744) * 4 = \underline{\underline{14,6498}}$$

## c. Rango

El ultimo valor asignado para la función fitness es el del rango, el cual busca minimizar el rango (Figura 9) de los tiempos finales de cada mesa , para lograr que el resultado sea más robusto y confiable, ya que, al disminuir este valor será menor la variación de los valores.

Rangos ( $var_k(\sigma, j)$ )	Mesa 1	Mes 2
Extendido	16,93	16,72
Corte	77,80	52,48

$$\text{Rango}(\sigma) = \sum_{k=1}^2 \left( \frac{\min (var_k(\sigma, j))}{\max_{j=1, \dots, m}(var_k(\sigma, j))} \right) * W_{,k}$$

$$\mathbf{Rango(extendido)} = \frac{16,72}{16,93} = 0,987$$

$$\mathbf{Rango(corte)} = \frac{52,48}{77,80} = 0,6744$$

$$\mathbf{Rango} = (0,987 + 0,6744) * 4 = \mathbf{6,649}$$

Para finalizar se suman los tres valores para encontrar el valor fitness del problema, y así buscar el máximo del mismo, ya que, al encrar un mayor valor se asegura que el tiempo makespan sea menor (Valor *makespan* de la función fitness).

$$\mathbf{Función\ Objetivo\ (\sigma) = Makespan\ (\sigma) + Concistencia\ (\sigma) + Rango(\sigma)}$$

$$\mathbf{Función\ Objetivo} = 11,03683 + 14,6498 + 6,649 = \mathbf{32,3365}$$

El valor final del cromosoma elegido es de 32,3365.

**Anexo 6** Ejemplo de la decodificación del cromosoma aplicado al algoritmo genético