

**PLATAFORMA SOFTWARE PARA LA OPTIMIZACIÓN DE MECANIZADO DE  
CAVIDADES UTILIZANDO EL ALGORITMO LUCIÉRNAGA  
“*FIREFLY ALGORITHM*”**

**EDWIN DARIO CÁCERES RAMÍREZ  
CARLOS ANDRÉS PADILLA CÁRDENAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

**PLATAFORMA SOFTWARE PARA LA OPTIMIZACIÓN DE MECANIZADO DE  
CAVIDADES UTILIZANDO EL ALGORITMO LUCIÉRNAGA  
“*FIREFLY ALGORITHM*”**

**EDWIN DARÍO CÁCERES RAMÍREZ  
CARLOS ANDRÉS PADILLA CÁRDENAS**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

## DEDICATORIA

*A mi madre Alix Ramírez y mi padre Victor Cáceres por su infinito amor, comprensión, paciencia y su gran entrega para que cumpla mis metas y sueños.*

*A mis hermanos Fredy y Edgar quienes han sido un ejemplo a seguir y un apoyo incondicional.*

*A mis nonitos, la familia Mayorga Ramírez y todos mis familiares por su acogida y colaboración directa o indirectamente durante mi carrera. ¡Muchas Gracias!*

*A todos mis amigos por compartir conmigo una sonrisa.*

*A la vida misma por permitirme desarrollar este proyecto y enseñarme que nada es perfecto, todo puede ser optimizado continuamente.*

***Edwin Darío Cáceres Ramírez***

## DEDICATORIA

*A Dios por darme fuerzas, Salud y prosperidad en estos años de vida y por los siguientes años en mi vida personal y profesional.*

*A mis padres por su apoyo incondicional y paciencia durante todos estos años de estudio en el colegio y en la universidad.*

*A todos mis compañeros de la universidad por su apoyo, amistad y tolerancia.*

*Carlos Andrés Padilla Cárdenas*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Mecánica por darnos el conocimiento y la formación necesaria para lograr nuestro título profesional.

Al Ingeniero Jabid Eduardo Quiroga Méndez director del proyecto de grado, por su colaboración y asesoría.

A todas aquellas personas que de alguna u otra forma han colaborado y participado positivamente en la culminación de este gran trabajo.

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>29</b>
<b>1. ALGORITMOS COMPUTACIONALES</b>	<b>31</b>
1.1 COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL	31
1.1.1 Clase P.	31
1.1.2 Clase NP.	31
1.1.3 Clase NP-Completo.	32
1.1.4 Clase NP-Duro.	32
1.2 DEFINICIÓN DE ALGORITMO	33
1.2.1 Tipos de algoritmos.	33
1.2.2 Algoritmos heurísticos.	35
1.2.2.1 Métodos Constructivos.	35
1.2.2.2 Métodos de Búsqueda Local.	35
1.2.2.3 Algoritmos Metaheurísticos.	37
1.2.3 Clasificación de algoritmos metaheurísticos.	37
1.2.3.1 Métodos de Trayectorias.	37
1.2.3.3 Computación Evolutiva.	38
1.2.4 Clasificación de los algoritmos de computación evolutiva.	38
1.2.4.1 Algoritmos Evolutivos.	38
1.2.4.2 Algoritmo basado en Inteligencia de Enjambres.	39
<b>2. TEORÍA GENERAL DEL FRESADO</b>	<b>41</b>
2.1 FRESADO	41
2.2 TIPOS DE FRESAS	41
2.3 TIPOS DE PROCESOS DE MECANIZADO POR FRESADO	42

2.4 MOVIMIENTOS REALIZADO EN EL MECANIZADO POR FRESADO	42
2.5 TIPOS DE OPERACIONES DE FRESADO	43
2.5.1 Fresado periférico.	43
2.5.2 Fresado Frontal.	44
2.5.3 Fresado de cavidades.	45
2.5.3.1 Cavidad	46
2.6 MÁQUINA FRESADORA	46
2.7 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL MECANIZADO CON MÁQUINA HERRAMIENTA	47
2.8 TEORÍA GENERAL DE TRAYECTORIAS DE MECANIZADO	48
2.8.1 Características que debe cumplir el proceso de generación de trayectorias	48
2.8.2 Principales problemas asociados al cálculo de trayectorias	50
2.9 TIEMPOS DE PRODUCCIÓN EN EL MECANIZADO	52
<b>3. ALGORITMO LUCIÉRNAGA APLICADAS A LA OPTIMIZACIÓN DE TRAYECTORIAS DE FRESADO EN CAVIDADES</b>	<b>54</b>
3.1 PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO	54
3.1.1 Modelo matemático del problema Agente Viajero (TSP).	56
3.2 ALGORITMO LUCIÉRNAGA (FIREFLY ALGORITHM)	57
3.2.1 Reglas del Algoritmo Luciérnaga.	57
3.2.2 Funcionamiento del Algoritmo Luciérnaga.	58
3.2.3 Intensidad de luz y atractivos.	58
3.2.4 Pseudocódigo Básico del Algoritmo Luciérnaga.	61
3.3 DISCRETIZACIÓN DEL ALGORITMO LUCIÉRNAGA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO	62
3.3.1 Proceso de Discretización.	62
3.3.1.1 Distancia entre luciérnagas.	63
3.3.1.2 Absorción de luz ( $\gamma$ ).	68
3.3.1.3 Atractivo ( $\beta$ ).	68

3.3.1.4 Número de Movimientos de las Luciérnagas.	71
3.3.1.5 Permutaciones.	73
3.3.1.6 Pseudocódigo discreto del algoritmo luciérnaga.	77
<b>4. PROCESAMIENTO DE IMAGEN</b>	<b>81</b>
4.1 REPRESENTACIÓN DE IMÁGENES EN MATLAB	81
4.2 TIPOS DE IMÁGENES EN MATLAB	82
4.3 LECTURA DE IMÁGENES DESDE MATLAB	83
4.4 MOSTRAR IMAGEN EN MATLAB	84
4.5 INVERTIR COLORES A UNA IMAGEN EN MATLAB	84
4.6 ETIQUETA DE ELEMENTOS CONECTADOS EN MATLAB	85
4.7 FUNCIONES ROICOLOR Y IMFILL EN IMÁGENES BINARIAS EN MATLAB	86
4.8 DILATACIÓN DE IMÁGENES EN MATLAB	88
4.9 PERÍMETRO DE UNA IMAGEN EN MATLAB	89
4.10 ACCESO A LOS VALORES DE LA IMAGEN EN MATLAB	91
4.11 SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS ASOCIADOS AL CÁLCULO DE TRAYECTORIAS	92
4.11.1 Precisión.	93
4.11.2 Geometría de la herramienta incorrecta.	94
4.11.3 Problemas de inconsistencia topológica en el objeto.	94
4.11.4 Compensado.	94
4.11.5 Planificación de la trayectoria.	94
4.12 PSEUDOCÓDIGO PARA EL PROCESAMIENTO DE IMAGEN EN MATLAB	95

<b>5. OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL ALGORITMO LUCIÉRNAGA</b>	<b>100</b>
5.1 AJUSTES DE LOS PARÁMETROS PARA LA OPCIÓN DE CAVIDAD SIMPLE	101
5.1.1 Parametrización del factor “número de luciérnagas”.	102
5.1.1.1 Análisis de Varianza para el Costo y Tiempo de simulación	103
5.1.1.2 Verificación de los supuestos del Análisis de Varianza.	108
5.1.2 Parametrización del Factor “Número de Movimientos”.	114
5.1.2.1 Análisis de Varianza para el Costo y Tiempo de simulación.	116
5.1.2.2 Verificación de los supuestos del Análisis de Varianza	119
5.2 AJUSTES DE LOS PARÁMETROS PARA LA OPCIÓN DE CAVIDAD COMPLEJA	123
5.2.1 Parametrización del factor “número de luciérnagas”.	124
5.2.1.1 Análisis de Varianza para el Costo y Tiempo de simulación.	126
5.2.1.2 Verificación de los supuestos del Análisis de Varianza	129
5.2.2 Parametrización del factor “número de movimientos”.	133
5.2.2.1 Análisis de Varianza para el Costo y Tiempo de simulación.	134
5.2.2.2 Verificación de los supuestos del Análisis de Varianza	138
5.3 RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL ALGORITMO LUCIÉRNAGA	142
<b>6. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE</b>	<b>145</b>
6.1 USO DEL SOFTWARE	148
6.1.1 Módulo de la presentación.	148
6.1.1.1 Botón de Ayuda.	148
6.1.1.2 Botón de Procesamiento de Imagen.	148
6.1.1.3 Botón de Algorithm Firefly.	148
6.1.1.4 Botón Salir.	148
6.1.2 Módulo de procesamiento de imagen.	149
6.1.2.1 Sección 1: Parámetros de entrada.	150
6.1.2.2 Sección 2: Procesamiento de imagen.	150
6.1.2.3 Sección 3: Puntos para el maquinado.	151
6.1.3 Módulo del Algorithm firefly.	151
6.1.3.1 Sección 1: Parámetros iniciales.	152
6.1.3.2 Sección 2: Firefly algorithm.	153

6.1.3.3 Sección 3: Información y resultados.	153
6.2 REQUERIMIENTOS COMPUTACIONALES	153
6.2.1 Software	153
6.2.2 Hardware.	154
<b>7. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>155</b>
7.1 LONGITUD Y GRÁFICAS DE TRAYECTORIAS DESCRITAS POR LOS SOFTWARE EDCA Firefly y MASTERCAM X5	155
7.1.1 Cavidad 1: Copo de nieve	155
7.1.1.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly.	156
7.1.1.2 Trayectorias generadas por MasterCam.	159
7.1.2 Cavidad 2: Pieza de 11 islas	162
7.1.2.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly.	163
7.1.2.2 Trayectorias generadas por MasterCam.	166
7.1.3 Cavidad 3: Puma	168
7.1.3.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly.	169
7.1.3.2 Trayectorias generadas por MasterCam.	172
7.1.4 Cavidad 4: Triángulo	174
7.1.4.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly.	175
7.1.4.2 Trayectorias generadas por MasterCam.	178
7.1.5 Cavidad 5: Flor de lis	180
7.1.5.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly.	181
7.1.5.2 Trayectorias generadas por MasterCam.	184
7.1.6 Cavidad 6: Estrella	186
7.1.6.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly.	187
7.1.6.2 Trayectorias generadas por MasterCam.	190
7.1.7 Cavidad 7: Círculo	192
7.1.7.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly	193
7.1.7.2 Trayectorias generadas por MasterCam.	196
7.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS	198
7.2.1 Análisis de la Cavidad 1: Copo de Nieve.	199
7.2.2 Análisis de la Cavidad 2: Pieza de 11 Islas.	200
7.2.3 Análisis de la Cavidad 3: Puma.	201
7.2.4 Análisis de la Cavidad 4: Triángulo.	202
7.2.5 Análisis de la Cavidad 5: Flor de Lis.	203

7.2.6 Análisis de la Cavity 6: Estrella.	204
7.2.7 Análisis de la Cavity 7: Círculo.	205
7.3 RENDIMIENTO DEL SOFTWARE EDCA Firefly SEGÚN LA GEOMETRÍA DE LA CAVIDAD	206
7.4 CONTRIBUCIONES DEL SOFTWARE EDCA Firefly A LOS TIEMPOS DE PRODUCCIÓN EN EL MECANIZADO	207
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>209</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>211</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>212</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>215</b>

## LISTA DE GRÁFICAS

	<b>pág.</b>
Gráfica 1. Diagrama de Euler para los conjuntos P, NP, NP-Completo y Duro	32
Gráfica 2. Clasificación general de los Algoritmos	34
Gráfica 3. Encasillamiento en un máximo local usando un algoritmo heurístico de búsqueda local	36
Gráfica 4. Clasificación de los algoritmos	40
Gráfica 5. Distintos tipos de fresa: a) esférica, b) cilíndrica, c) cónica, d) totica.	41
Gráfica 6. Movimientos básicos del fresado	43
Gráfica 7. Fresado periférico: a) Fresado de placa, b) Ranurado, c) Fresado Lateral y d) Fresado Paralelo simultaneo.	44
Gráfica 8. Fresado frontal: a) fresado frontal convencional, b) fresado frontal parcial, c) fresado terminal, d ) fresado de perfiles, e) fresado de cavidades y f ) fresado de contorno superficial.	45
Gráfica 9. Cavidades: a) Cavidad simple y b) Cavidad Compleja.	46
Gráfica 10. Factores que intervienen en el mecanizado con máquinas herramienta.	48
Gráfica 11. Error producido por la distancia excesiva entre putos.	50
Gráfica 12. Problema de precisión por la distancia excesiva entre pasadas	51
Gráfica 13. Mecanizado excesivo de material debido a la introducción de una fresa demasiado grande.	51
Gráfica 14. Problema de compensado con una herramienta esférica (1) y con una herramienta cilíndrica (2)	52
Gráfica 15. Representación gráfica del problema del agente viajero.	54
Gráfica 16. Tiempo de Computo determinado por el problema de agente viajero	56
Gráfica 17. Representación de la solución de una luciérnaga	62

Gráfica 18. Distancia por la diferencia de arcos	63
Gráfica 19. Distancia de intercambio entre la luciérnaga i y j	64
Gráfica 20. Distancia tipo A entre la luciérnaga i y j.	66
Gráfica 21. Representación del tiempo vs número de ciudades de las diferentes distancias	67
Gráfica 22. Comportamiento del Atractivo entre Luciérnagas	69
Gráfica 23. Comportamiento del Atractivo $\beta_0$	69
Gráfica 24. Comportamiento de la absortividad de luz ( $\gamma$ )	70
Gráfica 25. Distribución de N° Movimientos de la luciérnaga i y j	72
Gráfica 26 Piezas de prueba para las permutaciones	75
Gráfica 27. Comportamiento de los diferentes tipos de Permutaciones en el Algoritmo Luciérnaga.	77
Gráfica 28. Matriz representativa de una Imagen en Matlab	82
Gráfica 29. Imagen de una Cavidad	84
Gráfica 30. Inversión de colores de la Imagen	85
Gráfica 31. Elemento de Contorno cerrado de una Imagen	86
Gráfica 32. Aplicación de la función <code>imfill</code> a la gráfica 31.	87
Gráfica 33. Aplicación de la función <code>roicolor</code> e <code>imfill</code> a la gráfica 30	88
Gráfica 34. Dilatación de Imagen.	89
Gráfica 35. Perímetro de una Imagen	90
Gráfica 36. Ruta de los puntos de Acabado	90
Gráfica 37. Acceso al valor de una imagen en Matlab	91
Gráfica 38. Representación de los puntos de Desbaste.	92
Gráfica 39. Distancia entre puntos de la Rejilla de Mecanizado	93
Gráfica 40. Evolución del Procesamiento de Imagen en Matlab.	98
Gráfica 41. Identificación de Puntos de Maquinado.	99
Gráfica 42. Cavidad triangular para el ajuste de los parámetros de la cavidad simple	101
Gráfica 43. Gráfico de medias para la variable costo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Simple	106

Gráfica 44. Gráfico de medias para la variable Tiempo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Simple	107
Gráfica 45. Ejemplo de una gráfica donde se cumple el supuesto de independencia	112
Gráfica 46. Ejemplo de una gráfica donde no se cumple el supuesto de independencia	112
Gráfica 47. Verificación de la Independencia de los datos del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Simple	114
Gráfica 48. Gráfico de medias para la variable costo del factor “Número de Movimientos” cavidad Simple	118
Gráfica 49. Gráfico de medias para la variable Tiempo del factor “Número de Movimientos” cavidad Simple	118
Gráfica 50. Verificación de la Independencia de los datos del factor “Número de Movimientos” cavidad Simple	123
Gráfica 51. Cavidad circular con 11 islas para el ajuste de los parámetros de la cavidad compleja	124
Gráfica 52. Gráfico de medias para la variable costo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Compleja	128
Gráfica 53. Gráfico de medias para la variable tiempo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Compleja	128
Gráfica 54. Verificación de la Independencia de los datos del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Compleja	133
Gráfica 55. Gráfico de medias para la variable costo del factor “Número de Movimientos” cavidad Compleja	137
Gráfica 56. Gráfico de medias para la variable tiempo del factor “Número de Movimientos” cavidad Compleja	137
Gráfica 57. Verificación de la Independencia de los datos del factor “Número de Movimientos” Cavidad Compleja	142
Gráfica 58. Evolución de las Soluciones	143

Gráfica 59. Estructura de la plataforma software para la optimización de mecanizado de cavidades utilizando el algoritmo luciérnagas “firefly algorithm”	146
Gráfica 60. Flujo de información de las Secciones en cada Módulo	147
Gráfica 61. Módulo de presentación	149
Gráfica 62. Módulo procesamiento de imagen	150
Gráfica 63. Módulo Algorithm firefly	152
Gráfica 64. Geometría del Copo de Nieve	155
Gráfica 65. Puntos de Maquinado para el Copo de Nieve	157
Gráfica 66. Proceso de Desbaste para el Copo de Nieve.	158
Gráfica 67. Proceso de Acabado para el Copo de Nieve	158
Gráfica 68. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Copo de Nieve	159
Gráfica 69. Proceso de Desbaste para el Copo de Nieve	161
Gráfica 70. Proceso de Acabado para el Copo de Nieve	161
Gráfica 71. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Copo de Nieve	162
Gráfica 72. Geometría de la pieza de 11 Islas	162
Gráfica 73. Puntos de Maquinado para para la pieza de 11 Islas	164
Gráfica 74. Proceso de Desbaste para para la pieza de 11 Islas	164
Gráfica 75. Proceso de Acabado para para la pieza de 11 Islas	165
Gráfica 76. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para para la pieza de 11 Islas	165
Gráfica 77. Proceso de Desbaste para para la pieza de 11 Islas	167
Gráfica 78. Proceso de Acabado para para la pieza de 11 Islas	167
Gráfica 79. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para la pieza de 11 Islas	168
Gráfica 80. Geometría del Puma	168
Gráfica 81. Puntos de Maquinado para el Puma	170
Gráfica 82. Proceso de Acabado para el Puma	170
Gráfica 83. Proceso de Acabado para el Puma	171
Gráfica 84. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Puma	171
Gráfica 85. Proceso de Desbaste para el Puma	173

Gráfica 86. Proceso de Acabado para el Puma	173
Gráfica 87. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Puma	174
Gráfica 88. Geometría del Triángulo	174
Gráfica 89. Puntos de Maquinado para el Triángulo	176
Gráfica 90. Proceso de Desbaste para el Triángulo	176
Gráfica 91. Proceso de Acabado para el Triángulo	177
Gráfica 92. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Triángulo	177
Gráfica 93. Proceso de Desbaste para el Triángulo	179
Gráfica 94. Proceso de Acabado para el Triángulo	179
Gráfica 95. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste	180
Gráfica 96. Geometría de la Flor de lis	180
Gráfica 97. Puntos de Maquinado para la Flor de Lis	182
Gráfica 98. Proceso de Desbaste para la Flor de Lis	182
Gráfica 99. Proceso de Acabado para la Flor de Lis	183
Gráfica 100. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para la Flor de Lis	183
Gráfica 101. Proceso de Desbaste para la Flor de Lis	185
Gráfica 102. Proceso de Acabado para la Flor de Lis	185
Gráfica 103. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para la Flor de Lis	186
Gráfica 104. Geometría de la Estrella	186
Gráfica 105. Puntos de Maquinado para la Estrella	188
Gráfica 106. Proceso de Desbaste para la Estrella	188
Gráfica 107. Proceso de Acabado para la Estrella	189
Gráfica 108. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para la Estrella	189
Gráfica 109. Proceso de Desbaste para la Estrella	191
Gráfica 110. Proceso de Acabado para la Estrella	191
Gráfica 111. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para la Estrella	192
Gráfica 112. Geometría del Círculo	192
Gráfica 113. Puntos de Maquinado para el Círculo	194
Gráfica 114. Proceso de Desbaste para el Círculo	194
Gráfica 115. Proceso de Acabado para el Círculo	195

Gráfica 116. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Círculo	195
Gráfica 117. Proceso de Desbaste para el Círculo	197
Gráfica 118. Proceso de Acabado para el Círculo	197
Gráfica 119. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Círculo	198
Gráfica 120. Longitud de Trayectoria para el copo de Nieve	199
Gráfica 121. Longitud de Trayectoria para la Pieza de 11 Islas	200
Gráfica 122. Longitud de Trayectoria para la Puma	201
Gráfica 123. Longitud de Trayectoria para el Triángulo	202
Gráfica 124. Longitud de Trayectoria para la Flor de Lis	203
Gráfica 125. Longitud de Trayectoria para la Estrella	204
Gráfica 126. Longitud de Trayectoria para la Círculo	205
Gráfica 127. Rendimiento de EDCA Firefly según la geometría de la Cavidad	206

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Tiempo de Computo determinado por el problema de agente viajero	55
Tabla 2. Distancias de la ruta de Mecanizado hallada mediante el Algoritmo Luciérnaga utilizando diferentes tipos de Permutaciones	76
Tabla 3. Resultados del diseño experimental de para el factor “Número de Luciérnagas” cavidad simple	102
Tabla 4. Análisis de varianza para el costo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad simple	103
Tabla 5. Análisis de varianza para el tiempo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad simple	104
Tabla 6. Aplicación de la prueba LSD al factor “Número de Luciérnagas” cavidad simple	105
Tabla 7. Verificación de la Normalidad de los datos del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Simple	109
Tabla 8. Verificación de la Homocedasticidad de los datos del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Simple	111
Tabla 9. Datos para la gráfica de Independencia del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Simple	113
Tabla 10. Resultados del diseño experimental de para el factor “Número de Movimientos” cavidad simple	115
Tabla 11. Análisis de varianza para el costo del factor “Número de Movimientos” cavidad simple	116
Tabla 12. Análisis de varianza para el tiempo del factor “Número de Movimientos” cavidad simple	116

Tabla 13. Aplicación de la prueba LSD al factor “Número de Movimientos” cavidad simple	117
Tabla 14. Verificación de la Normalidad de los datos del factor “Número de Movimientos” cavidad Simple	120
Tabla 15. Verificación de la Homocedasticidad de los datos del factor “Número de Movimientos” cavidad Simple	121
Tabla 16. Datos para la gráfica de Independencia del factor “Número de Movimientos” cavidad Simple	122
Tabla 17. Resultados del diseño experimental de para el factor “Número de Luciérnagas” cavidad compleja	125
Tabla 18. Análisis de varianza para el costo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad compleja	126
Tabla 19. Análisis de varianza para el tiempo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad compleja	126
Tabla 20. Aplicación de la prueba LSD al factor “Número de Luciérnagas” cavidad compleja	127
Tabla 21. Verificación de la Normalidad de los datos del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Compleja	130
Tabla 22. Verificación de la Homocedasticidad de los datos del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Compleja	131
Tabla 23. Datos para la gráfica de Independencia del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Compleja	132
Tabla 24. Resultados del diseño experimental de para el factor “Número de Movimientos” cavidad compleja	134
Tabla 25. Análisis de varianza para el costo del factor “Número de Movimientos” cavidad compleja	135
Tabla 26. Análisis de varianza para el tiempo del factor “Número de Movimientos” cavidad compleja	135
Tabla 27. Aplicación de la prueba LSD al factor “Número de Movimientos” cavidad Compleja	136

Tabla 28. Verificación de la Normalidad de los datos del factor “Número de Movimientos” cavidad Compleja	139
Tabla 29. Verificación de la Homocedasticidad de los datos del factor “Número de Movimientos” cavidad Compleja	140
Tabla 30. Datos para la gráfica de Independencia del factor “Número de Movimientos” cavidad Compleja	141
Tabla 31. Parámetros del Algoritmo Luciérnaga	142
Tabla 32. Resultados parámetros óptimos para la cavidad simple y compleja	143
Tabla 33. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para el Copo de Nieve	156
Tabla 34. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para el Copo de Nieve	160
Tabla 35. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para la pieza de 11 Islas	163
Tabla 36. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para la pieza de 11 Islas	166
Tabla 37. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para el Puma	169
Tabla 38. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para el Puma	172
Tabla 39. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para el Triángulo	175
Tabla 40. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para el Triángulo	178
Tabla 41. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para la Flor de Lis	181
Tabla 42. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para la Flor de Lis	184
Tabla 43. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para la Estrella	187
Tabla 44. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para la Estrella	190
Tabla 45. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para el círculo	193
Tabla 46. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para el Círculo	196

Tabla 47. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en el Copo de Nieve mediante el software EDCA Firefly	199
Tabla 48. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en la Pieza de 11 Islas mediante el software EDCA Firefly	200
Tabla 49. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en el Puma mediante el software EDCA Firefly	201
Tabla 50. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en el Triángulo mediante el software EDCA Firefly	202
Tabla 51. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en la Flor de Lis mediante el software EDCA Firefly	203
Tabla 52. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en la Estrella mediante el software EDCA Firefly	204
Tabla 53. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en la Círculo mediante el software EDCA Firefly	205

## LISTA DE ANEXOS

	<b>pág.</b>
Anexo A. Manual de mastercam	216
Anexo B. Manual de EDCA Firefly	224

## RESUMEN

### TÍTULO:

PLATAFORMA SOFTWARE PARA LA OPTIMIZACIÓN DE MECANIZADO DE CAVIDADES UTILIZANDO EL ALGORITMO LUCIÉRNAGA “*FIREFLY ALGORITHM*”\*

### AUTORES:

Edwin Darío Cáceres Ramírez  
Carlos Andrés Padilla Cárdenas\*\*

### PALABRAS CLAVES:

Fresado de Cavidades, Desbaste, Acabado, Optimización de ruta de Mecanizado, Procesamiento de Imagen, Firefly Algorithm, Problema del Agente Viajero (TSP), CAD/CAM

### DESCRIPCIÓN

El objetivo de este proyecto es implementar un software que permita encontrar rutas óptimas de mecanizado para la herramienta fresadora en los procesos de desbaste y acabado de cavidades mediante la utilización del Algoritmo Luciérnaga y los conceptos del problema del Agente Viajero (TSP).

En el desarrollo del presente proyecto se usó las herramientas y comandos con los cuales cuenta la plataforma de Matlab para el procesamiento y digitalización de Imágenes para determinar los puntos coordinados adecuados para el maquinado de las áreas de desbaste y acabado de una cavidad y por medio de la discretización del Firefly Algorithm propuesto por Xin-She Yang se encontró la trayectoria que debe recorrer la herramienta fresadora.

El resultado es un software de fácil manejo el cual permite detectar áreas que pueden ser maquinadas de cualquier cavidad formada arbitrariamente con numerosas islas (Zonas interiores al contorno que no deben mecanizarse) para luego obtener una longitud de trayectoria de mecanizado optima que permite minimizar el tiempo de corte y de vuelo de la herramienta fresadora.

El software desarrollado permite visualizar la representación gráfica de la trayectoria y la zona que la herramienta fresadora mecaniza la cavidad, además de presentar un informe final que contiene el diámetro de fresa que el usuario utilizó, las coordenadas ordenadas de los puntos que describen la ruta de mecanizado y la longitud de la trayectoria alcanzada en los procesos desbaste y acabado.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Jabid Eduardo Quiroga Méndez

## ABSTRACT

### TITLE:

PLATFORM SOFTWARE FOR OPTIMIZATION OF POCKETS MACHINING USING “FIREFLY ALGORITHM”

### AUTHORS:

Edwin Dario Cáceres Ramírez  
Carlos Andrés Padilla Cárdenas\*\*

### KEY WORDS:

Pocket Milling, Rough Cutting, Finish Cutting, Machining Route Optimization, Image Processing, Firefly Algorithm, Traveling Salesman Problem (TSP), CAD/CAM

### DESCRIPTION:

The objective of this project is to implement a software that allows finding optimal paths for machining milling tool in the process of roughing and finishing of cavities using Firefly Algorithm and concepts of the Traveling Salesman Problem (TSP).

This study was implemented in Matlab environment for processing and digitization of images. This software provides the coordinate points for machining areas roughing and finishing a cavity and Matlab also was used to implement the discretization of the Firefly Algorithm proposed by Xin-She Yang.

The result is an user-friendly software which allows detection areas that can be machined to any arbitrarily shaped cavity with numerous islands (interior zones of the contour that must not be machined) and then get an optimal path length minimizing machining time cutting and milling tool flight.

The developed software allows display the graphical representation of the path and the zone where the milling tool produce the cavity. Additionally, the software presents a final report containing the cutter diameter used, the point coordinates describing the route and the machining path length achieved in the roughing and finishing processes.

---

\* Thesis

\*\* Physical-Mechanical Engineer Faculty, Mechanical Engineer School, Eng. Jabid Eduardo Quiroga Méndez

## INTRODUCCIÓN

En las líneas manufactureras, la producción de partes maquinadas que se fabrican en forma masiva con cavidades de configuración compleja y múltiples operaciones de maquinado conllevan tiempo en la producción que debe ser minimizado para mejorar el desempeño de cualquier proceso de mecanizado y en consecuencia hacer más productiva, rentable y competitiva la industria metalmecánica, para tal fin es necesario la utilización de tecnología y el impulso actual de la informática en el desarrollo de sistemas asistidos por computador CAD/CAM en la generación automática de trayectorias de mecanizado que den lugar a cometer menos errores y reducir el tiempo de generación de piezas.

En la industria del mecanizado una de las principales funciones asignadas al Ingeniero Mecánico encargado de la producción en la línea manufacturera es la optimización de los tiempos de operación de las maquinas convencionales o de Control Numérico Computarizado (CNC) en la fabricación de cada pieza, ya que permite reducir costos debido a que el número de herramientas de corte utilizadas por pieza sería inferior si la trayectoria que utiliza para tal operación es la mínima, se podrían producir mayor cantidad de piezas en un lapso más corto, el producto se entregaria justo a tiempo atendiendo la demanda del consumidor y además ayudaría a disminuir el consumo energético de las maquinas utilizadas para el mecanizado.

Actualmente existen muchas plataformas de programación como Matlab que son fáciles de usar y que suministran una interfaz gráfica final amigable, la cual permite la implementación y desarrollo de algoritmos metaheurísticos que han demostrado ser más eficientes que el algoritmo determinísticos en la obtención de trayectorias para herramientas de mecanizado en tiempos razonables.

Este proyecto está centrado en resolver el problema del agente viajero (TSP) mediante la utilización de uno de los últimos algoritmos metaheurísticos bio-inspirados creado por Xin-She Yang llamado “Firefly Algorithm” con el propósito de bajar los tiempos de corte (Cutting time) y tiempos de vuelo (Travel time) de la herramienta fresadora en la medida que se generen trayectorias para los procesos de desbaste y acabado en lo posible continua y de una longitud mínima de recorrido y así contribuir con la mejora de los productos de la industria manufacturera e impulsar su desarrollo.

En el presente documento se describe la teoría general de los desafíos computacionales y los tipos de algoritmos metaheurísticos existentes planteando algunas diferencias y ventajas con respecto a los algoritmos determinísticos; se describió de manera general la teoría del proceso de fresado además de las características que deben cumplirse a la hora de generar trayectorias de mecanizado para la herramienta de corte y algunos problemas que se pueden producir y que son corregidos en el diseño e implementación del software, se plantea el problema del agente viajero (TSP) y la teoría del “Firefly algorithm” propuesta por Xin-She Yang, luego se explica de manera detallada el proceso que se realizó en la adaptación del algoritmo luciérnagas para encontrar rutas de mecanizado y también se explicara cómo se realizó el procesamiento de imagen para determinar los puntos de acabado y desbaste que son maquinables dentro de una cavidad, se presenta un estudio estadístico de los parámetros que se deben tener en cuenta en el software para obtener trayectorias deseadas mediante un análisis ANOVA y finalmente se muestran los resultados y mejoras del software frente a una plataforma comercial.

# 1. ALGORITMOS COMPUTACIONALES

## 1.1 COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL

Con complejidad computacional se refiere al estudio de la eficiencia de los algoritmos de acuerdo a los recursos software y hardware necesarios para la solución de problemas, la complejidad computacional es medida como la cantidad de tiempo polinómico o exponencial que el algoritmo debe emplear para obtener una respuesta; por lo general los problemas computacionales se clasifican de la siguiente manera.

**1.1.1 Clase P.** Los problemas computacionales clase P, son problemas tratables ya que se pueden resolver en un tiempo polinómico<sup>1</sup> y se obtienen soluciones mediante algoritmos determinísticos (algoritmos exactos). Problemas corrientes como ordenación y búsqueda son de Clase P.

**1.1.2 Clase NP.** Son los problemas para los cuales el factor importante es la decisión de búsqueda y optimización, para saber si existe una solución determinada en un problema o si existe una solución más eficiente que supere ya las conocidas, por lo tanto son problemas que se resuelven por algoritmos no determinísticos en tiempo polinomial.

Los algoritmos no determinísticos son modelos teóricos de computación con los que se obtiene una gran cantidad de posibles soluciones con los mismos parámetros iniciales. Para encontrar estas soluciones, la computadora debe seguir ciertos pasos o condiciones para encontrar una solución óptima al problema.

---

<sup>1</sup>Tiempo polinómico: Es el tiempo de ejecución de un algoritmo que se resuelve eficientemente en la práctica.

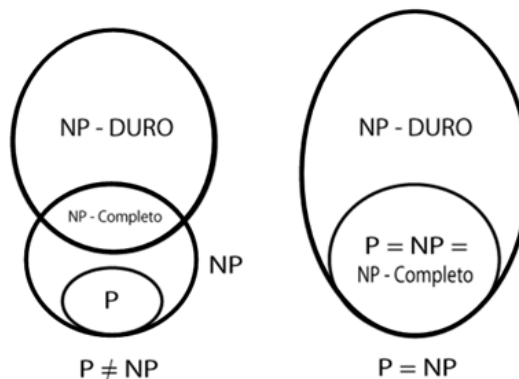
**1.1.3 Clase NP-Completo.** Son ciertos problemas de clase NP con mayor dificultad de solución y probablemente no haga parte de los problemas de clase **P**, es decir que no tiene solución en tiempo polinómico.

**1.1.4 Clase NP-Duro.** Son ciertos problemas de clase NP-Completo que se pueden resolver en tiempo polinómico si se transforma polinomialmente.

Los problemas de clase NP-completos son los problemas más difíciles que pertenece al conjunto de problemas NP, los problemas NP-Duro son al menos tan difíciles como los problemas de clase NP, aunque esto no significa que los problemas NP-Duro pertenezcas al conjunto de problemas de clase NP, porque en la actualidad no se ha demostrado que los problemas de clase NP son resolubles en tiempo polinómico y en forma determinística, haciéndolo uno de los grandes problemas no resueltos de la matemática.

En el gráfica 1, se muestra las dos clase de conjuntos ( $P=NP$  o  $P \neq NP$ .) de P, NP, NP-Completo y NP-Duro.

Gráfica 1. Diagrama de Euler para los conjuntos P, NP, NP-Completo y Duro



Fuente: MEDINA RODRÍGUEZ, Nataly. Optimización de trayectorias para máquinas de control numérico mediante colonia de hormigas. Tesis de Maestría en Ciencias en Sistemas Digitales. Tijuana, B.C.: Instituto politécnico nacional. Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital, 2011. p. 29.

## **1.2 DEFINICIÓN DE ALGORITMO**

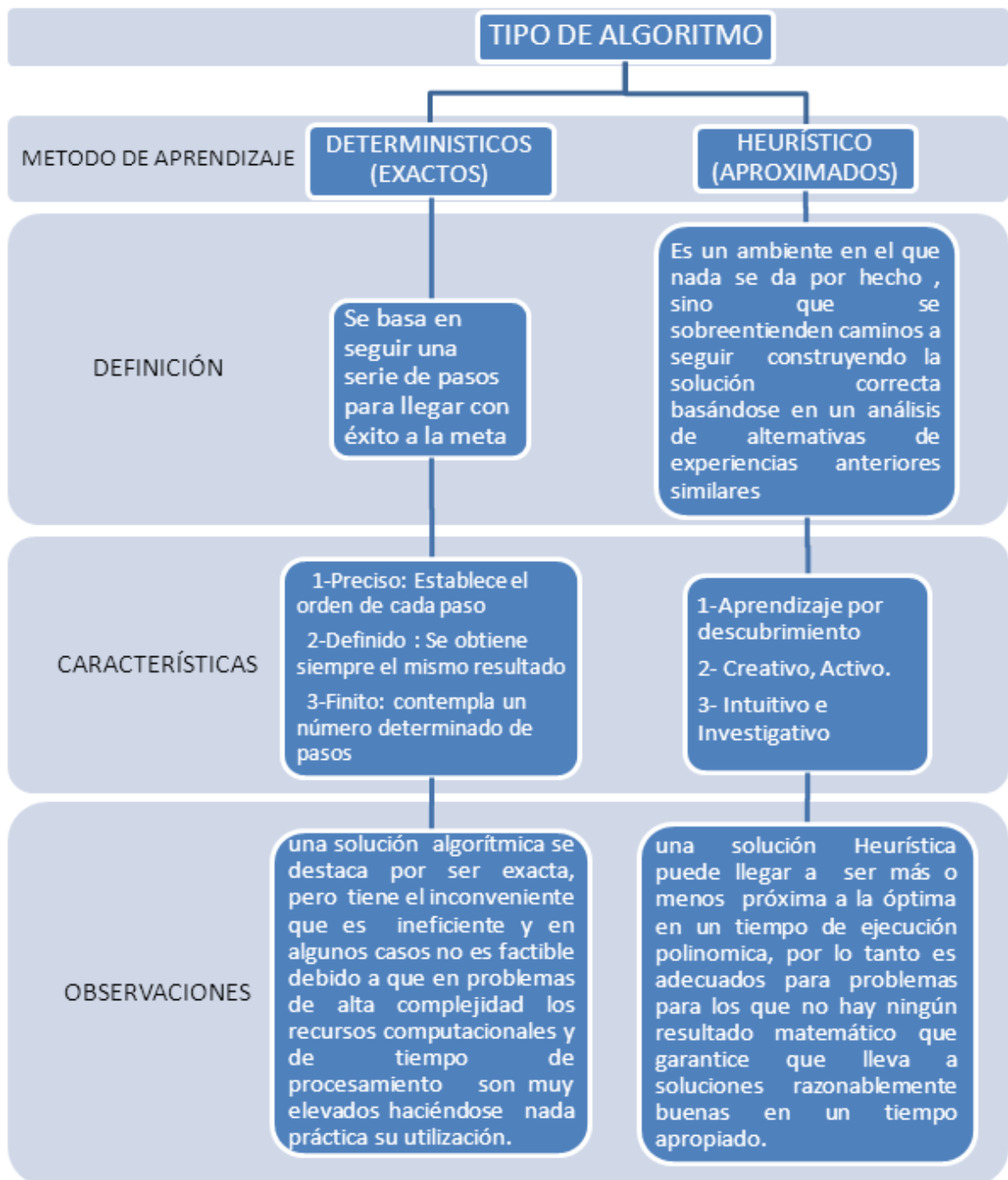
Los algoritmos son un conjunto de pasos o instrucciones definidas para resolver problemas o realizar un cierto tipo de tareas, efectuados en un determinado tiempo y con esfuerzos finitos.

**1.2.1 Tipos de algoritmos.** En la gráfica 2 se puede observar una clasificación global de los principales tipos de algoritmos que pueden existir, con su definición, características y observaciones básicas.

En conclusión se puede decir que los algoritmos exactos pueden resolver cierta cantidad de problemas (clase P), pero en la realidad, la mayoría de problemas de interés (clase NP), necesitan algoritmos no determinísticos y aunque exista un algoritmo determinístico que encuentra la solución exacta al problema tardaría tanto tiempo en encontrarla que lo hace completamente inaplicable.

Debido a este motivo, se utilizan algoritmos heurísticos que permitan obtener una solución de calidad en un tiempo razonable.

Gráfica 2. Clasificación general de los Algoritmos



Fuente: Autores

**1.2.2 Algoritmos heurísticos.** Existen interpretaciones posibles para el término heurística, la más lógica o intuitiva es la siguiente: “Procedimientos simples a menudo basados en el sentido común que se supone que obtendrán una buena solución (no necesariamente óptima) a problemas difíciles de un modo sencillo y rápido” de Zanakins y Evans<sup>2</sup>.

Clasificación de los algoritmos Heurísticos: Existen varios métodos heurísticos de diversa naturaleza, la clasificación más sencilla es la siguiente:

**1.2.2.1 Métodos Constructivos.** Son algoritmos que generan la solución a partir de un conjunto inicial vacío, seleccionando un elemento de un conjunto de soluciones factibles. El proceso se repite hasta que se encuentra una solución completa. El ejemplo más simple de este tipo de métodos es el siguiente:

La Heurística Greedy es un método que toma las decisiones en base a la información actual sin tener en cuenta las consecuencias de dichas decisiones en el futuro. Es un método fácil de implementar y muy eficiente computacionalmente hablando. Los algoritmos Greedy funcionan bastante bien si el problema se puede dividir en pequeños sub-problemas, y cuando dichos sub-problemas contienen una solución óptima<sup>3</sup>.

**1.2.2.2 Métodos de Búsqueda Local.** Se basa en la idea de que una solución dada puede ser mejorada realizando pequeños cambios. El procedimiento realizado en cada paso hace un cambio de la solución anterior a otra con mejor valor. Este método finaliza cuando no se pueda acceder a una mejor solución.

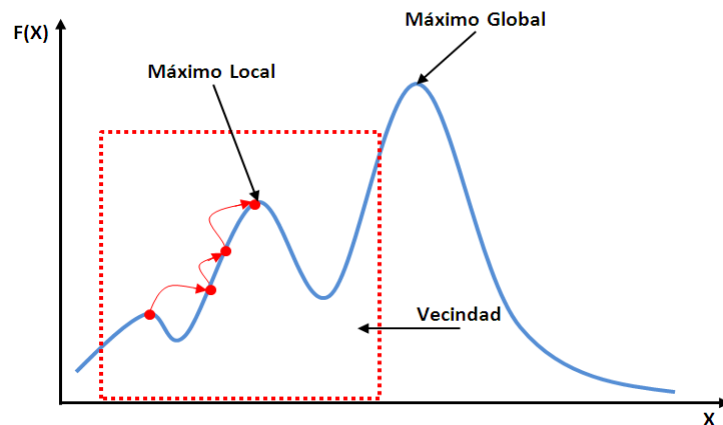
---

<sup>2</sup>ZANAKIS S. H. and EVANS. J. R. Heuristic Optimization: Why, When, and How to use It. In: Interfaces, October, 1981. vol 11, no. 5, p. 84-91.

<sup>3</sup> PLAZA LEIVA, Victoria. Implementación del algoritmo UEGO sobre el entorno Matlab como alternativa al toolbox de optimización. Trabajo Final de Máster de Informática y Automática Industrial. Almería: Universidad de Almería. Departamento de Arquitectura de Computadores y Electrónica, 2012, p. 3.

Sin embargo los métodos constructivos y de búsqueda local pueden fallar en la búsqueda del óptimo global al no realizar una búsqueda exhaustiva de todos los datos o la incapacidad para escapar de los óptimos locales. En la gráfica 3 se muestra como en una vecindad dada, el algoritmo heurístico basado en un método búsqueda local se quedaría atrapada en un máximo local. En general, ninguno de los dos métodos descritos en la sección anterior tendría por qué construir la solución óptima<sup>4</sup>.

Gráfica 3. Encasillamiento en un máximo local usando un algoritmo heurístico de búsqueda local



Fuente: VIDAL ESMORÍS, Aitana. Algoritmos heurísticos en optimización. Trabajo fin de máster en Técnicas Estadísticas. Santiago de Copostela: Universidad de Santiago de Compostela. Facultad de Matemáticas. 2013. p. 30.

Estas técnicas heurísticas no poseen ningún mecanismo que les permita escapar de los óptimos locales. Para solucionar este problema se introducen otras técnicas heurísticas más inteligentes que eviten en la medida de lo posible quedar atrapados en óptimos locales. Estos algoritmos de búsqueda más inteligentes, denominados metaheurísticas, son procedimientos de alto nivel que guían a algoritmos heurísticos conocidos evitando que éstos caigan en óptimos locales.

<sup>4</sup> VIDAL ESMORÍS, Aitana. Algoritmos heurísticos en optimización. Trabajo fin de máster en Técnicas Estadísticas. Santiago de Copostela: Universidad de Santiago de Compostela. Facultad de Matemáticas, 2013. p. 30.

**1.2.2.3 Algoritmos Metaheurísticos.** El término metaheurísticas o metaheurística fue acuñado por F. Glover en el año 1986. Con este término, pretendía definir un “procedimiento maestro de alto nivel que guía y modifica otras heurísticas para explorar soluciones más allá de la simple optimalidad local”<sup>5</sup>.

Las técnicas metaheurísticas combinan los métodos heurísticos de construcción para la exploración<sup>6</sup> de las regiones del problema y métodos de búsqueda local para la explotación<sup>7</sup> de estos.

Una buena metaheurística tiene que proporcionar un balance entre la explotación de la experiencia acumulada en la búsqueda y la exploración del espacio de búsqueda para identificar regiones con soluciones de alta calidad. El balance entre la explotación y la exploración es muy importante, por un lado para identificar rápidamente regiones del espacio de búsqueda con buenas soluciones y por otro lado, para no desaprovechar el tiempo en zonas que ya han sido exploradas o que no tienen soluciones buenas<sup>8</sup>, por tal razón los algoritmos metaheurísticos son la mejor opción.

**1.2.3 Clasificación de algoritmos metaheurísticos.** La principal diferencia entre los diferentes tipos de metaheurísticas está en el balance que exista entre la exploración y explotación en el algoritmo, a continuación se explican los algoritmos metaheurísticos mas importantes.

**1.2.3.1 Métodos de Trayectorias.** Estos algoritmos parten de una solución que se va actualizando a medida que se explora el vecindario, formando una

---

<sup>5</sup> RODRÍGUEZ ORTIZ, Carlos. Algoritmos heurísticos y metaheurísticos para el problema de localización de Regeneradores. Proyecto fin de carrera en Ingeniería Informática Superior. Madrid: Universidad Rey Juna Carlos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática, 2010. p. 26.

<sup>6</sup> Exploración: Cantidad de esfuerzo empleado en la búsqueda en regiones distantes del espacio.

<sup>7</sup> Explotación: Cantidad de esfuerzo empleado en la búsqueda de una región actual.

<sup>8</sup>C. Blum and A. Roli. Citado por PLAZA LEIVA, Op. cit., p. 4.

trayectoria. Entre algunos algoritmos que entran dentro de esta categoría se encuentran:

- Recocido Simulado (Simulated Annealing)
- Búsqueda de Tabú (Tabú Search)
- Búsqueda en Vecindades Variables (Variable Neighborhood Search)

**1.2.3.2 Métodos basados en Población.** Este tipo de algoritmos trabajan con un conjunto de soluciones en una sola iteración, entrando en ventaja respecto al método de trayectorias que necesitan un mayor número de iteraciones para encontrar una solución óptima.

Dentro de las estrategias utilizadas en los métodos basados en población se encuentra la computación evolutiva.

**1.2.3.3 Computación Evolutiva.** Contempla un conjunto de técnicas iterativas que son capaces de combinar buenas soluciones para obtener otras mejores, donde las soluciones van evolucionando (modificándose) mediante una serie de reglas que se especifican claramente según las características del algoritmo empleado.

**1.2.4 Clasificación de los algoritmos de computación evolutiva.** La computación evolutiva se divide en dos grandes ramas entre las cuales se encuentran:

**1.2.4.1 Algoritmos Evolutivos.** Corresponde a un grupo de técnicas estocásticas (no determinísticas) que utilizan el concepto de evolución biológica, estos algoritmos crean en cada generación un nuevo grupo de aproximaciones por el

proceso de selección de individuos de acuerdo a su nivel de desempeño<sup>9</sup>, entre los que se encuentran:

- Algoritmos Genéticos (Genetic Algorithms)
- Estrategias Evolutivas (Evolutionary Strategie)
- Programación Evolutiva (Evolutionary Programming)
- Programación Genética (Genetic Programming)

**1.2.4.2 Algoritmo basado en Inteligencia de Enjambres.** Corresponde a un grupo de técnicas basadas en el comportamiento colectivo en sistemas auto-organizados y distribuidos. Están conformados por una población de agentes computacionales capaces de percibir y modificar su ambiente de manera local mediante reglas simples que conllevan a un comportamiento global<sup>10</sup>, entre ellos está:

- Optimización por enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization).
- Optimización por colonias de hormigas (Ant Colony Optimization).
- Optimización por colonias de abejas (Bees optimization).
- Algoritmo de la luciérnaga (Firefly Algorithm).

Los algoritmos metaheurísticos sobre todo el método por computación evolutiva ha tenido gran auge en estos últimos años ya que se han encontrado soluciones de muy alta calidad a problemas que parecían ser inabordables, en la actualidad se sigue desarrollando y proponiendo nuevos modelos para encontrar algoritmos basados en inteligencia de enjambres entre los cuales se encuentra el Algoritmo Luciérnaga el cual ha tenido una investigación reciente, y será objeto de estudio en este proyecto para resolver un problema ingenieril como es la optimización de

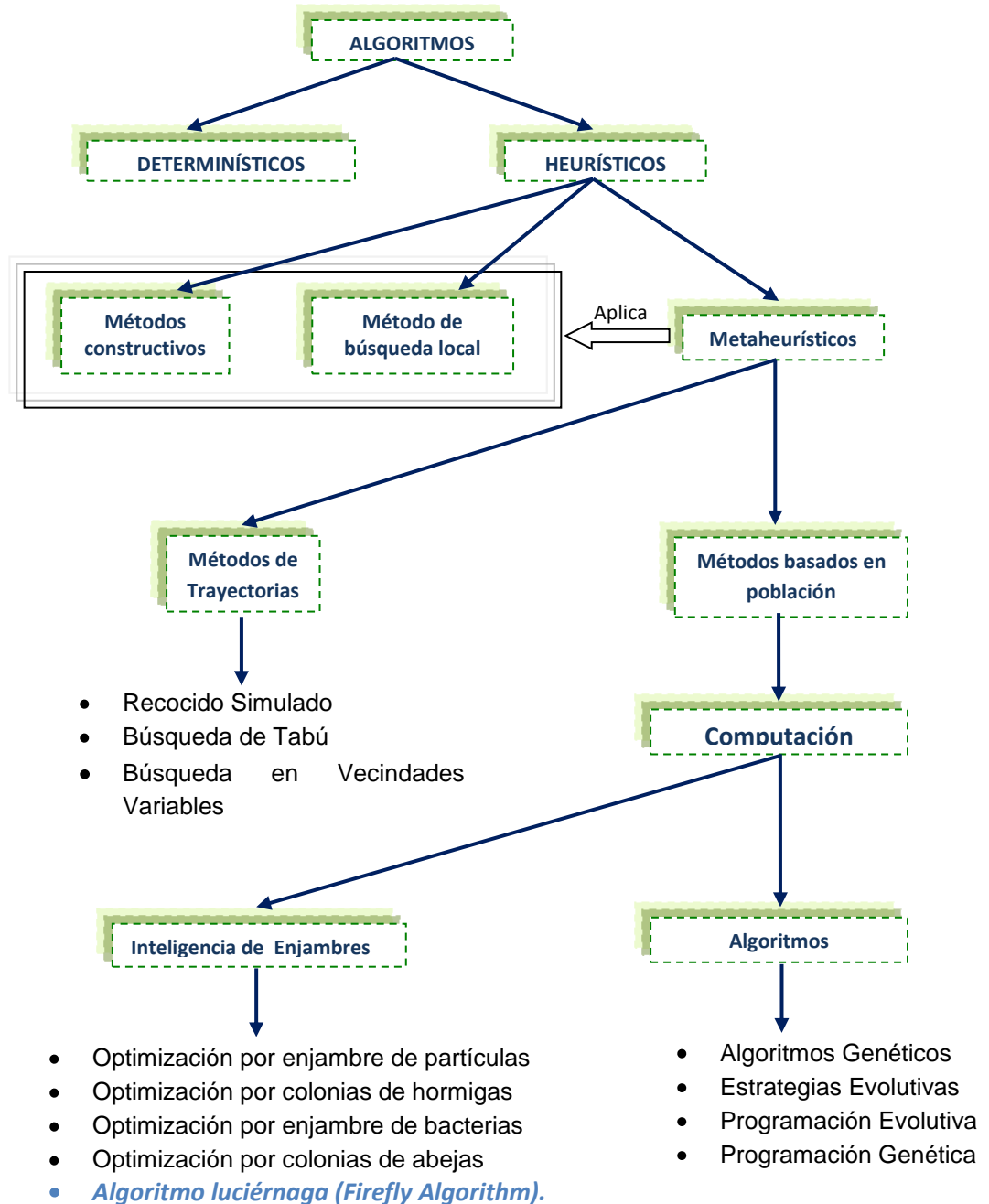
---

<sup>9</sup> MUÑOZ, Mario A.; LÓPEZ, Jesús A. y CAICEDO, Eduardo F. Inteligencia de enjambres: sociedades para la solución de problemas (una revisión). En: Revista ingeniería e investigación. Agosto, 2008. vol. 28, no. 2, p. 120.

<sup>10</sup> Ibíd., p. 120.

trayectorias de mecanizado. En la gráfica 4 se observa un organigrama que muestra un resumen de la clasificación de los algoritmos.

Gráfica 4. Clasificación de los algoritmos



Fuente: Autores

## 2. TEORÍA GENERAL DEL FRESADO

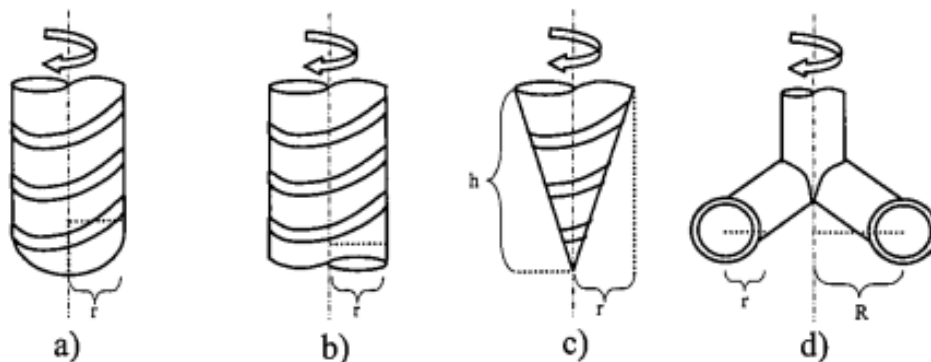
### 2.1 FRESADO<sup>11</sup>

El fresado consiste en un proceso de arranque progresivo de material mediante un tipo de herramienta llamada fresa que está provista de filos o aristas cortantes. Cuando el proceso de fresado está en marcha, la fresa avanza lentamente sobre la materia prima arrancando el material sobrante en su movimiento. Para conseguir eliminar este material la fresa debe girar a gran velocidad (valores típicos son 3.000 a 10.000 rpm dependiendo del tipo de material y masa de la fresa).

### 2.2 TIPOS DE FRESAS

Los tipos de geometría de herramienta que se pueden encontrar en la industria son muy variados: fresas cónicas, cilíndricas, esféricas, tóricas, etc., en la gráfica 5 se pueden ver algunas de ellas.

Gráfica 5. Distintos tipos de fresa: a) esférica, b) cilíndrica, c) cónica, d) tórica.



Fuente: JIMENO MORENILLA, Antonio Manuel. Modelo Topológico del proceso de fabricación: aplicado al compensado de herramienta. Tesis Doctoral. San Vicente del Raspeig: Universidad de Alicante. Departamentos de Tecnología Informática y de Computación, 2003. p. 46.

<sup>11</sup> JIMENO MORENILLA, Antonio Manuel. Modelo Topológico del proceso de fabricación: aplicado al compensado de herramienta. Tesis Doctoral. San Vicente del Raspeig: Universidad de Alicante. Departamentos de Tecnología Informática y de Computación, 2003. p. 46.

### 2.3 TIPOS DE PROCESOS DE MECANIZADO POR FRESADO<sup>12</sup>

La fabricación de una pieza se realiza alternando una serie de mecanizados con finalidades distintas:

- **De vaciado o desbastado:** Mecanizado rápido y de baja precisión encaminado a eliminar la mayor parte de material antes de acabar definitivamente la pieza.
- **Acabado:** Mecanizado lento de alta precisión que termina la mayor parte de la superficie final de la pieza
- **Refinado o perfilado:** Mecanizado lento, usualmente realizado con herramientas de geometría muy pequeña utilizando para marcar zonas convexas, perfiles, etc., que la herramienta de acabado no ha podido mecanizar.

### 2.4 MOVIMIENTOS REALIZADO EN EL MECANIZADO POR FRESADO<sup>13</sup>

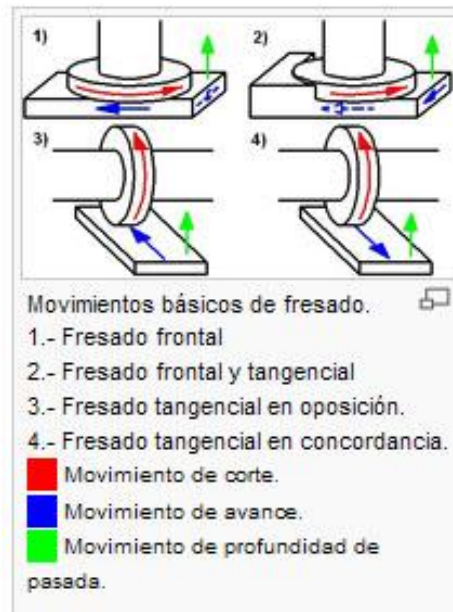
- Un Movimiento de corte que, sin movimiento de avance, sólo arranca viruta durante una revolución.
- Un movimiento de avance, que , combinado con el de corte, hace posible el arranque continuo de virutas.
- Un movimiento de penetración que determina la profundidad del corte, y por tanto , el espesor de la viruta que arranca.

---

<sup>12</sup> Ibíd., p. 54.

<sup>13</sup> SARABIA PÉREZ, Rubén. Modelo Morfológico Determinista: Aplicación para el diseño y la fabricación asistidos por ordenador. Tesis Doctoral. San Vicente del Raspeig: Universidad de Alicante. Departamentos de Tecnología Informática y de Computación, 2012. p. 55.

Gráfica 6. Movimientos básicos del fresado



Fuente: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Movimientos\\_b%C3%A1sicos\\_fresado.PNG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Movimientos_b%C3%A1sicos_fresado.PNG)

## 2.5 TIPOS DE OPERACIONES DE FRESADO<sup>14</sup>

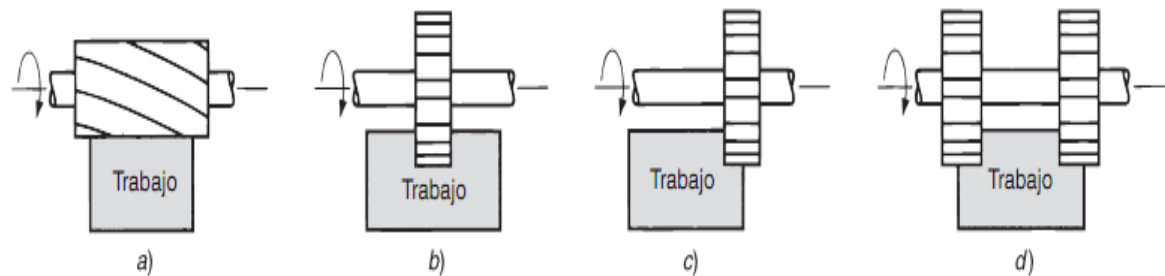
Existen dos tipos generales de operaciones de fresado que son, el fresado periférico y el fresado frontal.

**2.5.1 Fresado periférico.** También llamado fresado plano, el eje de la herramienta es paralelo a la superficie que se está maquinando y la operación se realiza por los bordes de corte en la periferia exterior del cortador. El fresado periférico se divide en varios tipos de fresado como se ilustra en la gráfica 7, los cuales son:

- Fresado de placa.
- Ranurado.
- Fresado Lateral.
- Fresado Paralelo simultaneo.

<sup>14</sup> GROOVER, MIKELL. P. Fundamentos de Manufactura Moderna. 3 ed. México: McGraw-Hill, 2007. p. 523.

Gráfica 7. Fresado periférico: a) Fresado de placa, b) Ranurado, c) Fresado Lateral y d) Fresado Paralelo simultaneo.

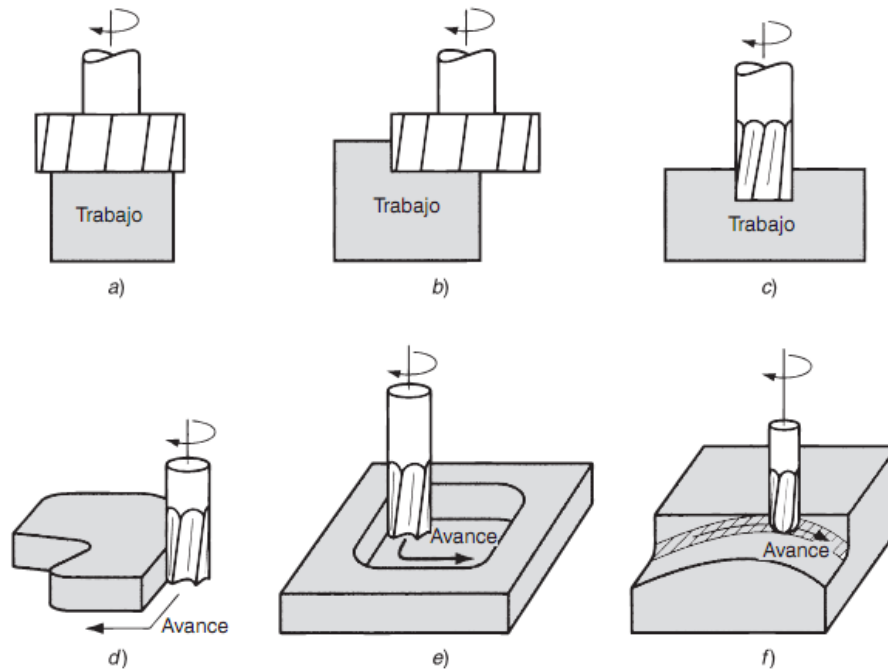


Fuente: GROOVER, MIKELL. P. Fundamentos de Manufactura Moderna. 3 ed. México: McGraw-Hill, 2007. p. 523.

**2.5.2 Fresado Frontal.** El eje de la fresa es perpendicular a la superficie de trabajo y el maquinado se ejecuta cortando las orillas, tanto en el extremo como fuera de la periferia de la fresa. De igual manera que en el fresado periférico, también en el fresado frontal existen diversas formas de fresado ilustrado en la gráfica 8 los cuales son:

- Fresado frontal convencional.
- Fresado frontal parcial.
- Fresado terminal.
- Fresado de perfiles.
- Fresado de cavidades.
- Fresado de contorno superficial.

Gráfica 8. Fresado frontal: a) fresado frontal convencional, b) fresado frontal parcial, c) fresado terminal, d) fresado de perfiles, e) fresado de cavidades y f) fresado de contorno superficial.



Fuente: Ibíd. p. 524.

De todos los tipos de fresado periférico o frontal, en este proyecto se va a centrar en el fresado de cavidades para la optimización de trayectorias para este tipo específico de fresado.

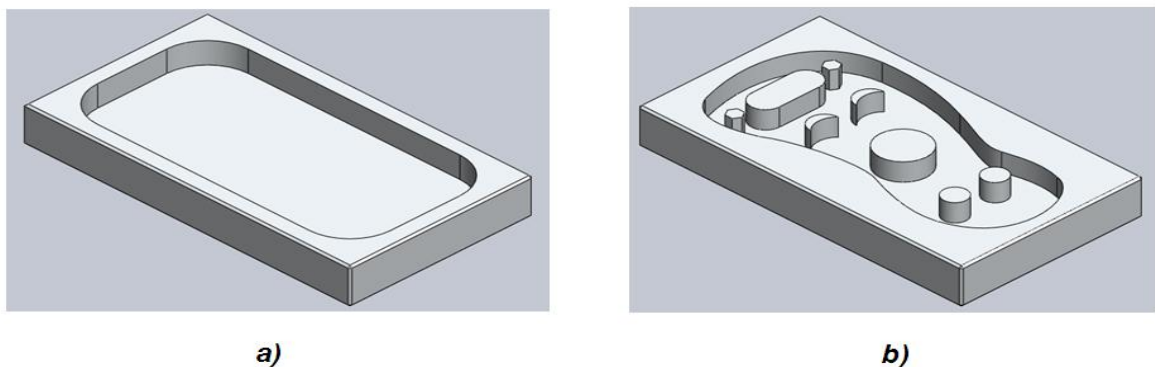
**2.5.3 Fresado de cavidades.** Es un tipo de fresado frontal en donde la fresa crea cavidades poco profundas en piezas planas.

En el fresado de cavidades el espesor de la viruta es constante y únicamente trabajan las extremidades de los dientes. La superficie mecanizada en el fresado de cavidades tiene mejor aspecto que en otros procedimientos de fresado, ya que en ella no queda traza alguna de la forma de la fresa, sino únicamente las rayas o surcos dejados por los dientes que son arcos de cicloides alargados.

**2.5.3.1 Cavidad<sup>15</sup>.** Una cavidad es un espacio físico en donde el material retirado por la fresa conformará la pieza. El maquinado de cavidades es una de las mayores operaciones de remoción de material en control numérico computarizado (CNC) principalmente con dados y moldes. La forma de la cavidad va desde geometrías simples hasta geometrías complejas.

En la gráfica 9 se muestra dos clases de cavidades, donde a) es una cavidad simple donde la forma de la geometría es fácil de representar y por lo tanto fácil de mecanizar, no tiene islas; b) es una cavidad compleja la cual tiene formas irregulares difíciles de mecanizar con varias islas en su interior.

Gráfica 9. Cavidades: a) Cavidad simple y b) Cavidad Compleja.



Fuente: Autores.

## 2.6 MÁQUINA FRESADORA<sup>16</sup>

La naturaleza estática y dinámica de la máquina que porta la herramienta cortante es fundamental a la hora de considerar un proceso de fabricación. Los tipos de eje, las características de los motores, la inercia de los elementos mecánicos,

---

<sup>15</sup> GALVIS PARRA, Edgar y GONZALEZ ALMEIDA, Fabio Leonel. Aplicación de Redes Neuronales para la Optimización de la Trayectoria de la Herramienta en el Fresado de Cavidades Complejas. Trabajo de Grado Ingeniería Mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial del Santander. Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2012. p. 43.

<sup>16</sup> JIMENO MORENILLA, Op. cit., p. 49.

constituyen un abanico de características que finalmente determinan la calidad del acabado de la pieza fabricada.

La máquina fresadora es muy versátil y puede realizar otros tipos de procesos de mecanizado típicos como el mandrinado, taladrados, etc. En la mayoría de fresadoras la herramienta cortante (la fresa), que gira a una gran velocidad, permanece fija mientras que el movimiento sobre los distintos ejes lo realiza el objeto. Sin embargo, también son numerosas las fresadoras donde los movimientos de traslación el brazo que porta la fresa.

Existen fresadoras de 2 a 5 ejes, la mayoría incorporan ejes de traslación longitudinal sobre los ejes cartesianos x, y, z. El resto de los ejes suelen estar asociados a movimientos de rotación sobre alguno de los ejes principales citados. La adición de los ejes otorga versatilidad pero dificulta la generación de la trayectoria de la fresa.

A las maquinas fresadoras se les ha dotado de características adicionales que aumentan su productividad y versatilidad. Alguno de estos elementos puede ser:

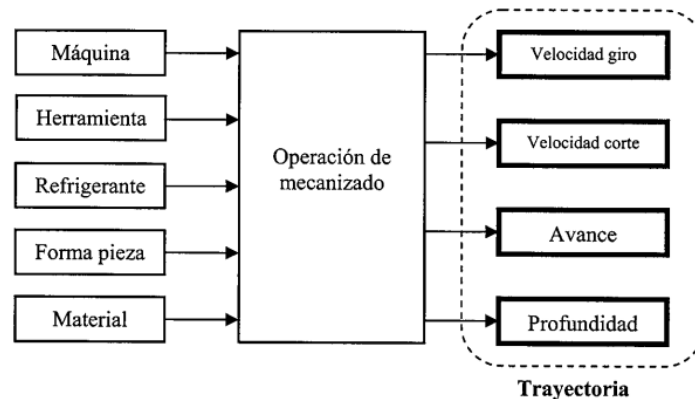
- Colocación automática de piezas para poder mecanizarlas.
- Cambiador automático de herramientas para conseguir distintos acabados.
- Mecanismos de sustitución e intercambio de piezas mientras continúa el mecanizado de otras piezas.

## **2.7 FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL MECANIZADO CON MÁQUINA HERRAMIENTA**

Se puede observar en la gráfica 10 de forma esquemática los factores que influyen en el mecanizado con máquina herramienta, los cuales establecen los parámetros

de corte que determinan finalmente una trayectoria de mecanizado de buena calidad y el tiempo de mecanizado.

Gráfica 10. Factores que intervienen en el mecanizado con máquinas herramienta.



Fuente: JIMENO MORENILLA, Op. cit., p. 50.

## 2.8 TEORÍA GENERAL DE TRAYECTORIAS DE MECANIZADO<sup>17</sup>

El objetivo de generación de trayectorias de mecanizado con asistencia de computador es el de cometer menos errores y reducir el tiempo de generación de piezas. Sin embargo, la generación de trayectorias de la herramientas a partir de un diseño geométrico no es una tarea fácil, no en vano uno de los problemas más importantes que deben resolver los sistemas CAD/CAM es la generación automática de trayectorias de mecanizado que den lugar a la fabricación de una pieza lo más parecida posible al modelo geométrico diseñado.

### 2.8.1 Características que debe cumplir el proceso de generación de trayectorias

- **Validez:** una vez se mecanice la pieza siguiendo las trayectorias de mecanizado calculadas, no deben existir diferencias con respecto al diseño

<sup>17</sup> SARABIA PÉREZ, Op. cit., p. 60.

original en cuanto a material sobrante o falta de material en algunas zona concreta.

- **Precisión:** La pieza fabricada deben ser piezas de alta precisión por lo que se deben reducir al mínimo errores en el cálculo de la trayectoria.
  
- **Eficiencia:** La generación automática de trayectoria en sistemas de fabricación asistido por computador debe asegurar dos niveles de eficiencia en el proceso de fabricación que mejoren la productividad del proceso:
  - ✓ **Eficiencia de cálculo de trayectoria.** El tiempo de generación de las trayectorias debe minimizarse en términos de tiempo de proceso y de espacio de almacenamiento.
  
  - ✓ **Eficiencia de fabricación.** El tiempo requerido para mecanizar todas las trayectorias de mecanizado es también un factor a minimizar.

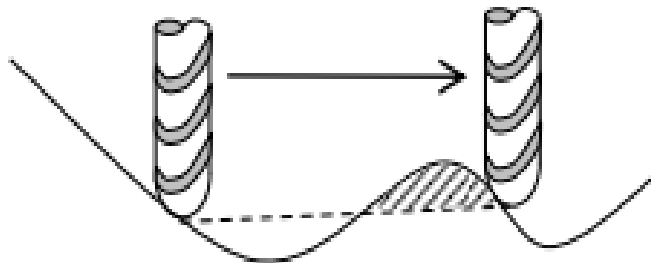
Algunos de los requerimientos que deben cumplirse a la hora de generar trayectorias eficientes son:

- No se debe mecanizar ninguna región que haya sido previamente mecanizada. Además del incremento del tiempo de mecanizado, se puede producir mermas en la calidad de la pieza final.
  
- Debe evitarse un excesivo número de retracciones de la herramienta, que pueden provocar marcas en el material y elevar el tiempo de proceso.
  
- **Versatilidad:** Un sistema de generación de trayectorias debe adaptar las estrategias de generación de trayectorias en función de las características de la pieza a mecanizar.

## 2.8.2 Principales problemas asociados al cálculo de trayectorias<sup>18</sup>

- **Problemas de precisión:** Pueden producirse problemas derivados del mecanizado por defecto o por exceso del objeto. Para solucionar estos problemas es necesario controlar los siguientes aspectos de mecanizado.
- **Distancia entre putos sucesivos:** Las máquinas de control numérico realizan una interpolación lineal entre posiciones sucesivas de la herramienta con lo que se pueden producir errores de mecanizado si entre dos puntos sucesivos de la trayectoria existen irregularidades en la superficie.

Gráfica 11. Error producido por la distancia excesiva entre putos.

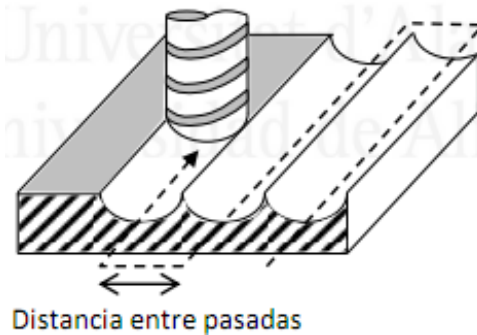


Fuente: SARABIA PEREZ, Rubén. Modelo Morfológico Determinista: Aplicación para el diseño y la fabricación asistidos por ordenador. Tesis Doctoral. San Vicente del Raspeig: Universidad de Alicante. Departamentos de Tecnología Informática y de Computación, 2012. p. 55.

- **Distancia entre pasadas:** Si la distancia entre pasadas sucesivas es excesiva (poca superposición de la fresa de mecanizado) en el mecanizado puede producir montones y valles, especialmente cuando se utilizan herramientas no cilíndricas o la geometría del objeto es muy compleja (ver figura 12). En cambio, si la distancia entre pasadas es demasiado pequeña (mucha superposición de la fresa de mecanizado), los mecanizados de la herramienta se solapan en exceso, hecho que retarda el tiempo de mecanizado total.

<sup>18</sup> SARABIA PÉREZ, Op. cit., p. 65.

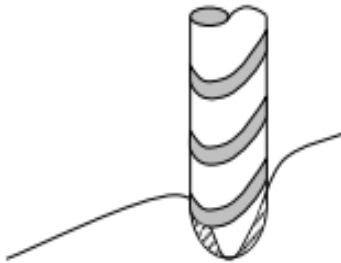
Gráfica 12. Problema de precisión por la distancia excesiva entre pasadas



Fuente: Ibíd. p. 66.

- **Geometría de la herramienta incorrecta:** si el radio de la herramienta es mayor que la inversa de la curvatura de la superficie pueden producirse mecanizados no deseados de material (ver figura 13).

Gráfica 13. Mecanizado excesivo de material debido a la introducción de una fresa demasiado grande.

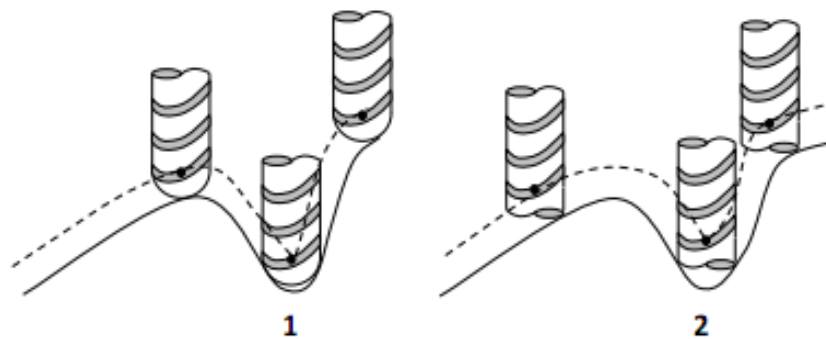


Fuente: Ibíd. p. 67.

- **Problemas de inconsistencia topológica en el objeto:** Pueden producirse errores cuando los objetos no tienen una topología consistente: objetos abiertos, auto intersecciones, superficies superpuesta, etc.

- **Problema del compensado:** En el proceso de mecanizado, la maquina CN dirige la trayectoria de la fresa controlando únicamente el centro de ésta. El problema de determinar para cada punto de la trayectoria donde debe encontrarse el centro de la herramienta para que esta sea normal a la superficie.

Gráfica 14. Problema de compensado con una herramienta esférica (1) y con una herramienta cilíndrica (2)



Fuente: Ibíd. p. 68.

- **Planificación de la trayectoria:** Consiste en la planificación del orden en el que se deben los puntos que conforman una trayectoria para que no se produzcan errores y para que el tiempo de mecanizado sea el menor posible.

## 2.9 TIEMPOS DE PRODUCCIÓN EN EL MECANIZADO

En la tesis de la Ing. Nataly Medina Rodríguez<sup>19</sup>, se cita que el tiempo de producción total para corte de una pieza utilizando máquinas CNC consiste en:

<sup>19</sup> Jaber E. Abu, Al-Momani, Mohamed y Yamamoto. Citado por MEDINA RODRÍGUEZ, Nataly. Optimización de trayectorias para máquinas de control numérico mediante colonia de hormigas. Tesis de Maestría en Ciencias en Sistemas Digitales. Tijuana, B.C.: Instituto politécnico nacional. Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital, 2011. p. 19.

- Tiempo de vuelo (Travel time). Consiste en el tiempo para mover el spindle de la CNC entre operaciones.
- Tiempo de conmutación (Switch time). Es el tiempo requerido para cambiar la herramienta de corte para la siguiente operación.
- Tiempo de corte (Cutting time). Es el tiempo en el que la herramienta de corte avanza con una cierta velocidad de corte en un material.

Esta investigación está centrada en disminuir cada uno de los tiempos que se intervienen en la producción de una línea manufacturera de cavidades en serie, en este caso específicamente los tiempos de vuelo (Travel time) y tiempo de corte (Cutting time), objetivo que se pretende lograr mediante la implementación del Algoritmo Luciérnagas y los conceptos del problema del Agente Viajero para optimizar las trayectorias de mecanizado de manera que el tiempo de corte sea el mínimo posible por cavidad y procurando que no haya tiempo de vuelo de la herramienta dentro de la ruta de mecanizado.

### 3. ALGORITMO LUCIÉRNAGA APLICADAS A LA OPTIMIZACIÓN DE TRAYECTORIAS DE FRESADO EN CAVIDADES

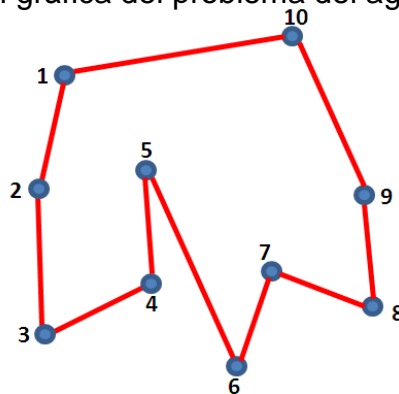
#### 3.1 PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO<sup>20</sup>

El problema del viajante de comercio o agente viajero, en inglés Traveling Salesman Problem (TSP), es uno de los problemas de optimización combinatoria NP-duros más ampliamente estudiado.

Su declaración es engañosamente simple: Un viajante busca el camino más corto para pasar por  $m$  ciudades. En otras palabras, una persona debe visitar un conjunto de  $m$  ciudades, comenzando en una ciudad determinada y finalizando en la misma ciudad; luego de haber visitado todas ellas sólo una vez. Esto significa que nunca regresa a una ciudad ya visitada, excepto la primera.

Este problema puede ser representado por un grafo<sup>21</sup>, cuyos nodos representan cada ciudad y los arcos la distancia entre un par de ellas; formando, de esta manera, un ciclo hamiltoniano<sup>22</sup>, como se observa en la gráfica 15.

Gráfica 15. Representación gráfica del problema del agente viajero.



Fuente: autores

<sup>20</sup> MINETTI, Gabriela F. Una Solución de Computación Evolutiva para el TSP, su posible aplicación en las organizaciones. Tesis de Magister en Automatización de Oficinas. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Informática. 2000. p. 4.

<sup>21</sup> Un grafo es un diagrama compuesto de nodos o puntos unidos por aristas o arcos.

<sup>22</sup> Es la visita de todos los vértices de un grafo una sola vez, en donde el último vértice visitado es adyacente al primero.

El objetivo es encontrar la secuencia de visitas óptima; la cual puede ser evaluada según distintos criterios, como por ejemplo: la minimización del costo o del tiempo, la maximización de la velocidad.

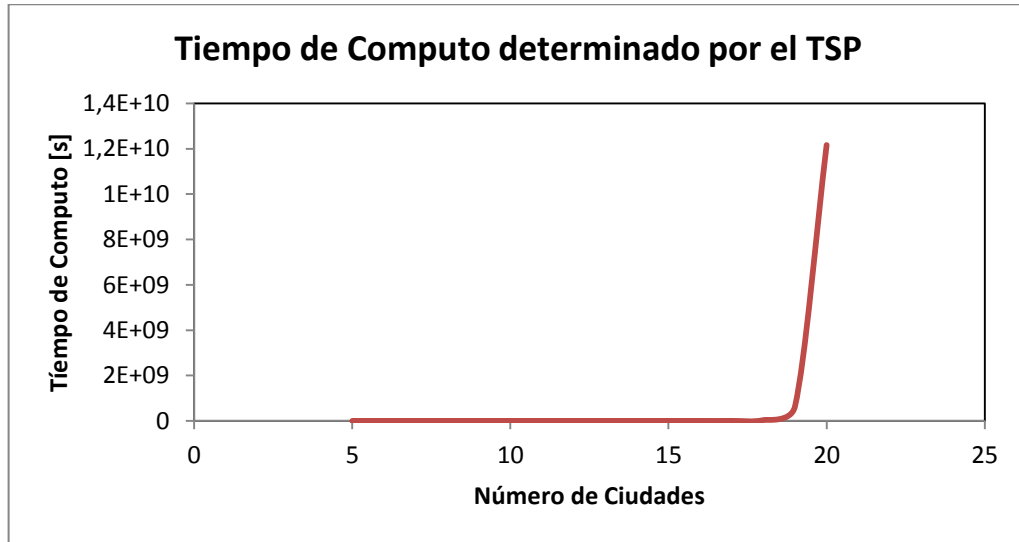
Como se sabe el problema TSP es de clase NP-Duro, ya que para visitar  $n$  ciudades solo una vez y costo de su trayectoria sea mínimo, existe  $(n-1)!$  posibles soluciones, y suponiendo que se tiene un computador capaz de encontrar  $10 \times 10^6$  soluciones por segundo, se tendrá como resultado el crecimiento del tiempo de proceso de un computador como se ilustra en la tabla 1 y gráfica 16, y por esta razón, este tipo de problemas se resuelve con algoritmos no determinísticos que dan una solución aproximada a la óptima en tiempos razonables de procesamiento computacional.

Tabla 1. Tiempo de Computo determinado por el problema de agente viajero

Número de Ciudades	Numero de Posibilidades	Tiempo de Computo
5	24	0,0000024 segundos
10	362880	0,036288 segundos
15	87178291200	2,42 horas
16	1,30767E+12	1,51 días
17	2,09228E+13	24,21 días
18	3,55687E+14	27,03 años
19	6,40237E+15	4,87 siglos
20	1,21645E+17	92,57 siglos

Fuente: autores

Gráfica 16. Tiempo de Computo determinado por el problema de agente viajero



Fuente: autores

**3.1.1 Modelo matemático del problema Agente Viajero (TSP).** En la representación matemática del TSP, la variable  $c_{ij}$  es la “distancia” (función objetivo) para ir de la ciudad  $i$  a la ciudad  $j$ .

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la ruta incluye la secuencia de ir desde } i \text{ a } j, \\ 0 & \text{en otro caso.} \end{cases}$$

para todo  $i$  y  $j$ .

El objetivo es minimizar,

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \quad \text{donde } c_{ii} = \infty \text{ para } i = 1, \dots, m$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad \text{para } i = 1, \dots, m \quad (3.1)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \quad \text{para } j = 1, \dots, m \quad (3.2)$$

$$x_{ij} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \text{ y } j \quad (3.3)$$

Las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) aseguran que cada  $x_{ij}$  sea cero o uno y no se formen sub-tours. La ecuación (3.1) garantiza un arribo a cada ciudad, mientras que la ecuación (3.2) requiere que un tour incluya una salida desde cada ciudad.

### **3.2 ALGORITMO LUCIÉRNAGA (FIREFLY ALGORITHM)<sup>23</sup>**

El Algoritmo Luciérnaga es uno de los últimos algoritmos Metaheurísticos Bio-inspirados propuesto en la literatura por Xin-She Yang de la Universidad de Cambridge, basado en el comportamiento poblacional de las Luciérnagas y su característica de luminiscencia para comunicarse entre ellas.

**3.2.1 Reglas del Algoritmo Luciérnaga.** El algoritmo luciérnaga está fundamentado en las siguientes reglas enunciadas por Xin-She Yang las cuales caracterizan el comportamiento grupal de las luciérnagas.

Reglas:

- Todas las luciérnagas son asexuales por lo que todas se ven atraídas por todas.
- La atracción es proporcional a su brillo y, dadas dos luciérnagas, la menos brillante se ve atraída por (se mueve hacia) la más brillante; sin embargo, el brillo puede disminuir a medida que la distancia aumenta. Si no existen luciérnagas más brillantes que una luciérnaga dada, esta se mueve aleatoriamente.
- El brillo de una luciérnaga es afectado o determinado por el paisaje de la función objetivo.

---

<sup>23</sup> YANG, Xin-She. Nature-inspired metaheuristic algorithms. 2 ed. Cambridge: Luniver Press, 2010. p. 82.

**3.2.2 Funcionamiento del Algoritmo Luciérnaga.** En el algoritmo de luciérnaga, tiene dos cuestiones importantes: la variación de intensidad de la luz y la formulación de los atractivos. Por simplicidad, se siempre puede asumir que el atractivo de una luciérnaga se determina por su brillo que a su vez está asociado con la función objetivo codificada.

Básicamente va comparando la luminosidad de las soluciones generadas tratando de acercar las soluciones que desprenden menos luz hacia las que desprenden un mayor brillo, es decir, acercar las soluciones de peor calidad a las soluciones de mejor calidad.

**3.2.3 Intensidad de luz y atractivos.** En el caso más simple para los problemas de optimización máxima, el brillo  $I$  de una luciérnaga en un lugar determinado  $x$  se puede elegir como  $I(x) \propto f(x)$ . Sin embargo, el atractivo  $\beta$  es relativo, debe ser visto desde los ojos del espectador o juzgado por las otras luciérnagas. Por lo tanto, la distancia  $r_{ij}$  varía entre la luciérnaga  $i$  y la luciérnaga  $j$ . Además, la intensidad de la luz disminuye con la distancia de la fuente y la luz también se absorbe en los medios de comunicación, por lo que debería permitir que el atractivo varié con el grado de absorción.

En la forma más simple, la intensidad de la luz  $I(r)$  varía de acuerdo a la ley del cuadrado inverso:

$$I(r) = \frac{I_s}{r^2} \quad (3.4)$$

Dónde  $I_s$  es la intensidad de la fuente. Para un medio dado con un coeficiente de absorción de luz  $\gamma$ , la intensidad de la luz varía con la distancia  $r$ , es decir:

$$I = I_0 e^{-\gamma r} \quad (3.5)$$

Donde  $I_0$  es la intensidad de la luz original. Con el fin de evitar la singularidad en  $r = 0$  en la expresión  $I_0/r^2$ , el efecto combinado tanto de la ley del cuadrado inverso y la absorción se puede aproximar de la siguiente forma gaussiana:

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3.6)$$

Como el atractivo de una luciérnaga es proporcional a la intensidad de la luz vista por luciérnagas adyacentes, ahora se puede definir el atractivo  $\beta$  de una luciérnaga como:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (3.7)$$

Donde  $\beta_0$  es el atractivo en  $r = 0$ . Como a menudo es más rápido calcular  $1/(1+r^2)$  que una función exponencial, la función anterior, si es convenientemente necesario, se puede aproximar como:

$$\beta = \frac{\beta_0}{1 + \gamma r^2} \quad (3.8)$$

Ambas ecuaciones (3.7) y (3.8) definen una distancia característica  $\Gamma = 1/\sqrt{\gamma}$  sobre las que el atractivo cambia significativamente de  $\beta_0$  a  $\beta_0 e^{-1}$  para la ecuación (3.7) o  $\beta_0/2$  para la ecuación (3.8).

En la aplicación real, la función atractivo  $\beta(r)$  puede ser cualquier función monótona decreciente tales como la siguiente forma generalizada:

$$\beta(r) = \beta_0 e^{-\gamma r^m}, \quad (m \geq 1) \quad (3.9)$$

Para una  $\gamma$  fija, la longitud característica se convierte:

$$\Gamma = \gamma^{-1/m} \rightarrow 1, \quad m \rightarrow \infty \quad (3.10)$$

Por el contrario, para una escala de longitud  $\Gamma$  dada en un problema de optimización, el parámetro  $\gamma$  puede ser utilizado como un valor inicial típico, es decir:

$$\gamma = \frac{1}{\Gamma^m} \quad (3.11)$$

La distancia entre dos luciérnagas  $i$  y  $j$  en  $\mathbf{x}_i$  y  $\mathbf{x}_j$ , respectivamente, es la distancia cartesiana:

$$r_{ij} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (3.12)$$

Donde  $x_{i,k}$  es la K-ésimo componente de la coordenada espacial  $\mathbf{x}_i$  de la i-ésima luciérnaga. En el caso 2-D, se tiene:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3.13)$$

El movimiento de una luciérnaga  $i$  que se siente atraída por otra más atractiva (brillante) luciérnaga  $j$ , está determinado por:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}_i + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i) + \alpha \boldsymbol{\epsilon}_i \quad (3.14)$$

Donde el segundo término es debido a la atracción. El tercer término es la aleatorización con  $\alpha$  siendo el parámetro de asignación al azar, y  $\boldsymbol{\epsilon}_i$  es un vector de números aleatorios extraídos de una distribución gaussiana o distribución uniforme. Por ejemplo, la forma más simple es  $\boldsymbol{\epsilon}_i$  puede ser sustituido por  $(rand - \frac{1}{2})$  donde  $rand$  es un generador de números aleatorios distribuidos uniformemente en  $[0, 1]$ . Para la mayoría de nuestra aplicación, se puede tomar  $\beta_0 = 1$  y  $\alpha \in [0, 1]$ .

Es de destacar que (3.14) es un paseo aleatorio sesgado hacia las luciérnagas brillantes. Si  $\beta_0 = 0$ , que se convierte en un paseo aleatorio simple. Además, el término aleatorización fácilmente puede extenderse a otras distribuciones como vuelos de Lévy.

El parámetro  $\gamma$  ahora caracteriza la variación de la capacidad de atracción, y su valor es de importancia crucial en la determinación de la velocidad de la convergencia y de cómo se comporta el algoritmo de luciérnaga. En teoría,  $\gamma \in [0, \infty)$ , pero en la práctica,  $\gamma = 1$  se determina por la longitud característica  $\Gamma$  del sistema para ser optimizado. Por lo tanto, para la mayoría de aplicaciones, que por lo general varía de 0,1 a 10.

**3.2.4 Pseudocódigo Básico del Algoritmo Luciérnaga.** A continuación se muestra el pseudocódigo básico del algoritmo luciérnaga propuesto por Xin-She Yang.

#### Firefly Algorithm

---

*Objective function  $f(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_d)^T$*   
*Generate initial population of fireflies  $\mathbf{x}_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )*  
*Light intensity  $I_i$  at  $\mathbf{x}_i$  is determined by  $f(\mathbf{x}_i)$*   
*Define light absorption coefficient  $\gamma$*   
**while** ( $t < \text{MaxGeneration}$ )  
**for**  $i = 1 : n$  all  $n$  fireflies  
    **for**  $j = 1 : n$  all  $n$  fireflies (inner loop)  
        **if** ( $I_i < I_j$ ), Move firefly  $i$  towards  $j$ ; **end if**  
        Vary attractiveness with distance  $r$  via  $\exp[-\gamma r]$   
        Evaluate new solutions and update light intensity  
    **end for**  $j$   
**end for**  $i$   
*Rank the fireflies and find the current global best  $\mathbf{g}_*$*   
**end while**  
*Postprocess results and visualization*

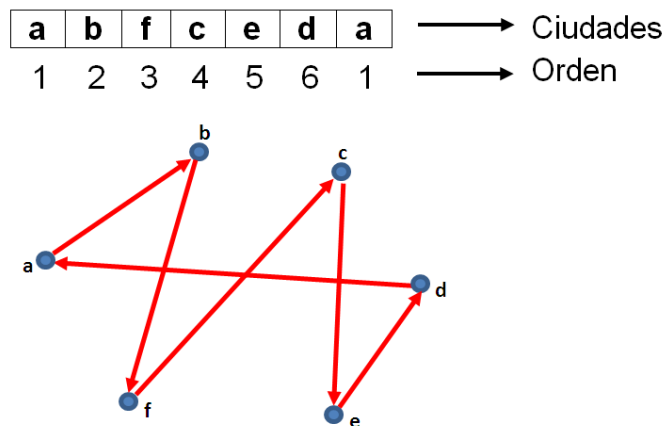
---

### 3.3 DISCRETIZACIÓN DEL ALGORITMO LUCIÉRNAGA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO

El algoritmo luciérnaga fue diseñado originalmente para resolver el problema de optimización continua; sin embargo, éste algoritmo se discretizó para resolver el problema TSP en el entorno matricial que caracteriza a Matlab. Esta investigación se estudian los conceptos básicos propuestos en el artículo “Evolutionary Discrete Firefly Algorithm for Travelling Salesman Problem”<sup>24</sup> referente a la distancia discreta entre dos luciérnagas y su forma de movimiento, realizándole algunas variaciones que permitan un mejor desempeño y velocidad de procesamiento del algoritmo, para un TSP máximo de 1200-1500 puntos o ciudades.

**3.3.1 Proceso de Discretización.** En la discretización del algoritmo, una luciérnaga representa una posible trayectoria o recorrido que da solución al problema TSP, la cual está conformada por un número de puntos o ciudades las cuales serán visitadas de acuerdo a un orden establecido por los movimientos de las luciérnagas como se observa en la gráfica 17.

Gráfica 17. Representación de la solución de una luciérnaga



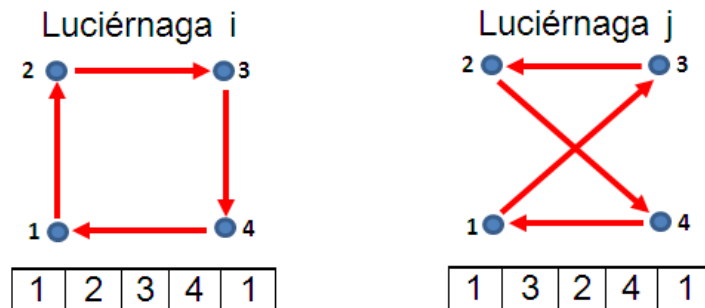
Fuente: autores

<sup>24</sup> ADAPTIVE AND INTELLIGENT SYSTEMS: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ICAIS 2011. (6-8, september, 2011: Klagenfurt, Austria). Evolutionary Discrete Firefly Algorithm for Travelling Salesman Problem. Bandung: Telkom Institute of Technology, 2011. p. 393-403.

**3.3.1.1 Distancia entre luciérnagas.** En el problema de optimización continua, la distancia entre dos luciérnagas se calcula simplemente utilizando la distancia euclidiana (Ecuación 10). Para el TSP la distancia entre dos luciérnagas  $i$  y  $j$  es la diferencia que hay en el orden de recorrido de las ciudades de la luciérnaga  $i$  con respecto a la  $j$ , ésta diferencia se puede calcular mediante los siguientes 4 opciones:

- **Diferencia de Arcos:** Se define como el número de diferentes arcos entre dos luciérnagas  $i$  y  $j$  como se observa en la gráfica 18, en donde el número total de diferencia de arcos es igual a dos.

Gráfica 18. Distancia por la diferencia de arcos



Diferencia de Arcos

1	2	<b>≠</b>	1	3	→	1
2	3	<b>=</b>	3	2	→	0
3	4	<b>≠</b>	2	4	→	1
4	1	<b>=</b>	4	1	→	0
Total						2

Fuente: autores

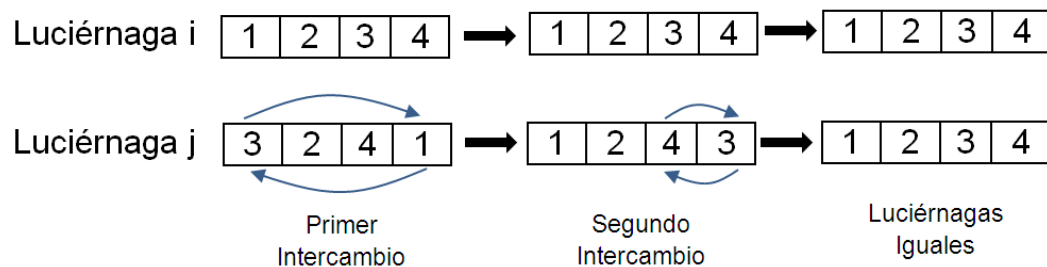
El resultado de esta función se parametriza a un intervalo [0- 10] para acotar el valor de  $r$ , donde  $r=0$  representa que los puntos o ciudades están siendo recorridos en el mismo orden por dos luciérnagas y  $r=10$  representa que los puntos están siendo recorridos en forma totalmente diferente por una luciérnaga con respecto a otra, quedando de esta forma:

$$r = \frac{A}{n} * 10 \quad (3.15)$$

Donde  $r$  es la distancia entre dos luciérnagas,  $A$  es el número total de diferentes arcos entre dos luciérnagas,  $n$  es el número de ciudades o puntos y  $10$  es la distancia máxima que puede existir entre dos luciérnagas.

- **Distancia de Intercambio o swap:** La distancia Swap es el número de intercambios mínimos requeridos en el orden de visita de las ciudades que conforman una luciérnaga con el fin de que pueda ser igual a la otra como se observa en la gráfica 19, el número de intercambio de la luciérnaga  $j$  para tener el mismo orden que la luciérnaga  $i$  es igual a dos.

Gráfica 19. Distancia de intercambio entre la luciérnaga  $i$  y  $j$



Fuente: autores

Su parametrización se realiza del mismo modo que en el caso de Diferencia de Arcos, ecuación (3.15).

- **Distancia Hamming:** Se define como el número de veces que las ciudades o puntos coordenados no se encuentran en la misma posición dentro de su orden, como se aprecia en los siguientes ejemplos:

Ejemplo1:

Luciérnaga i = [1, 2, 3, 4, 5]

Luciérnaga j = [5, 4, 3, 2, 1]

Distancia Hamming=4

Ejemplo2:

Luciérnaga i = [1, 2, 3, 4, 5]

Luciérnaga j = [1, 2, 3, 4, 5]

Distancia Hamming=0

Ejemplo3:

Luciérnaga i = [1, 2, 3, 4, 5]

Luciérnaga j = [1, 2, 5, 4, 3]

Distancia Hamming=2

Su parametrización se realiza del mismo modo que en el caso de Diferencia de Arcos, ecuación (3.15).

- **Distancia Tipo A:** Marc sevaux y Kenneth Sörensen<sup>25</sup> propone la medida de una distancia igual a la suma de todas las diferencias absolutas entre las posiciones de todos los elementos de la luciérnaga i y j como se representa en la siguiente ecuación.

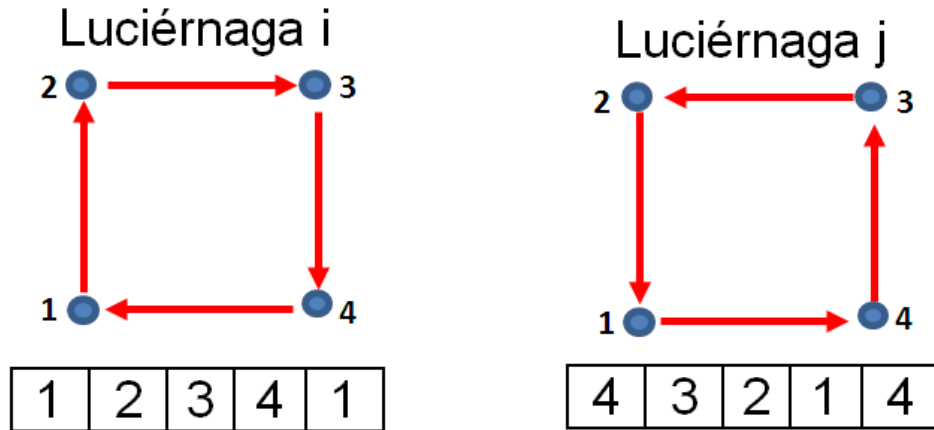
$$A_{i,j} = \sum_{k=1}^n |i(k) - j(k)| \quad (3.16)$$

Esta medida de distancia tiene la propiedad (no deseable) de ser dependiente del orden en que se visiten las ciudades de una luciérnaga con respecto a otra, es decir que la distancia máxima que puede haber entre luciérnagas se obtendría solo cuando una tiene el orden invertido respecto a la otra como se considera en la gráfica 20.

---

<sup>25</sup> MIC2005: THE SIXTH METAHEURISTICS INTERNATIONAL CONFERENCE. (22-26, august, 2005: Vienna, Austria). Permutation distance measures for memetic algorithms with population management.

Gráfica 20. Distancia tipo A entre la luciérnaga i y j.



Fuente: autores

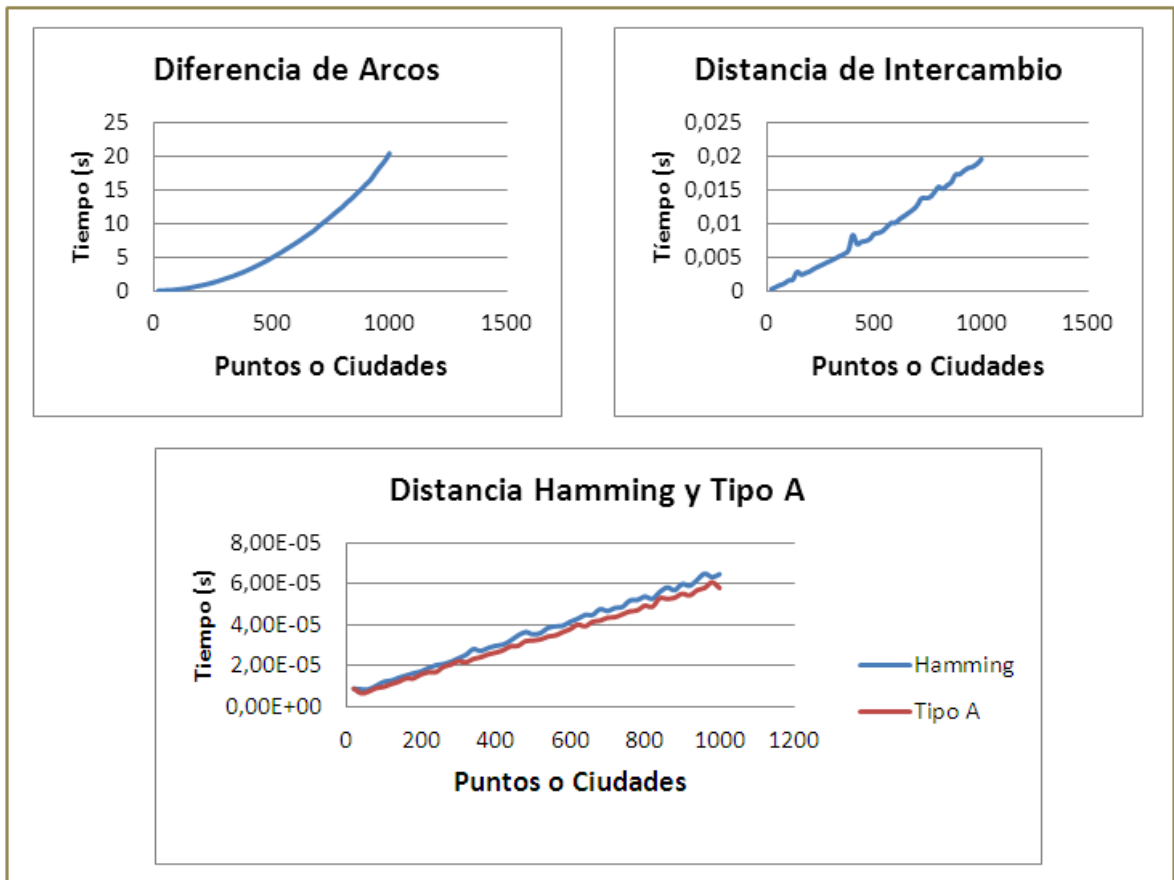
La distancia entre  $[1, 2, 3, 4, 1]$  y  $[4, 3, 2, 1, 4]$  de la gráfica 20 es igual a:  
 $|1-4|+|2-3|+|3-2|+|4-1|+|1-4|=11$ .

Su parametrización es de la siguiente forma: Cuando  $n$  es par, la parametrización es igual a  $(2/n^2)*A*10$ , cuando  $n$  es impar su parametrización es igual a  $(2/(n^2-1))*A*10$  donde  $n$  es el número de puntos o ciudades que conforman cada luciérnaga,  $A$  es el valor de la distancia Tipo A.

En el Artículo de Marc sevaux y Kenneth Sörensen se pueden encontrar otros métodos que resultarían útiles para el cálculo de la distancia para otros tipos de algoritmos poblacionales, en este proyecto no se aplicaron debido a que son de clase NP por lo tanto aumentaría el tiempo de procesamiento del algoritmo lo cual es indeseable, pero puede ser útiles para otros algoritmos.

Para la selección del método utilizado en el algoritmo luciérnaga, se realizó una gráfica donde se relacionan los puntos o ciudades que conforman una luciérnaga con el tiempo de procesamiento computacional de cada una de las distancias realizadas en la plataforma Matlab y se encontró el siguiente comportamiento.

Gráfica 21. Representación del tiempo vs número de ciudades de las diferentes distancias



Fuente: autores

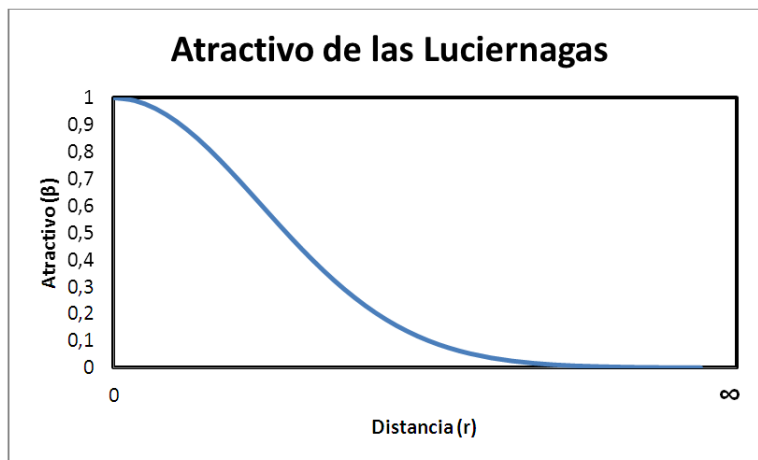
Como se puede observar en la gráficas 21, la diferencia de arcos tiene una simulación que crece potencialmente a medida que la cantidad de puntos aumenta, las distancias de intercambio, Hamming y tipo A crece linealmente. De las cuatro distancias, la que tiene mejor eficiencia con respecto al tiempo es la distancia tipo A, seguida de la distancia Hamming, ambas tienen tiempos muy similares, por tal razón cualquiera de las dos opciones mencionadas anteriormente serían apropiadas, pero se escogió la Distancia Hamming ya que este método da información variada entre las luciérnagas estudiadas mientras que la tipo A depende más del orden en que se encuentra las ciudades, como se explica en la gráfica 20.

**3.3.1.2 Absorción de luz ( $\gamma$ ).** En esencia, el coeficiente de absorción de la luz y caracteriza la variación del valor atractivo de la luciérnaga. Su valor es muy importante en la determinación de la velocidad de convergencia y en el comportamiento del Algoritmo Luciérnaga. Como se sabe,  $\gamma \in [0, \infty)$ , pero en este proyecto  $\gamma$  será determinada por la longitud característica  $\Gamma$  de la ecuación (3.11), para la cual se escogió un  $m=2$  para tener una tendencia en que el atractivo cambia significativamente de  $\beta_0$  a  $\beta_0 e^{-1}$ , en donde ésta tendencia servirá para la distribución del número de movimientos de las luciérnagas  $i$  y  $j$  como es explicada ...en la sección 3.3.1.4... llamada “Numero de Movimiento de las Luciérnagas”; la longitud característica  $\Gamma$  es igual a 10 por la parametrización hecha a la distancia  $r$  entre luciérnagas , por lo tanto la absorción de luz será:

$$\gamma = \frac{1}{\Gamma^2} = \frac{1}{10^2} = 0,01$$

**3.3.1.3 Atractivo ( $\beta$ ).** En el algoritmo luciérnaga original, la forma principal de la función atractivo  $\beta(r)$  descrita en la ecuación (3.7), la cual tiene un comportamiento con respecto al parámetro  $r$ , con  $\beta_0 = 1$  y un  $\gamma = 0.01$  como se muestra en la gráfica 22.

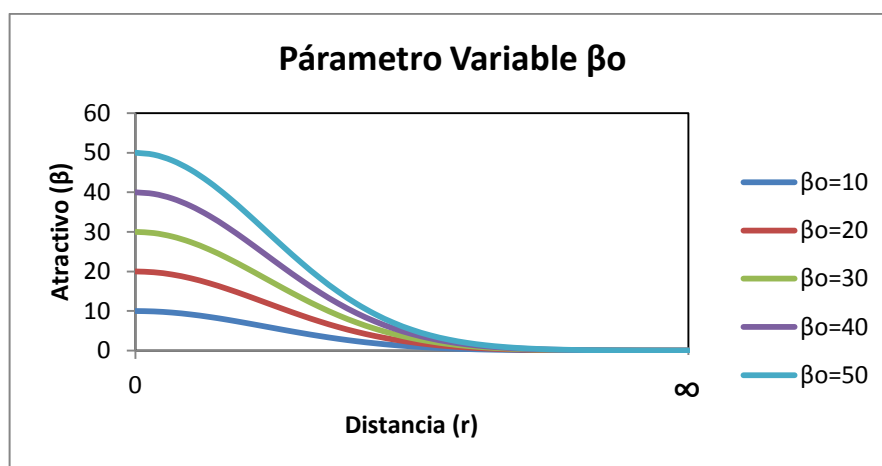
Gráfica 22. Comportamiento del Atractivo entre Luciérnagas



Fuente: autores

Para la discretización del algoritmo Luciérnagas, se definió  $\beta_0$  (atractivo en  $r=0$ ) como un parámetro variable en la implementación del algoritmo, ya que es un factor muy importante en la velocidad con la que las luciérnagas encuentran una solución óptima en el problema del TSP, debido a que la curva que genera la ecuación (3.7) determina que tan rápido una luciérnaga cambia su atractivo a medida que la distancia pasa de  $r=\infty$  a una distancia  $r=0$  debido a la pendiente que se genera, como se observa en la gráfica 23.

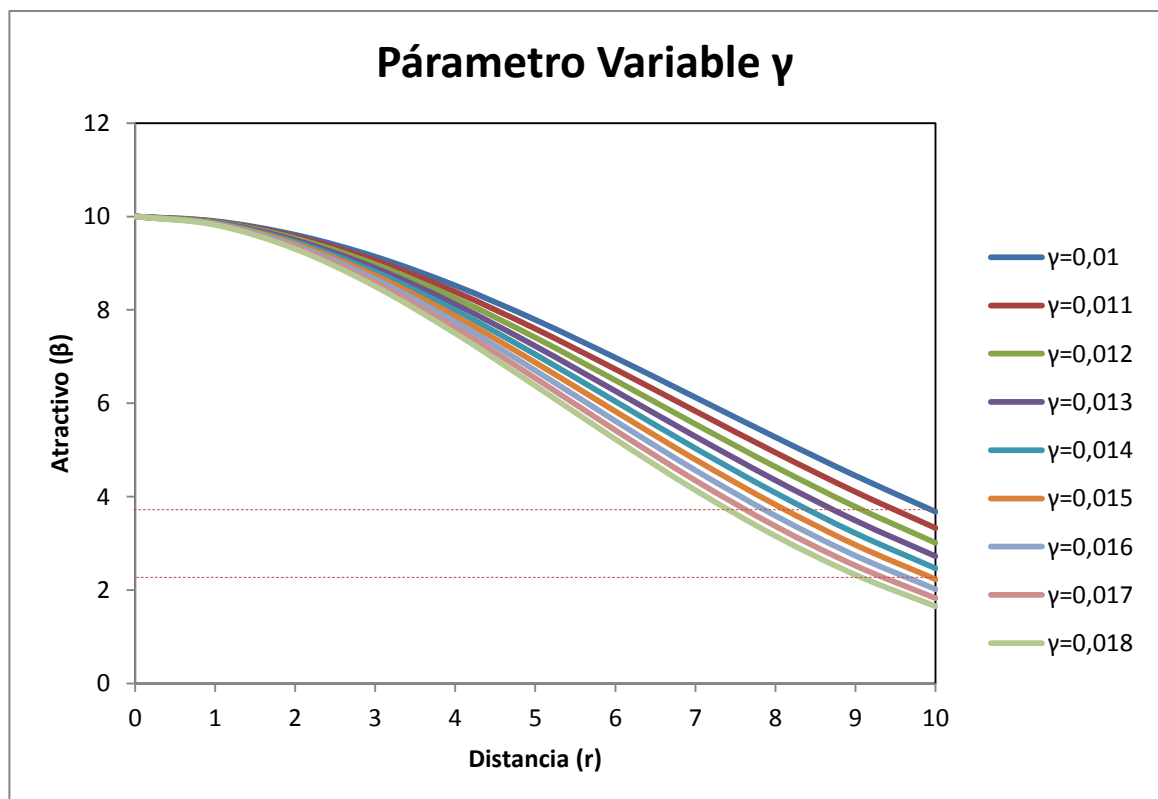
Gráfica 23. Comportamiento del Atractivo  $\beta_0$



Fuente: autores

La velocidad de convergencia es un factor de mucha importancia ya que esta debe tener un valor moderado ya que si se realiza con mucha rapidez se corre el riesgo de que el algoritmo se quede enclavado en un óptimo local y no encuentre el óptimo global y si la convergencia se realiza demasiado lenta el algoritmo le lleva demasiado tiempo de simulación. Uno de los factores que más influye en la velocidad de convergencia es la absorptividad de luz ( $\gamma$ ), por tal razón se hizo un estudio de su comportamiento con un atractivo fijo de  $\beta_0=10$ , con una distancia  $r$  dentro del intervalo parametrizado de 0 a 10 como se observa en la gráfica 24.

Gráfica 24. Comportamiento de la absorptividad de luz ( $\gamma$ )



Fuente: autores

La variación de  $\gamma$  presenta buen comportamiento en el intervalo de 0.01 a 0.018, pero se decidió redefinir este parámetro a un valor de  $\gamma=0.015$  debido a que se genera una pendiente un poco más pronunciada ayudando a que la velocidad de

convergencia sea más moderada, se acerca más al comportamiento en forma de “ese” de la función atractivo del algoritmo original.

**3.3.1.4 Número de Movimientos de las Luciérnagas.** El movimiento de una luciérnaga  $i$  atraído por otra más brillante (más atractiva) luciérnaga  $j$  está determinado por la ecuación 11 la cual fue desglosada de la siguiente manera:

$$xi = xi + \beta_o e^{-\gamma r^2} (xj - xi) + \alpha(\text{rand}() - (0.5))$$

Dónde:  $Atractivo = \beta = \beta_o e^{-\gamma r^2}$

$$xi = xi + \beta(xj - xi) + \alpha(\text{rand}() - (0.5))$$

$$xi = xi + \beta xj - \beta xi + \alpha(\text{rand}() - (0.5))$$

$$xi = xi(1 - \beta) + \beta xj + \alpha(\text{rand}() - (0.5))$$

Si la distancia  $r \longrightarrow \infty$ ,  $\beta=0$ , entonces la luciérnaga  $i$  se moverá aleatoriamente alrededor de su territorio.

Si la distancia  $r \longrightarrow 0$ ,  $\beta=1$ , entonces la luciérnaga  $i$  se moverá hacia la luciérnaga  $j$ .

Si  $\beta$  se encuentra entre 0-1 entonces la luciérnaga  $i$  se moverá entre sus alrededores y los alrededores de la luciérnaga  $j$ .

Se puede entender que en la ecuación del algoritmo luciérnaga original explicada anteriormente, la longitud de movimiento de una luciérnaga está dada por el valor del atractivo  $\beta$  y de la aleatoriedad dada por  $\alpha(\text{rand}() - (0.5))$ ; en la discretización del algoritmo la aleatoriedad se realiza por medio de permutaciones<sup>26</sup> en sectores escogidos al azar de las luciérnagas, con el fin de no dañar el buen camino ya alcanzado en el orden de visita de los puntos o ciudades y así las luciérnagas se

---

<sup>26</sup> Permutación: Es el ordenamiento o arreglo de los elementos de un conjunto, en este caso es el ordenamiento de las ciudades o puntos de una luciérnaga.

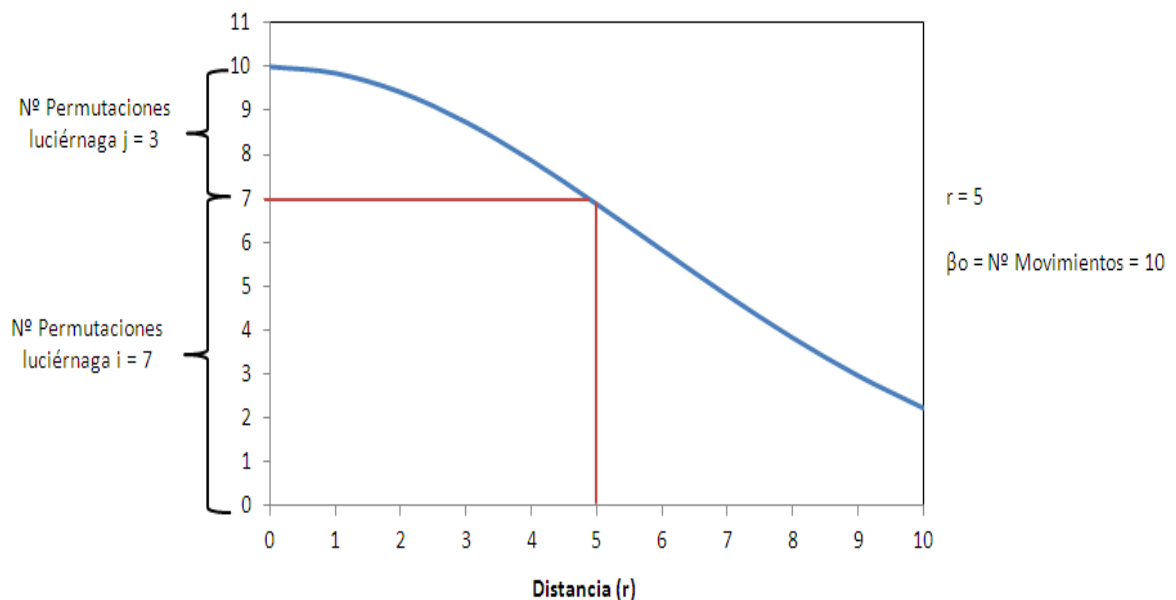
acercuen cada vez más hacia el recorrido óptimo, para la longitud de movimientos de las luciérnagas  $i$  y  $j$  en la discretización de éste algoritmo, se hace de la siguiente manera :

-Si  $\gamma=0.015$  y la distancia  $r = 10$ , por lo tanto  $\beta=2$ , entonces la luciérnaga  $i$  se permuta  $\beta$  veces y la luciérnaga  $j$  se permuta  $(\beta-\beta)$  veces.

- Si  $\gamma=0.015$  y la distancia  $r = 10$ ,  $\beta=\beta_0$ , entonces la luciérnaga  $i$  se permuta  $\beta_0$  veces y la luciérnaga  $j$  se permuta cero (0) veces.

Por lo tanto la probabilidad de que se permute más veces la luciérnaga  $i$  o la  $j$  está dado por el brillo  $\beta(r)$ , donde  $\beta_0$  se llamará *Numero de Movimientos* el cual representa el máximo de cantidad de permutaciones que serán admitidas para que se realicen entre la luciérnaga  $i$  y  $j$ , como se representa en la gráfica 25.

Gráfica 25. Distribución de N° Movimientos de la luciérnaga  $i$  y  $j$



Fuente: autores

Como se observa, el máximo número de permutaciones está dada por  $N^0$  de Movimientos en este caso =10, una distancia Hamming  $r=5$  y una absortividad  $\gamma=0.015$  se obtiene un atractivo  $\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} = 10 e^{-0.015 \cdot 5^2} = 6,87 \cong 7$ , que es el número de permutaciones que tendrá la luciérnaga  $i$  y por lo tanto el número de permutaciones que tendrá la luciérnaga  $j$  será  $(\beta_0 - \beta) = (10 - 7) = 3$  permutaciones.

El número de movimientos necesarios que se necesitan para la solución de un determinado problema TSP mediante el algoritmo luciérnagas será función del número puntos o ciudades y de la población (Numero de luciérnagas) parámetros que son de entrada (suministrados por el usuario) y se optimizaron mediante un Análisis de Varianza ...ver capítulo 5....

**3.3.1.5 Permutaciones.** Una permutación es el arreglo de los elementos de un conjunto, en éste caso es el ordenamiento de las ciudades o puntos, representando los movimientos que una luciérnaga realiza para que la sumatoria de las distancia entre todos los puntos sea la mínima.

Para el algoritmo luciérnagas se analizaron cuatro tipos de permutaciones que son las más utilizadas en los algoritmos genéticos para la mutación de sus cromosomas<sup>27</sup> los cuales son: permutación por inversión, por inserción, por intercambio (swap) y por Scramble.

- **Permutación por inversión:** Esta permutación invierte la secuencia de visita de un subconjunto de puntos o ciudades elegida al azar de una luciérnaga.

---

<sup>27</sup> SERPELL, Martin and SMITH, James E. Self-Adaptation of Mutation Operator and Probability for Permutation Representations in Genetic Algorithms. IN: Evolutionary Computation. August, 2010. vol. 18, no. 3, p. 491-514.

LUCIÉRNAGA: L= 

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

Posiciones escogidas al azar: I=2 y J=6

Subconjunto de L = 

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

LUCIÉRNAGA: L'= 

1	6	5	4	3	2	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

- **Permutación por inserción:** Esta permutación escoge la posición de un punto o ciudad al azar de una luciérnaga y se inserta en otra posición de una ciudad escogida al azar.

LUCIÉRNAGA: L= 

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

Posiciones escogidas al azar: I=7 y J=4

Posición de Puntos 

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

LUCIÉRNAGA: L'= 

1	2	3	7	4	5	6	8
---	---	---	---	---	---	---	---

- **Permutación por intercambio (Swap):** Aquí se intercambian dos puntos o ciudades de una luciérnaga elegidas al azar.

LUCIÉRNAGA: L= 

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

Posiciones escogidas al azar: I=3 y J=5

Posición de Puntos 

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

LUCIÉRNAGA: L'= 

1	2	7	4	5	6	3	8
---	---	---	---	---	---	---	---

- **Permutación por Scramble:** Se escoge un subconjunto de puntos o ciudades al azar de una luciérnaga y se aleatoriza.

LUCIÉRNAGA: L= 

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

Posiciones escogidas al azar: I=2 y J=6

Subconjunto de L = 

1	2	3	4	5	6	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

LUCIÉRNAGA: L'= 

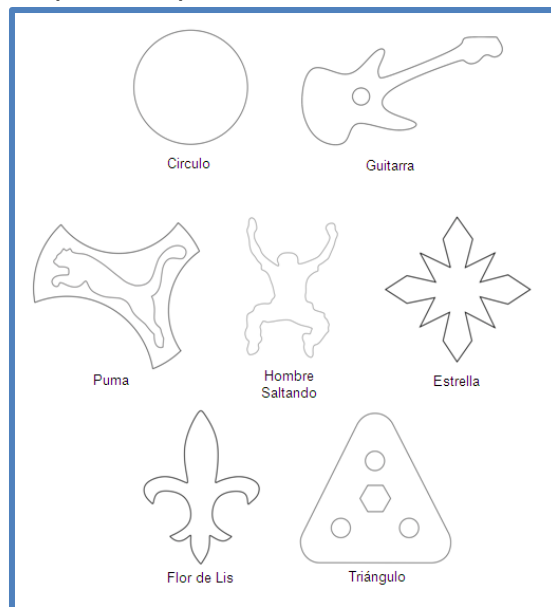
1	3	6	2	4	5	7	8
---	---	---	---	---	---	---	---

Para escoger que tipo de permutación es más eficiente en el algoritmo luciérnaga, se implementó cada permutación en el algoritmo y se determinó la distancia de la ruta de mecanizado resultante con diferentes piezas (ver gráfica 26), utilizando los siguientes parámetros:

- Número de luciérnagas=11
- Número de Movimientos=11
- Número de Iteraciones=2000
- Se hicieron 5 réplicas para cada pieza.

Los resultados se pueden observar en la tabla 2

**Gráfica 26** Piezas de prueba para las permutaciones



Fuente: autores

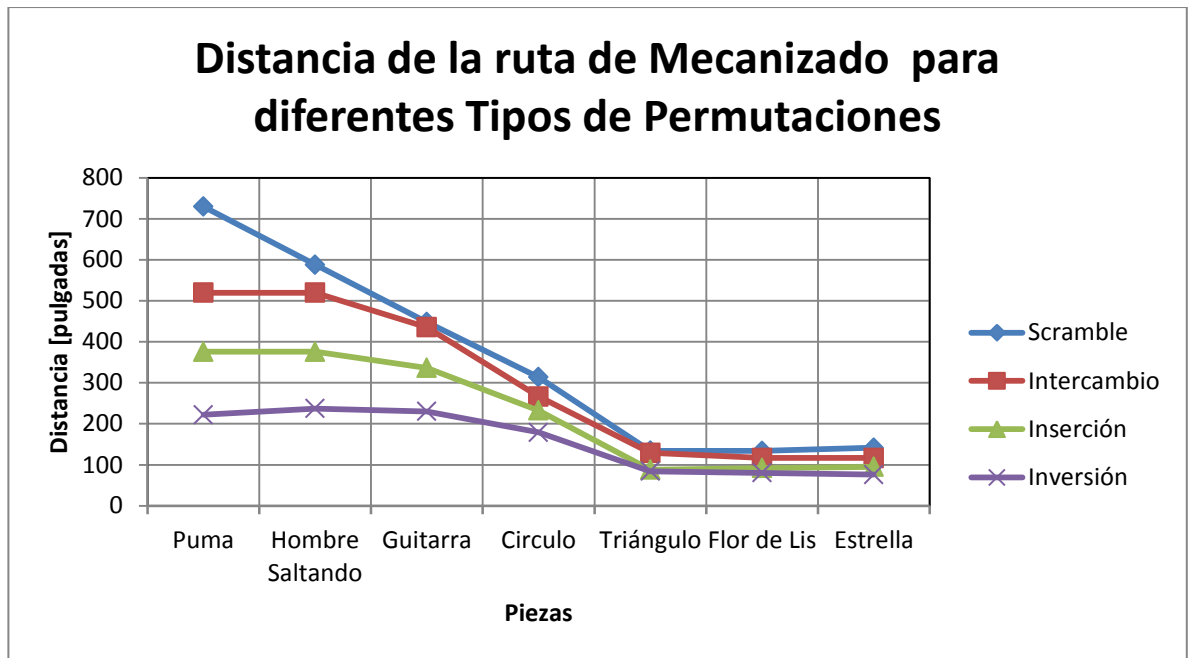
Tabla 2. Distancias de la ruta de Mecanizado hallada mediante el Algoritmo Luciérnaga utilizando diferentes tipos de Permutaciones

Figura y Nº de puntos	Tipo de permutación	Distancia Mecanizado [Pulgadas]					Promedio
		Nº de Replicas					
		1	2	3	4	5	
Puma 987	Inversión	226,1534	219,9659	218,7768	214,2169	230,1238	221,84736
	Inserción	380,2433	367,3409	396,5995	361,1088	373,6976	375,79802
	Intercambio	497,7822	518,3546	527,0507	522,0618	534,3561	519,92108
	Scramble	722,1805	735,7406	735,7406	732,8452	722,1805	729,73748
Hombre Saltando 963	Inversión	237,5495	240,1529	230,3039	245,4258	233,389	237,36422
	Inserción	380,2433	367,3409	396,5995	361,1088	373,6976	375,79802
	Intercambio	497,7822	518,3546	527,0507	522,0618	534,3561	519,92108
	Scramble	593,5154	582,0506	602,0428	573,5685	590,031	588,24166
Guitarra 1061	Inversión	237,3559	225,8046	225,5087	237,3559	225,8046	230,36594
	Inserción	338,8735	327,5125	345,5332	329,3845	340,1721	336,29516
	Intercambio	427,5933	436,5853	439,7689	442,6666	431,5412	435,63106
	Scramble	447,7982	447,7982	447,7982	447,7982	447,7982	447,7982
Círculo 465	Inversión	178,4787	178,2917	179,7361	180,9012	178,4934	179,18022
	Inserción	240,1624	237,8832	230,5466	231,1536	222,7427	232,4977
	Intercambio	261,4981	264,0131	270,2857	267,1683	268,8957	266,37218
	Scramble	314,8976	314,8976	311,5502	313,2804	314,8976	313,90468
Triángulo 122	Inversión	83,0693	86,351	83,8728	84,6762	83,6078	84,31542
	Inserción	84,9078	88,6714	89,8411	87,2028	90,6865	88,26192
	Intercambio	124,4512	137,5412	118,3632	136,6067	127,7591	128,94428
	Scramble	136,37	128,7927	122,8607	139,6562	143,3056	134,19704
Flor de Lis 445	Inversión	80,0972	80,963	80,9185	81,2965	79,2957	80,51418
	Inserción	94,4672	92,9584	91,9272	87,5928	92,7888	91,94688
	Intercambio	120,3335	114,9033	118,8426	113,8739	114,953	116,58126
	Scramble	138,3634	132,3901	133,5476	132,5679	132,7278	133,91936
Estrella 293	Inversión	77,4937	76,934	75,9027	74,911	75,6607	76,18042
	Inserción	97,3393	95,8529	94,9013	94,3551	93,6296	95,21564
	Intercambio	120,5594	120,676	113,3485	113,8498	115,2765	116,74204
	Scramble	143,2469	143,2137	142,943	136,5893	142,036	141,60578

Fuente: autores

El tipo de permutación con la cual siempre se obtuvo la ruta de mecanizado de menor distancia utilizando el algoritmo luciérnaga y diferentes piezas de prueba, es la permutación por Inversión como se puede apreciar en la gráfica 27, por tal razón la permutación por inversión es la que se adopta finalmente en el Algoritmo Luciérnagas.

Gráfica 27. Comportamiento de los diferentes tipos de Permutaciones en el Algoritmo Luciérnaga.



Fuente: autores

**3.3.1.6 Pseudocódigo discreto del algoritmo luciérnaga.** El esquema del pseudocódigo, genera inicialmente una población de luciérnagas escogidas al azar con los parámetros de entrada suministrados por el usuario, a continuación, se elegirán las n mejores luciérnagas basado en una función objetivo (menor distancia de mecanizado); para que cada luciérnaga, encuentre la luciérnaga más brillante o la más atractiva, hay dos métodos: el simple y el complejo (su uso se explica detalladamente en el Anexo: Manual del usuario), en el primer caso si hay una luciérnaga más brillante, a continuación, la luciérnaga menos brillante se moverá hacia la más brillante con movimientos cortos (permutaciones por inversión con subconjuntos pequeños) pero a la vez poniendo a la luciérnaga menos brillante a explorar un poco sus alrededores más cercanos y si es el segundo caso, la luciérnagas menos brillantes tendrán que explorar su alrededor durante algún tiempo con movimientos largos (permutaciones por inversión con subconjuntos grandes) ignorando un poco a las luciérnagas que desprenden

mayor brillo, esto se hace durante cierto tiempo, que una vez ha acabado, empieza a buscar a las luciérnagas más brillantes como en el primer caso. Al final del proceso de búsqueda cada luciérnaga en este caso se habrá tenido un número de movimientos ( $m$ ) dados por cada luciérnaga que pertenezca a la población ( $n$ ) por lo tanto al final de la iteración habrá ( $m \times n$ ) nuevas luciérnagas para empezar la nueva iteración donde solo se seleccionan las  $n$  mejores soluciones para el nuevo proceso que se repetirá hasta que se alcance el máximo de iteraciones designadas.

## Esquema del Pseudocódigo del Algoritmo Luciérnaga

### Parámetros de Entrada

- Puntos o ciudades
- Número de Luciérnagas ( $n$ )
- Numero de Movimientos de las Luciérnagas ( $B_0$ )
- Número de Iteraciones ( $G$ )
- Coeficiente de absorción de Luz ( $\gamma$ )
- Configuración de la figura + Simple  
+ Compleja

### PROCESO

```
for k=1:n
  Generar Población de luciérnagas (soluciones Iniciales)
end

Mientras (t<G)
  Función Objetivo: Hallar las n Luciérnagas con mayor Intensidad de luz (I)
  (Trayectorias de menor distancia ).
  if Menor Distancia < Menor Distancia Global
    SALIDA :Vista Previa de Resultados y Visualización Gráfica
  end

  for i=1:n Todas las luciérnagas
    for j=i:n Todas las luciérnagas
      if  $l_i < l_j$ 
        -Calcular la distancia entre luciérnagas ( $r$ =Distancia Hamming)
        -Calcular el atractivo entre luciérnagas ( $B=B_0 * \exp(-\gamma * r^2)$ )

        if  $t < 0.37G$  && Compleja
          Seleccionar luciérnagas j (Explorar terreno alrededor de j)
        else
          Seleccionar luciérnaga i (Mover luciérnaga j hacia i )
        end

        for u=1:B
          if ( $t < 0.27G$  && Complejo) ||  $l_i = l_j$ 
            Movimientos Largos (Luciérnagas exploratorias) m veces
          else
            Movimientos Cortos (Luciérnagas selectivas) m veces
          end
        end
      end
    end
  end
end

1 2 3 4
Continúa....
```



## 4. PROCESAMIENTO DE IMAGEN

Matlab es una herramienta computacional que cuenta muchos comandos que permiten realizar diferentes tipos transformaciones a una imagen que es creada inicialmente por el usuario mediante programas de Dibujo, a continuación se explica de manera sencilla como trabaja Matlab las imágenes y los comandos que fueron utilizados para el procesamiento e identificación de puntos de maquinado y desbaste.

### 4.1 REPRESENTACIÓN DE IMÁGENES EN MATLAB

Matlab representa las imágenes mediante una matriz de tamaño  $[fxc]$  donde  $f$  representa el número de filas de la matriz y  $c$  el número de columnas de la matriz, cada elemento de la matriz corresponde a un solo pixel de la imagen por lo tanto la matriz que representa la imagen de Matlab está formada por un total de  $fxc$  pixeles.

Por ejemplo una imagen que es hecha en un programa de dibujo (ejemplo SolidWorks o CorelDraw) en un fondo blanco con unas dimensiones de 9 pulgadas de alto y 9 pulgadas de ancho y una resolución de 200ppp (ppp significa pixeles por pulgada e indica el número de pixeles por cada pulgada) la matriz de Matlab tendrá un tamaño de  $f=c=9\text{pulgadas}\times 200\text{ppp}=1800$  pixeles; en la gráfica 28 se muestra la representación matricial de una imagen en Matlab con las características descritas en el ejemplo, donde se puede ver en el recuadro rojo el número de filas ( $f$ ) y columnas ( $c$ ) que conforman la matriz, la celda en el recuadro en negro representa un pixel de una imagen y como el valor de la celda es 255 quiere decir que el color del pixel que conforma la imagen es blanco.

Gráfica 28. Matriz representativa de una Imagen en Matlab

The screenshot shows a Matlab window titled 'pushbutton5\_Callback'. The command window contains the command 'b = 1800x1800 uint8 >'. Below the command, a table displays a 19x9 grid of values, all of which are 255. The columns are numbered 1 through 9, and the rows are numbered 1 through 19. The table is scrollable, with arrows visible at the bottom.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	255	255	255	255	255	255	255	255	25
2	255	255	255	255	255	255	255	255	25
3	255	255	255	255	255	255	255	255	25
4	255	255	255	255	255	255	255	255	25
5	255	255	255	255	255	255	255	255	25
6	255	255	255	255	255	255	255	255	25
7	255	255	255	255	255	255	255	255	25
8	255	255	255	255	255	255	255	255	25
9	255	255	255	255	255	255	255	255	25
10	255	255	255	255	255	255	255	255	25
11	255	255	255	255	255	255	255	255	25
12	255	255	255	255	255	255	255	255	25
13	255	255	255	255	255	255	255	255	25
14	255	255	255	255	255	255	255	255	25
15	255	255	255	255	255	255	255	255	25
16	255	255	255	255	255	255	255	255	25
17	255	255	255	255	255	255	255	255	25
18	255	255	255	255	255	255	255	255	25
19	255	255	255	255	255	255	255	255	25

Fuente: autores

#### 4.2 TIPOS DE IMÁGENES EN MATLAB

Para el procesamiento de imagen se le pide al usuario que dibuje las cavidades con líneas de color negro en un fondo blanco preferiblemente, por tal razón los dos tipos de imágenes utilizadas en el procesamiento de Imagen de este proyecto fueron:

- **Imágenes en niveles de grises:** Este tipo de imagen representa en Matlab una matriz en cuyas celdas tienen un valor que va desde 0 (color negro) a 255 (color blanco) representada de la siguiente manera:

10	255	255	255
12	200	100	150
35	50	60	80
0	180	170	130

- **Imágenes binarias:** Este tipo de imagen representa en Matlab una matriz en cuyas celdas tienen un valor 0 (color negro) y 1 (color blanco) únicamente representada de la siguiente manera:

0	0	0	1
1	0	0	1
1	1	0	1
1	1	1	1

### 4.3 LECTURA DE IMÁGENES DESDE MATLAB

El procesamiento de Imagen en éste proyecto se realiza mediante imágenes que tengan un formato JPEG ó BMP cuyas extensiones son .jpg y .bmp.

Para leer una imagen en niveles de grises mediante Matlab se utiliza la función `imread` y se guarda la matriz de la imagen leída en una variable llamada `b` mediante la siguiente sintaxis:

- Si la imagen se encuentra dentro de la carpeta de trabajo de Matlab:  
`b =imread('nombre_Imagen.extension');`
- Si la imagen se encuentra externa a la carpeta de trabajo de Matlab :  
`[FileName Path]=uigetfile({'*.jpg;*.bmp'},'Abrir Imagen');`  
`b=imread(strcat(Path,FileName));`

En la gráfica 28 se muestra la matriz llamada `b` que fue leída mediante los comandos anteriores.

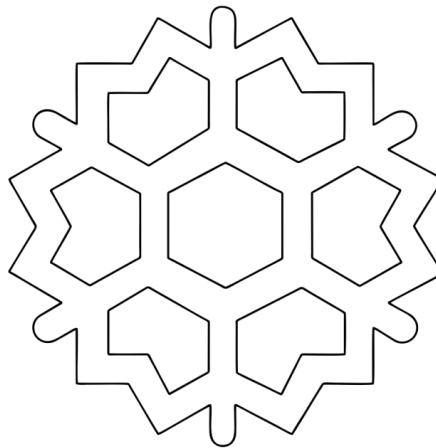
#### 4.4 MOSTRAR IMAGEN EN MATLAB

Para mostrar la imagen que conforma la matriz numérica en Matlab se utiliza el comando **imshow** con la siguiente sintaxis:

```
imshow(Nombre_de_la_Matriz);
```

Al final dependiendo de los valores numéricos que contenga las celdas de la matriz se puede ver una imagen como la que se muestra en la gráfica 29.

Gráfica 29. Imagen de una Cavidad



Fuente: autores

#### 4.5 INVERTIR COLORES A UNA IMAGEN EN MATLAB

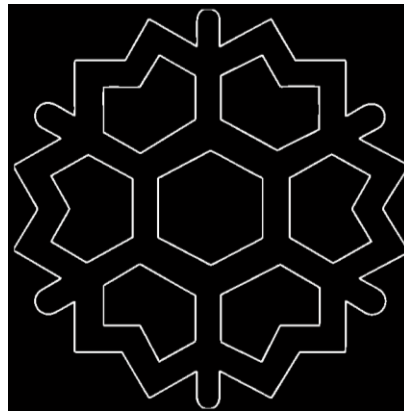
Ya que Matlab representa las imágenes mediante matrices, si se desea invertir o modificar los colores de una imagen simplemente hay que cambiar los valores que tiene la matriz.

- **Inversión de imágenes en niveles de grises:** como se explicó los valores de una imagen en niveles de grises van de 0 a 255, por lo tanto para invertir sus colores simplemente hay que coger la matriz que representa la imagen (b) y hacer una nueva matriz (c) con la siguiente sintaxis:  $c=255-b$ .

- **Inversión de imágenes binarias:** se aplica el mismo procedimiento que en el caso anterior pero como la imagen binaria son solo 0 y 1 la sintaxis sería de la siguiente manera  $c=1-b$ ; o también se puede a través de la siguiente sintaxis  $c=\sim b(:, :, 1)$ , lo cual cambia los valores que eran cero en la matriz (b) por unos y los valores que eran unos por ceros.

El resultado de invertir los colores de la gráfica 29 se muestra en la gráfica 30.

Gráfica 30. Inversión de colores de la Imagen

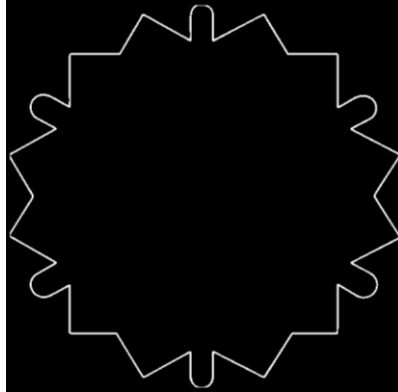


Fuente: autores

#### 4.6 ETIQUETA DE ELEMENTOS CONECTADOS EN MATLAB

Matlab contiene una función importante que permite etiquetar o nombrar la región que está dentro de los elementos de contorno cerrado (ver gráfica 31) con un valor de identificación para cada elemento que va desde 1 hasta  $N_e$  (Número total de elementos), para ello se necesita que la imagen sea binaria y que el contorno cerrado sea de color blanco.

Gráfica 31. Elemento de Contorno cerrado de una Imagen



Fuente: autores

A manera de ejemplo se puede decir que la figura que se muestra en la gráfica 30 tiene un total de 8 elementos (Ne).

La sintaxis utilizada para el etiquetado en Matlab es la siguiente:

```
[L Ne]=bwlabel(c,8) ;
```

Dónde: c es la matriz de la imagen a la cual se le quiere etiquetar los elementos, Ne es el número total de elementos o componentes que tiene la imagen y L es nombre de la variable en la cual se guardan las etiquetas de los elementos y el número 8 es un tipo de conectividad que dice que el pixel pertenece al mismo objeto si existe un pixel de valor 1 en las posiciones 1,2,3,4,5,6,7,8.

#### **4.7 FUNCIONES ROICOLOR Y IMFILL EN IMÁGENES BINARIAS EN MATLAB**

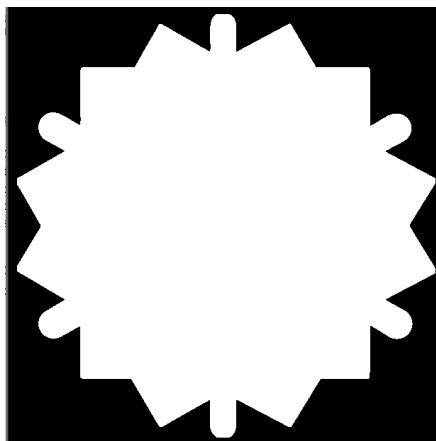
Con la función **roicolor** se puede elegir la región o regiones de interés con las cuales se quiere trabajar o realizar algún tipo de procesamiento de imagen sin tener en cuenta la totalidad la imagen. Esta función se basa en el color o etiqueta que se le ha dado a un elemento, su sintaxis es: **d =roicolor(L,1,Ne)**; donde L es el nombre de la matriz que contiene los elementos etiquetados, dependiendo de la

región que se quiere trabajar se seleccionada con cualquier tipo de etiqueta nombrada desde 1 hasta Ne.

Con la función **imfill** se puede rellenar la(s) área(s) de la imagen que conforman un elemento o contorno cerrado mediante la sintaxis: **e=imfill(nombre dela matriz,'holes')**.

Al aplicar la función **imfill** en la imagen de la gráfica 31 con la sintaxis mencionada anteriormente el resultado sería el que se muestra en la gráfica 32.

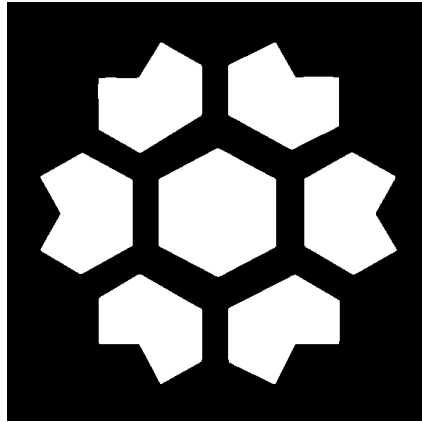
Gráfica 32. Aplicación de la función **imfill** a la gráfica 31.



Fuente: autores

Ahora si se tiene la imagen de la gráfica 30 y se quiere realizar la operación **imfill** solo a los elementos que están en la zona interior del elemento que tiene la forma que se muestra en la gráfica 31 se tendría que combinar **imfill** con **roicolor**, suponiendo que la etiqueta del elemento de la gráfica 31 es 1, entonces las etiquetas de los elementos internos a ella van desde 2 hasta  $Ne=8$  que son las áreas de interés, por tal razón si **L** es la matriz de etiquetas de la gráfica 30; y se aplica la sintaxis siguiente: **d=roicolor(L,2,Ne)** y luego **imfill(d)** el resultado final se muestra en la gráfica 33.

Gráfica 33. Aplicación de la función roicolor e imfill a la gráfica 30



Fuente: autores

#### 4.8 DILATACIÓN DE IMÁGENES EN MATLAB

Para la aplicación de esta función morfológica de dilatación se necesita que la imagen sea binaria, el objetivo es adicionar pixeles al contorno de los elementos u objetos de una imagen, la forma como se adicionen estos elementos depende de cómo se defina el elemento estructural el cual puede ser Disco (Disk), cuadrado (square) o rombo (diamond), la estructura se define mediante la siguiente sintaxis:

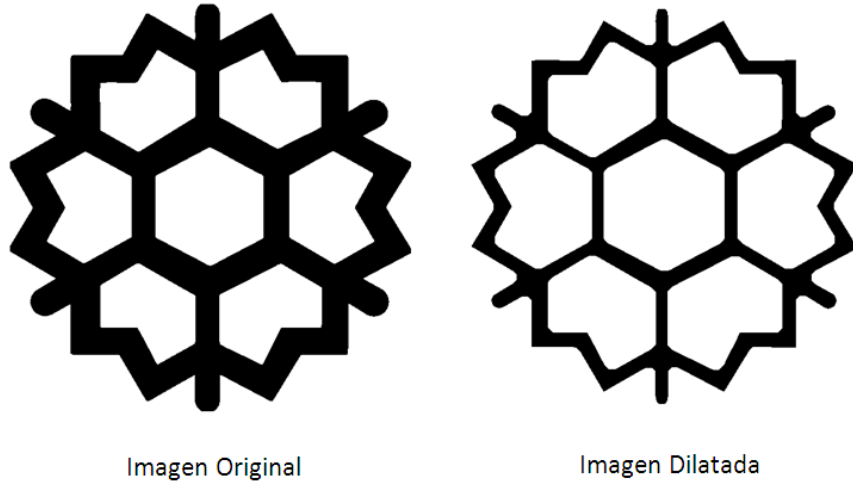
**Ele=strel('Elemento estructural', Espesor en pixeles );**

Ejemplo: **Ele=strel('disk',20);**

Una vez definido el elemento estructural se puede aplicar la dilatación a cualquier imagen binaria mediante la siguiente sintaxis:

**Dilatacion=imdilate(Nombre de la imagen,Ele);** el resultado de esta operación morfológica se muestra en la gráfica 34, cabe destacar que los pixeles que se dilatan son los de color blanco o de valor=1.

Gráfica 34. Dilatación de Imagen.



Fuente: autores

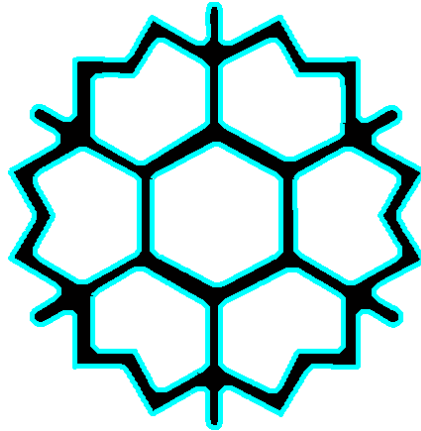
#### 4.9 PERÍMETRO DE UNA IMAGEN EN MATLAB

El acceso a las coordenadas de los puntos que conforman el perímetro de una imagen binaria es importante para determinar los puntos de acabado que son maquinables o no en el diseño del software.

Para acceder a las coordenadas de los puntos que pertenecen al perímetro de una imagen basta con aplicar la función **bwboundaries** con la siguiente sintaxis:

**Perímetro=bwboundaries(Nombre de la Imagen);** en la variable llamada Perímetro se guardan las coordenadas de los puntos que conforman el contorno de cada uno de los elementos cerrados que tiene la imagen. En la gráfica 35 se puede observar de color azul cian la línea que compone el perímetro de los elementos de contorno cerrados de la imagen.

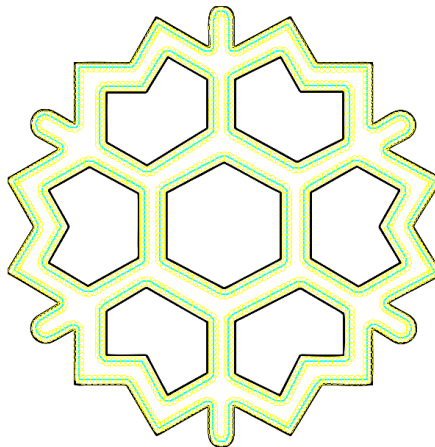
Gráfica 35. Perímetro de una Imagen



Fuente: autores

La posibilidad de dilatar y encontrar las coordenadas de los puntos que pertenecen al perímetro de una imagen binaria permite la implementación del proceso de acabado y representar el diámetro de la fresa mecanizadora de color amarillo en la zona donde se realiza el acabado como se observa en la gráfica 36.

Gráfica 36. Ruta de los puntos de Acabado



Fuente: autores

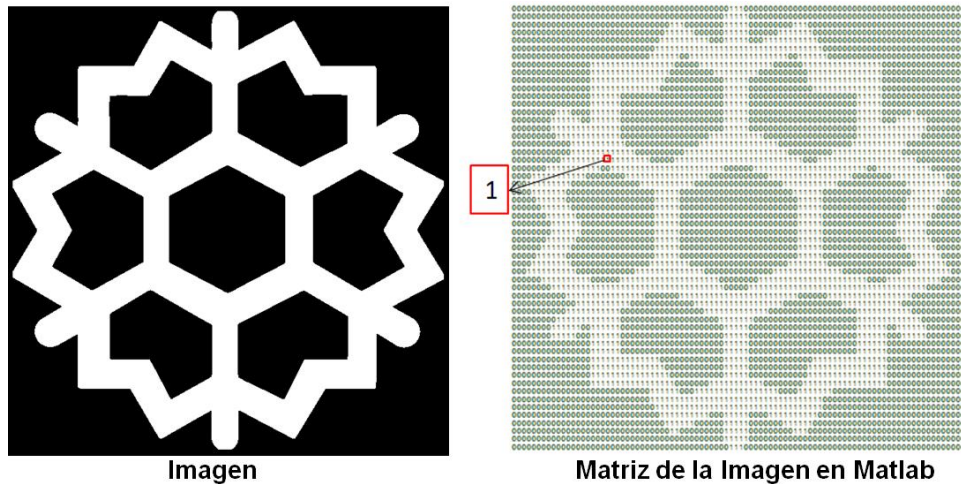
#### 4.10 ACCESO A LOS VALORES DE LA IMAGEN EN MATLAB

El acceso al valor de los píxeles es una operación importante para determinar los puntos de desbaste que son maquinables o no en el diseño del software.

Para acceder a estos valores solo basta con indicar la posición del punto dentro de la matriz que representa la imagen en MATLAB, por ejemplo si se quisiera saber el valor que está ubicado en la coordenada  $(f,c)=(20,20)$  de la imagen binaria que se muestra en la gráfica 37, se realiza mediante la siguiente sintaxis:

**Valor= Nombre\_de\_la\_matriz\_que\_representa\_la\_Imagen(f,c).**

Gráfica 37. Acceso al valor de una imagen en Matlab

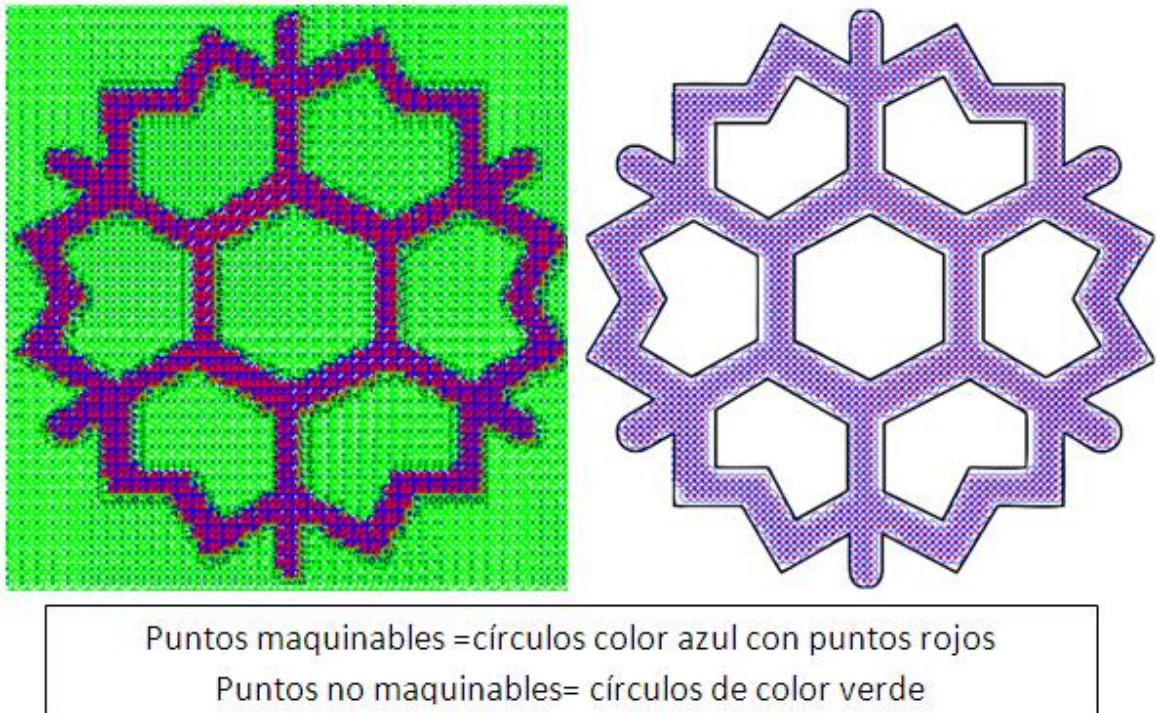


Fuente: autores

Todas las funciones descritas en el presente capítulo sobre procesamiento de imagen y la posibilidad de poder determinar qué región de la matriz de la Imagen binaria de Matlab está compuesta por unos y que región por ceros fue utilizada para el diseño de la rejilla de puntos maquinables para el proceso de desbaste, que se basa en dibujar círculos de color azul del diámetro de la fresa (escogida por el usuario) en las zonas compuesta únicamente por unos, si dentro de la zona

que encierra el círculo pintado se encuentran valores iguales a cero se considera como región no maquinable y se pintan círculos de color verde como se observa en la gráfica 38.

Gráfica 38. Representación de los puntos de Desbaste.



Fuente: autores

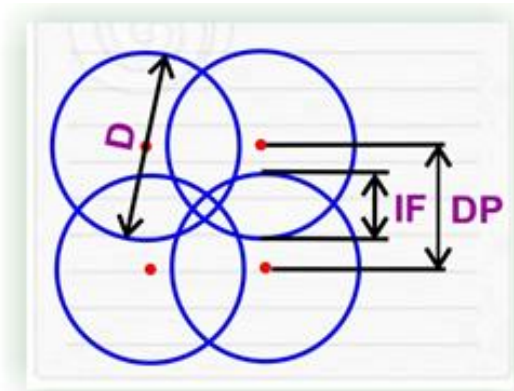
#### **4.11 SOLUCIÓN A LOS PROBLEMAS ASOCIADOS AL CÁLCULO DE TRAYECTORIAS**

Para saber en qué consisten los problemas asociados al cálculo de trayectorias, véase ...en la sección 2.8.2..., en esta parte solo se dará información de cómo fueron solucionados estos problemas por los autores del proyecto.

**4.11.1 Precisión.** Como se puede observar en las gráficas 36 y 37, el procesamiento de imagen realizado para los proceso de acabado y desbaste, permitió que los puntos de maquinado se ubicaran en regiones solamente maquinables de manera precisa.

- **Distancia entre putos sucesivos y Distancia entre pasada:** En este procesamiento de imagen, estas dos distancias son iguales y la cual se nombra Distancia entre puntos (DP) la cual está determinada en función del diámetro de la fresa (D), esta distancia debe ser inferior a  $DP < D - 0.3D$  para que no se generen cúmulos o valles y superior a  $DP > D - 0.5D$  para que los mecanizados no se solapen en exceso y retarde el tiempo de mecanizado. En la gráfica 39 se puede observar la rejilla o maya cuadrada que se adoptó para la ubicación de los puntos de desbaste y acabado.

Gráfica 39. Distancia entre puntos de la Rejilla de Mecanizado



D= Diámetro de la fresa

DP=Distancia entre puntos=  $D - [0.3-0.5] D$

IF= Distancia de Superposición=  $[0.3-0.5] D$

Fuente: autores

**4.11.2 Geometría de la herramienta incorrecta.** La geometría de corte de una fresa de mecanizado es de forma circular, para que esta geometría se acomode a curvaturas de la cavidad estrecha o ancha se debe escoger un diámetro apropió para cada caso, el procesamiento de imagen en este software es visible en tiempo real y el usuario lo puede realizar las veces que quiera hasta que el desbaste y acabado resultante sean los deseados por el usuario.

**4.11.3 Problemas de inconsistencia topológica en el objeto.** Pueden producirse errores de procesamiento de imagen cuando: la imagen presenta contornos abiertos, intersecciones, superficies superpuestas, casos que se deben evitar a la hora de diseñar una cavidad.

**4.11.4 Compensado.** En el proceso de mecanizado, la maquina CNC dirige la trayectoria de la fresa controlando únicamente el centro de ésta. Por medio del proceso de dilatación y detección de puntos en el procesamiento de imagen, se logró encontrar la ubicación del centro de la herramienta para que esta sea normal a la superficie de mecanizado.

**4.11.5 Planificación de la trayectoria.** La forma en que se deben ordenar los puntos que conforman una trayectoria para que no se produzcan errores y para que el tiempo de mecanizado sea el menor posible se realiza mediante el algoritmo luciernaga aplicado a la resolución del problema del viajero.

A continuación se muestra el pseudocódigo perteneciente al procesamiento de Imagen donde se explica de manera detallada con un lenguaje fácil e informativo el funcionamiento paso a paso de la transformación que sufre una imagen por medio de las funciones de Matlab descritas en el presente capítulo, para luego poder seleccionar y obtener los puntos maquinables de una cavidad para hacer una representación igual a las mostradas en la gráficas 36 y 38 en tiempo real.

## 4.12 PSEUDOCÓDIGO PARA EL PROCESAMIENTO DE IMAGEN EN MATLAB

### Parámetros de Entrada

- Unidades +Pulgadas  
+Centímetro
- Resolución de la Imagen a Procesar (ppp)
- Diámetro de la Fresa (D)
- Distancia entre Puntos de la Rejilla (DP)
- Importar Imagen Original (I1)
- Tipo de Acabado + Disco  
+ Cuadrado  
+ Rombo  
+ Sin Acabado

### PROCESO DE RECONOCIMIENTO DE IMAGEN Y PROCESAMIENTO

- Convertir D y Dp a su equivalencia en píxeles quedando: Dpix y Dppix respectivamente
- Expandir Imagen I1 (colocar un recuadro en el contorno a la Imagen) (I2)
- Binarizar Imagen I2 (Color blanco=1, Color negro=0) (I3)
- Etiquetar el número componentes o elementos ( regiones de contorno cerrado) que conforman la imagen I3 (Ne)

```
if Ne=1
    Tomar el componente de la Imagen I3 dejandolo blanco y su región exterior de color negro (I4a).
else
    Tomar el o los componentes de la Imagen I3 dejandolo(s) negro(s) y su región exterior de color blanco (I4b).
end
```

**SALIDA:** Mostrar Imagen Original I1

### PROCESO DE SELECCIÓN DE PUNTOS DE DESBASTE

- Hallar el tamaño de la Imagen I4,filas y Columnas [f c]
- Recorrer la matriz de la Imagen I4 y Comprobar si es área maquinable (blanca=1) ó no maquinable (Negra=0)

Continúa...

```

for y=1:DpPIX:f
    for x=1:DpPIX:c
        if I4(x,y)=1
            si en la matriz de la imagen I4 en las coordenadas x,y &
            en una región que se encuentra dentro de un perímetro
            de un círculo de radio=DpPIX/2, esta conformado por celdas
            de valor=1 (Color Blanco).

            - Dibujar un círculo azul en las coordenadas x,y de igual
            diámetro al de la fresa de mecanizado (D).

            - Guardar las coordenadas de los puntos de Desbaste

        else
            Dibujar un círculo verde en las coordenadas x,y de igual
            diámetro al de la fresa de mecanizado (D).
        end
    end
end
end

```

**SALIDA:** Mostrar puntos que son maquinables (azul) y los que no (verde).(ID)

## PROCESO DE SELECCIÓN DE PUNTOS DE ACABADO

- Invertir colores (blanco por negro ) o valores de la matriz (1 por 0) de la imagen I4 (I5)
- Dilatar mediante una función de Matlab una distancia DpIX el o los contorno(s) que conforma(n) la imagen blanca según el tipo de acabado deseado (I6)
- Obtener las coordenadas de los puntos que conforman el o los contorno(s) de la imagen I6 mediante una función de Matlab.
- Guardar las coordenadas de los puntos de Acabado.
- Obtener el tamaño del vector de puntos de Acabado (lon)

continua...

- Gráficar en la coordenadas x,y de los puntos de Acabado círculos de color amarillo.

```
for i=1:Dppix:lon
    Dibujar circulo amarillo del diámetro (D) de la fresa mecanizadora (IA)
end
```

- Convertir puntos coordenados de Desbaste y Acabado a su equivalencia en pulgadas o centímetros

## RESULTADOS Y VISUALIZACIÓN

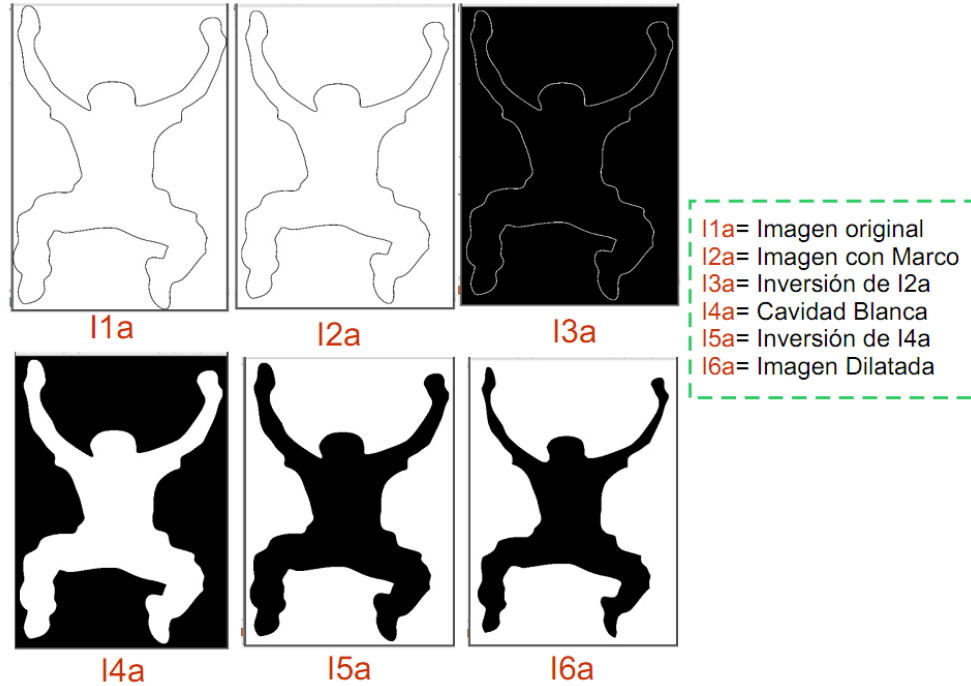
- Tabla de las coordenadas de los puntos de Desbaste o Acabado.
- Gráficas de Acabado(IA), Desbaste(ISA) y la Cavidad (IC).

**Nota:** \*Ver gráfico 40 para observar la evolución de las Imágenes descrito en el Pseudocódigo de Procesamiento de Imagen las cuales se pueden identificadas de siguiente manera (I+Numero)

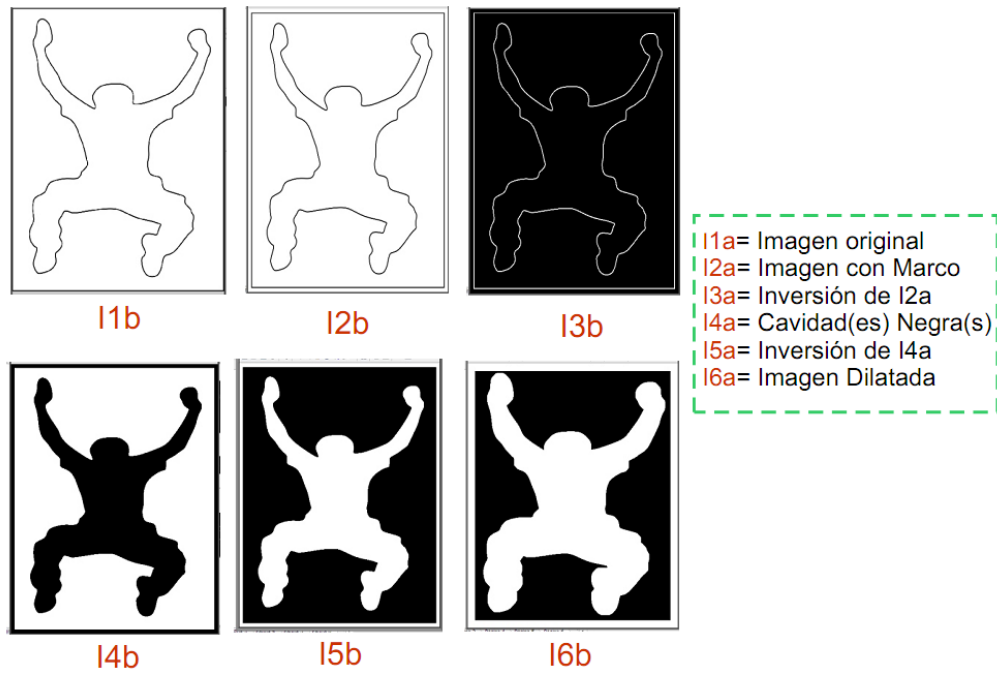
\*Ver gráfico 41 para observar el resultado final de las Imágenes visibles por el usuario descrito en el Pseudocódigo de Procesamiento de Imagen las cuales se pueden identificadas de siguiente manera (I+Letra(s))

Gráfica 40. Evolución del Procesamiento de Imagen en Matlab.

*Evolución del Procesamiento de Imagen para una cavidad sin Islas*



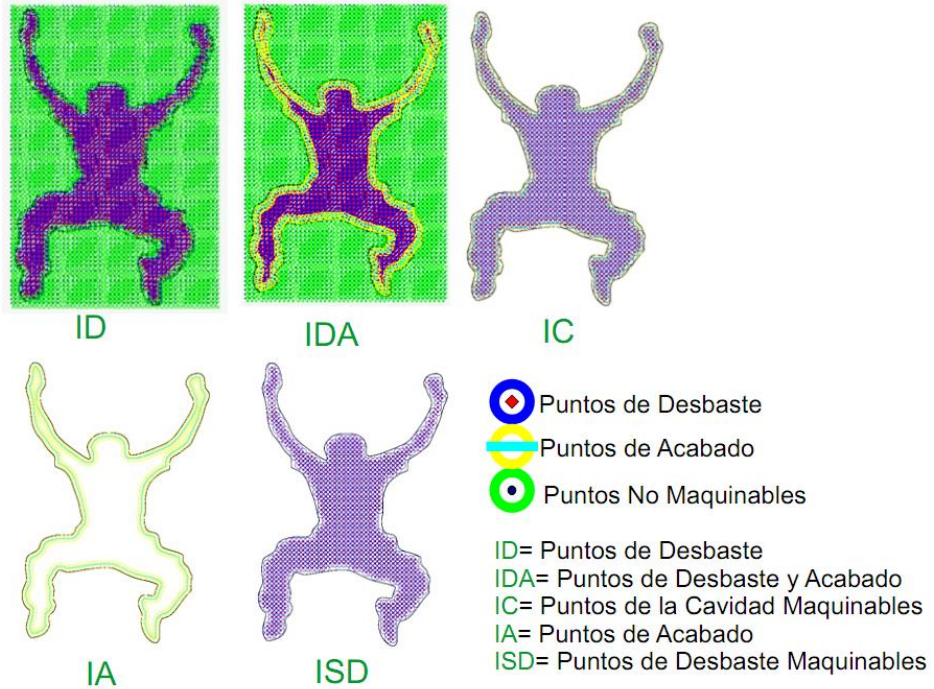
*Evolución del Procesamiento de Imagen para una cavidad con Isla(s)*



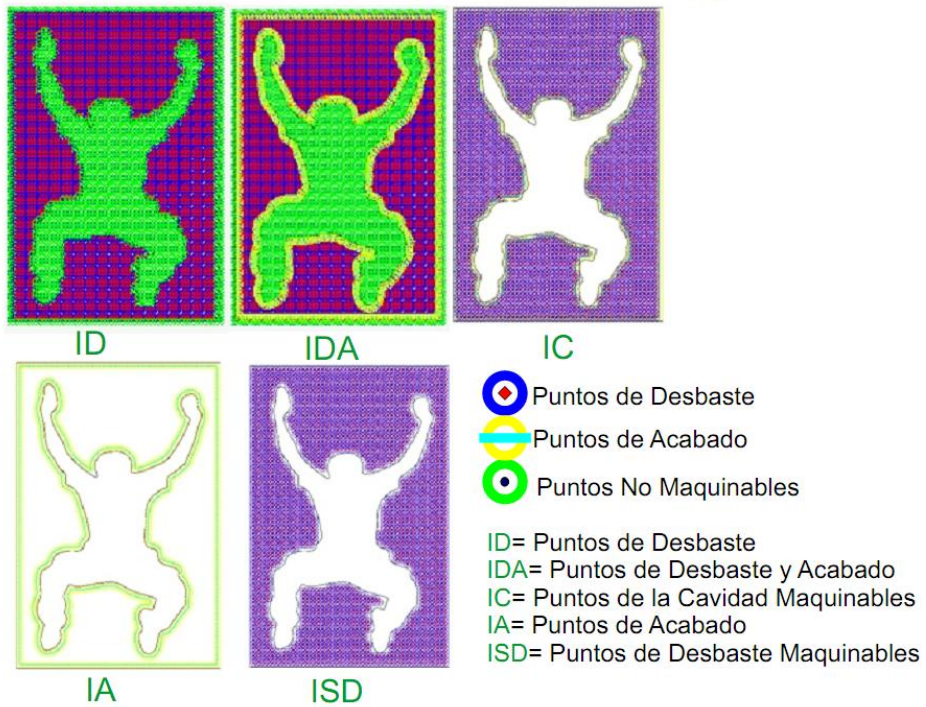
Fuente: autores

Gráfica 41. Identificación de Puntos de Maquinado.

*Resultado final de las Imágenes para cavidad sin Islas*



*Resultado final de las Imágenes para cavidad con Isla(s)*



Fuente: autores

## 5. OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL ALGORITMO LUCIÉRNAGA

...En el capítulo 3, sección 3.3..., se definieron los parámetros del atractivo ( $\beta$ ), absorción de luz ( $\gamma$ ) y movimientos de las luciérnagas; en esta sección se van a parametrizar la población de luciérnagas (número de luciérnagas) y el número de movimientos que tiene cada luciérnaga. El problema radica en que valores elegir para estos parámetros para obtener una respuesta óptima, o si los valores elegidos difieren en la respuesta o no con respecto a otros valores, ya que estos parámetros comprenden todo el conjunto de los números naturales (enteros no negativos). Para poder ajustar estos parámetros y obtener una respuesta óptima, se hizo un análisis de varianza (ANalysis Of VAriance: ANOVA) completamente al azar, que es el más simple de todos los diseños que se utilizan para comparar dos o más tratamientos, dado que sólo consideran dos fuentes de variabilidad: los tratamientos y el error aleatorio<sup>28</sup>.

El ajuste de los parámetros se hizo de la siguiente forma: se hace el análisis de varianza con 8 tratamientos dados para cada factor con 5 réplicas cada uno, primero un análisis de varianza moviendo el factor “Número de Luciérnagas”, con el factor “Número de Movimientos” estático. Luego se realiza un nuevo análisis de Varianza moviendo el factor “Número de Movimientos” con el factor “Número de Luciérnagas” estático, el valor del factor “Número de Luciérnagas” para el segundo análisis de varianza, es el valor del tratamiento óptimo que dio en el primer análisis de varianza.

El ajuste de parámetros se hizo para los dos tipos de cavidades: simple y compleja (ver Anexo B. Manual de usuario), primero ajustando los parámetros para la cavidad simple.

---

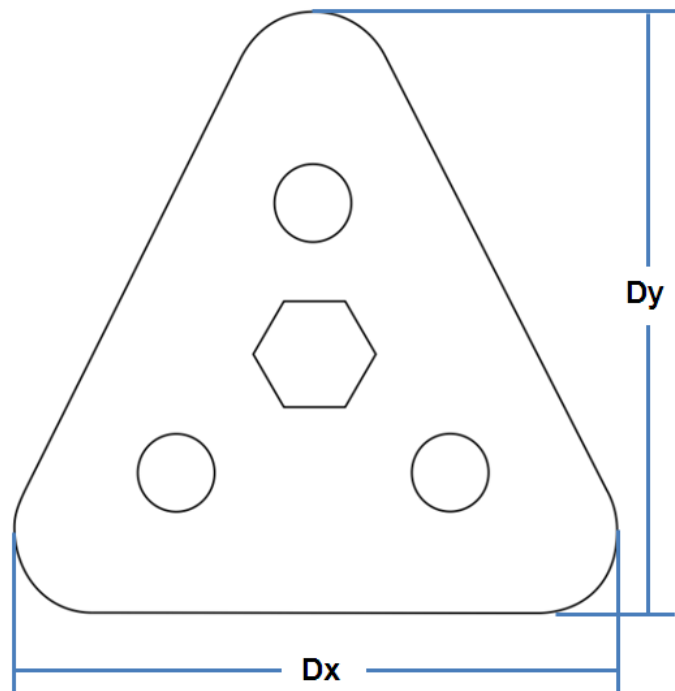
<sup>28</sup> GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y VARA SALAZAR, Román de la. Análisis y diseño de Experimentos. 2 ed. México: McGraw-Hill, 2008. p. 62.

## 5.1 AJUSTES DE LOS PARÁMETROS PARA LA OPCIÓN DE CAVIDAD SIMPLE

### SIMPLE

Para el ajuste de los parámetros de la cavidad simple, se tomó una cavidad en forma de triángulo con solo 4 islas en su interior como se muestra en la gráfica 42.

Gráfica 42. Cavidad triangular para el ajuste de los parámetros de la cavidad simple



Fuente: Autores

Se usaron los siguientes parámetros para la obtención del número de puntos maquinables en la pieza:

- Diámetro de la fresa =  $3/8$ "
- Distancia entre puntos =  $0,24$ " (superposición = 36%)
- $Dx = 12$ ";  $Dy = 12$ "
- Número de puntos maquinables = 1261

**5.1.1 Parametrización del factor “número de luciérnagas”.** Para parametrizar el número de luciérnagas, se fijó el número de movimientos =11 con un número de iteraciones = 2000 por criterio de los autores. Del mismo modo, por experiencia de los autores con respecto al algoritmo, los 8 valores de los tratamientos con los que trabajó el factor “Número de Luciérnagas” es: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12.

Tabla 3. Resultados del diseño experimental de para el factor “Número de Luciérnagas” cavidad simple

TRIÁNGULO (CAVIDAD SIMPLE)							
ALGORITMO LUCIÉRNAGA							
Número de Luciérnagas	Parámetros a Optimizar	Número de Replicas					Promedio de los tratamientos
		1	2	3	4	5	
5	Distancia [Pulg]	412,20	415,88	412,82	423,14	420,14	416,83
	Tiempo [Sg]	461,39	430,67	409,30	411,72	443,86	431,39
6	Distancia [Pulg]	383,95	375,84	389,85	388,41	376,88	382,99
	Tiempo [Sg]	588,97	558,16	567,75	532,36	526,48	554,74
7	Distancia [Pulg]	366,60	364,76	362,11	364,92	360,18	363,71
	Tiempo [Sg]	610,03	651,95	681,74	599,05	624,61	633,48
8	Distancia [Pulg]	351,78	347,02	345,26	353,47	348,60	349,23
	Tiempo [Sg]	725,58	745,25	770,33	729,19	756,16	745,30
9	Distancia [Pulg]	341,63	338,87	342,13	335,50	340,37	339,70
	Tiempo [Sg]	838,91	819,50	858,22	799,56	840,59	831,36
10	Distancia [Pulg]	334,90	334,56	333,61	336,62	335,01	334,94
	Tiempo [Sg]	961,69	954,42	924,02	900,56	863,39	920,82
11	Distancia [Pulg]	332,16	330,72	324,93	323,62	325,79	327,44
	Tiempo [Sg]	1071,02	1108,86	1079,16	1014,02	1133,02	1081,22
12	Distancia [Pulg]	322,22	325,59	321,46	324,79	321,24	323,06
	Tiempo [Sg]	1184,17	1229,34	1165,61	1238,41	1265,23	1216,55

Fuente: Autores

Como se pudo observar en la tabla 3, se pueden ver los resultados del diseño experimental aplicados para el factor “Número de Luciérnagas”, en ella se observan los valores del costo (distancia de recorrida por la fresa), y el tiempo de ejecución del algoritmo con el promedio de las 5 réplicas de cada uno. Se puede ver claramente la diferencia del promedio de los tratamientos tanto para el costo como el tiempo de simulación, por lo consiguiente, los valores del factor “Número de Luciérnagas” afectan la respuesta del costo y el tiempo de simulación como se observa en el análisis de varianza.

**5.1.1.1 Análisis de Varianza para el Costo y Tiempo de simulación.** En la tabla 4 se observa el análisis de varianza con respecto a la respuesta costo y en la tabla 5 el análisis de varianza con respecto al tiempo de simulación<sup>29</sup>.

Tabla 4. Análisis de varianza para el costo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad simple

Variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Estadístico de Prueba Fo	Valor crítico de la Prueba de Fisher (F) con un 95% de confiabilidad
<b>Tratamientos</b>	$SC_{Trat} = 35658,204$	$K-1 = 8-1 = 7$	$CM_{Trat} = \frac{SC_{Trat}}{(K-1)} = 5094,029$	$\frac{CM_{Trat}}{CM_E} = 377,109$	2,313
<b>Error</b>	$SC_E = SC_T - SC_{Trat} = 432,259$	$N-K = 40-8 = 32$	$CM_E = \frac{SC_E}{(N-K)} = 13,508$		
<b>total</b>	$SC_T = 36090,463$	$N-1 = 39$			

Fuente: Autores

<sup>29</sup> Para información detallada de cómo obtener los valores del análisis de Varianza, consultar Análisis y diseño de Experimentos de Gutiérrez PULIDO y De La Vara Salazar Capítulo 3.

Tabla 5. Análisis de varianza para el tiempo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad simple

Variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Estadístico de Prueba Fo	Valor crítico de la Prueba de Fisher (F) con un 95% de confiabilidad
Tratamientos	$SC_{Trat} = 2474492,24$	$K-1 = 8-1 = 7$	$CM_{Trat} = \frac{SC_{Trat}}{(K-1)} = 353498,891$	$\frac{CM_{Trat}}{CM_E} = 335,477$	2,313
Error	$SC_E = SC_T - SC_{Trat} = 33719,021$	$N-K = 40-8 = 32$	$CM_E = \frac{SC_E}{(N-K)} = 1053,719$		
total	$SC_T = 2508211,261$	$N-1 = 39$			

Fuente: Autores

A partir de los resultados obtenidos de las tablas 4 y 5, se concluye que con una confiabilidad del 95%, el estadístico de prueba es mayor que el valor crítico de la prueba de Fisher ( $F_o > F$ ), es decir que se rechaza la hipótesis nula tanto para la respuesta costo como el tiempo, es decir que al menos dos valores del factor “Número de Luciérnagas” afecta la respuesta del costo y del tiempo.

Para saber que valores difieren entre si, se aplica el método de diferencia mínima significativa (**Least Significant Difference: LSD**), que es la diferencia mínima que debe existir entre dos medias muestrales para considerar que los tratamientos correspondientes son significativamente diferentes<sup>30</sup>, el LSD se halla con la siguiente ecuación:

$$LSD = t_{\alpha/2, N-k} \sqrt{\frac{2CM_E}{n}}$$

<sup>30</sup> Ibid., p. 75.

Donde,  $t_{\alpha/2, N-k}$  se lee en las tablas de distribución T de Studen con N-k grados de libertad con una significancia del  $\alpha=5\%$ . El cuadrado medio del error (CM<sub>E</sub>) se elige de la tabla del análisis de varianza y n es el número de réplicas para cada factor. Se obtienen los siguientes valores del LSD para el costo y el tiempo.

$$LSD_{costo} = 2,037 \sqrt{\frac{2 \cdot (13,508)}{5}} = 4,735$$

$$LSD_{tiempo} = 2,037 \sqrt{\frac{2 \cdot (1053,719)}{5}} = 41,818$$

Si  $|X_i - X_j| > LSD$ , se rechaza la hipótesis nula (H1), es decir que la diferencia entre  $X_i$  y  $X_j$  es significativa; si  $|X_i - X_j| < LSD$ , se acepta la hipótesis nula (Ho), es decir que no hay diferencia significativa entre  $X_i$  y  $X_j$ , los resultados de la diferencia mínima significativa, se puede observar en la tabla 6.

Tabla 6. Aplicación de la prueba LSD al factor “Número de Luciérnagas” cavidad simple

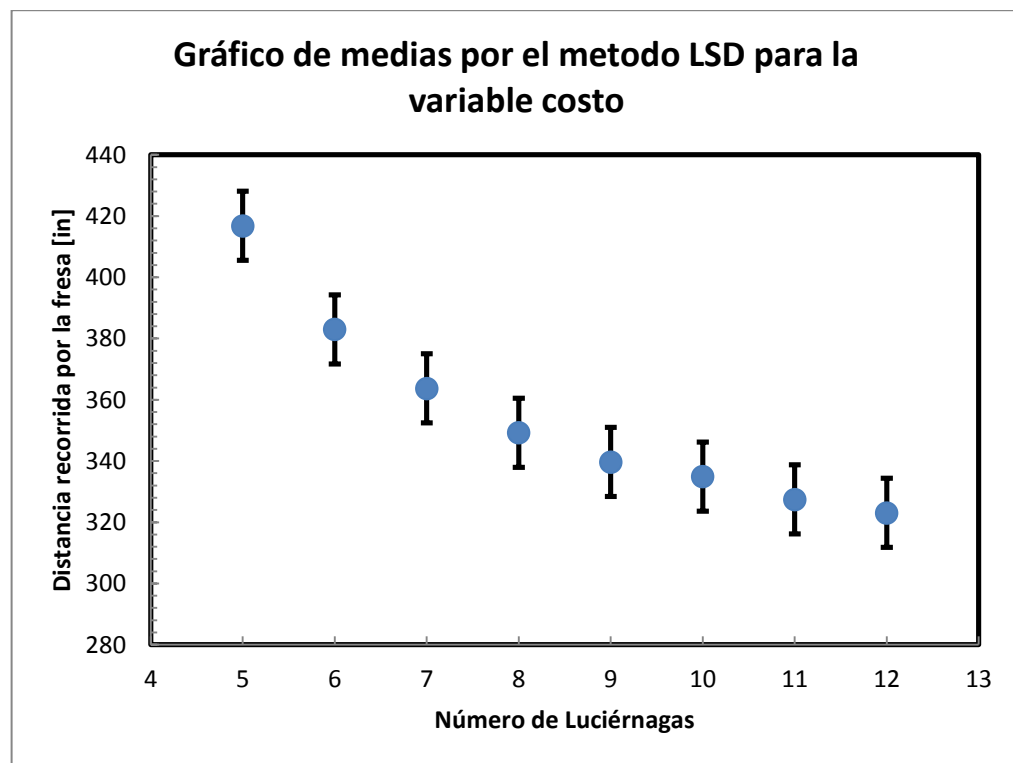
Costo			Tiempo		
Comparación entre Luciérnagas	$ \bar{X}_i - \bar{X}_j $	Hipótesis	Comparación entre Luciérnagas	$ \bar{X}_i - \bar{X}_j $	Hipótesis
Luc=5 - Luc=6	33,84872	H1	Luc=5 - Luc=6	123,3562	H1
Luc=5 - Luc=7	53,12104	H1	Luc=5 - Luc=7	202,0874	H1
Luc=5 - Luc=8	67,60976	H1	Luc=5 - Luc=8	313,9124	H1
Luc=5 - Luc=9	77,1342	H1	Luc=5 - Luc=9	399,9686	H1
Luc=5 - Luc=10	81,89612	H1	Luc=5 - Luc=10	489,428	H1
Luc=5 - Luc=11	89,3917	H1	Luc=5 - Luc=11	649,8284	H1
Luc=5 - Luc=12	93,77596	H1	Luc=5 - Luc=12	785,1644	H1
Luc=6 - Luc=7	19,27232	H1	Luc=6 - Luc=7	78,7312	H1
Luc=6 - Luc=8	33,76104	H1	Luc=6 - Luc=8	190,5562	H1
Luc=6 - Luc=9	43,28548	H1	Luc=6 - Luc=9	276,6124	H1
Luc=6 - Luc=10	48,0474	H1	Luc=6 - Luc=10	366,0718	H1
Luc=6 - Luc=11	55,54298	H1	Luc=6 - Luc=11	526,4722	H1
Luc=6 - Luc=12	59,92724	H1	Luc=6 - Luc=12	661,8082	H1
Luc=7 - Luc=8	14,48872	H1	Luc=7 - Luc=8	111,825	H1
Luc=7 - Luc=9	24,01316	H1	Luc=7 - Luc=9	197,8812	H1
Luc=7 - Luc=10	28,77508	H1	Luc=7 - Luc=10	287,3406	H1
Luc=7 - Luc=11	36,27066	H1	Luc=7 - Luc=11	447,741	H1
Luc=7 - Luc=12	40,65492	H1	Luc=7 - Luc=12	583,077	H1
Luc=8 - Luc=9	9,52444	H1	Luc=8 - Luc=9	86,0562	H1
Luc=8 - Luc=10	14,28636	H1	Luc=8 - Luc=10	175,5156	H1
Luc=8 - Luc=11	21,78194	H1	Luc=8 - Luc=11	335,916	H1
Luc=8 - Luc=12	26,1662	H1	Luc=8 - Luc=12	471,252	H1
Luc=9 - Luc=10	4,76192	H1	Luc=9 - Luc=10	89,4594	H1
Luc=9 - Luc=11	12,2575	H1	Luc=9 - Luc=11	249,8598	H1
Luc=9 - Luc=12	16,64176	H1	Luc=9 - Luc=12	385,1958	H1
Luc=10 - Luc=11	7,49558	H1	Luc=10 - Luc=11	160,4004	H1
Luc=10 - Luc=12	11,87984	H1	Luc=10 - Luc=12	295,7364	H1
Luc=11 - Luc=12	4,38426	Ho	Luc=11 - Luc=12	135,336	H1

Fuente: Autores

De la tabla 6 se concluye que con una confiabilidad del 95% que los únicos valores del factor “Número de Luciérnagas” que no tienen una diferencia significativa con respecto a la respuesta costo son: 11 y 12, es decir que si se usa cualquiera de estos dos valores, la respuesta costo va a hacer prácticamente igual. Para la repuesta del tiempo, todos los valores tienen una diferencia significativa, por lo tanto, usando cualquiera de los valores del factor “Número de Luciérnagas”, afecta la respuesta del tiempo.

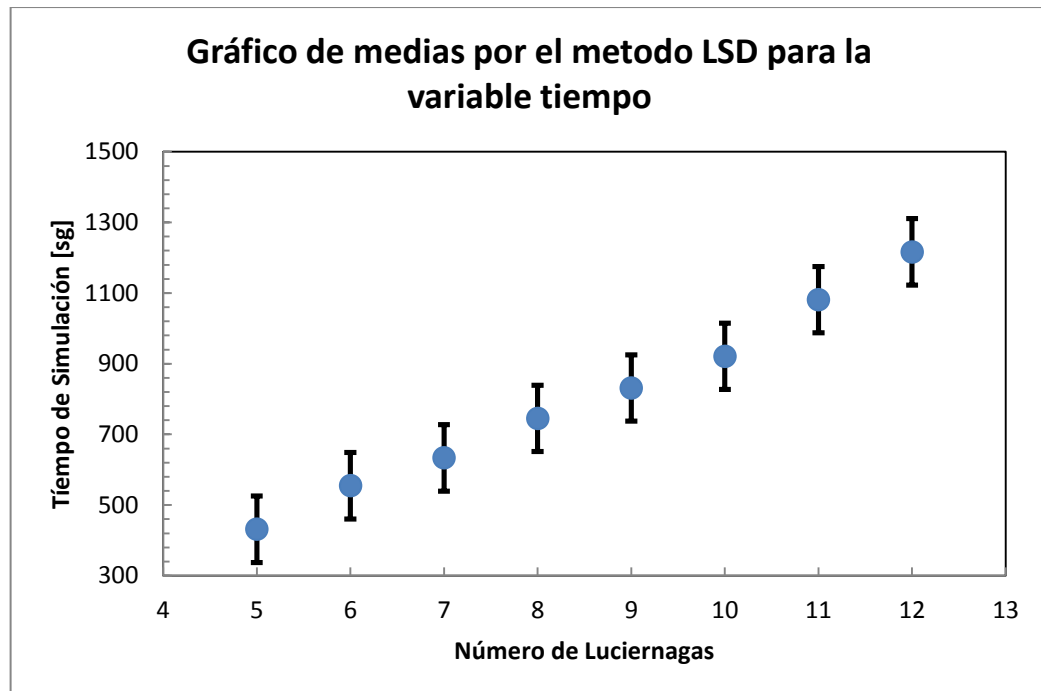
Para mejor claridad, se construye los gráficos de medias por el método LSD para las variables costo y tiempo, como se observa en las gráficas 2 y 3.

Gráfica 43. Gráfico de medias para la variable costo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Simple



Fuente: Autores

Gráfica 44. Gráfico de medias para la variable Tiempo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Simple



Fuente: Autores

De las gráficas 43 y 44 y de la tabla 6 se concluye que el valor óptimo para el factor “Número de Luciérnagas” es 11, no se escogió 12 porque los valores 11 y 12 de factor “Número de Luciérnagas” generan prácticamente la misma distancia recorrida por la fresa y con respecto al tiempo de simulación, el valor 11 del factor “Número de Luciérnagas” tiene un tiempo de simulación mucho más corto que el valor 12 del factor “Número de Luciérnagas”, ahorrando aproximadamente 135 segundos en el tiempo de simulación, aunque no es mucho, al escoger el valor 11 del factor “Número de Luciérnagas” ayuda en gran medida a reducir el tiempo de simulación, cuando se optimicé el valor del factor “Números de Movimientos”.

**5.1.1.2 Verificación de los supuestos del Análisis de Varianza.** Para que el análisis de varianza tenga validez, este tiene que cumplir con los siguientes requisitos: Normalidad, Homocedasticidad (Varianza Constante) e independencia; es decir que las repuestas de las mediciones tienen que tener una distribución normal, con la misma varianza en cada tratamiento y las medidas deben ser independientes. Se verificó los supuestos solo con los datos de la variable costo, ya que estos son más importantes para la optimización del factor “Número de Luciérnagas” ya que el objetivo principal es reducir la distancia recorrida por la herramienta.

- **Normalidad:** Para verificar la normalidad de los datos de la variable costo, se utilizó la prueba de Shapiro-Wilks, utilizando la siguiente formula:

$$W_o = \frac{1}{(n - 1)S^2} \left[ \sum_{i=1}^k a_i (X_{(n-i+1)} - X_{(i)}) \right]^2$$

Donde  $n$  es el número total de datos,  $S^2$  es la varianza muestral,  $a_i$  son los coeficientes del estadístico Shapiro-Wilks y  $k = n/2$ . Para obtener el supuesto de la normalidad, se ordenaron los datos de la variable costo de mayor a menor como se muestra en la tabla 7.

$W$  es Distribución del estadístico de Shapiro-wilks con el cuantil  $1-\alpha$  donde  $\alpha$  es el factor de confiabilidad del 95% para el contraste de la normalidad. Si  $W_o > W$ , se rechaza la hipótesis nula ( $H_1$ ), es decir que los datos no cumplen con una distribución normal; si  $W_o < W$ , se acepta la hipótesis nula ( $H_0$ ), es decir que los datos cumplen con una distribución normal.

Tabla 7. Verificación de la Normalidad de los datos del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Simple

TEST SHAPIRO-WILK PARA NORMALIDAD				
Orden de los datos de mayor a menor	i	X(n-i+1)-X(i)	Coficiente del estadístico a(i)	a(i)*[X(n-i+1)-X(i)]
423,1372	1	81,0084	0,3964	32,11172976
420,1359	2	78,507	0,2737	21,4873659
415,8792	3	75,5061	0,2368	17,87984448
412,8202	4	73,9491	0,2098	15,51452118
412,202	5	75,584	0,1878	14,1946752
389,8505	6	54,3489	0,1691	9,19039899
388,407	7	53,3947	0,1526	8,14803122
383,9549	8	49,0568	0,1376	6,75021568
376,8805	9	42,2813	0,1237	5,23019681
375,838	10	42,2317	0,1108	4,67927236
366,6038	11	34,4399	0,0986	3,39577414
364,9163	12	34,1973	0,087	2,9751651
364,7593	13	38,9681	0,0759	2,95767879
362,1119	14	36,5258	0,0651	2,37782958
360,178	15	35,2526	0,0546	1,92479196
353,4678	16	28,6735	0,0444	1,2731034
351,7818	17	28,1653	0,0343	0,96606979
348,5966	18	26,3802	0,0244	0,64367688
347,0225	19	25,5623	0,0146	0,37320958
345,257	20	24,0193	0,0049	0,11769457
342,1288	Total			152,1912454
341,6289				
340,3731				
338,8711				
336,618				
335,5016				
335,0123				
334,8981				
334,5992				
333,6063				
332,1639				
330,719				
325,7912				
325,5861				
324,9254				
324,7943				
323,6165				
322,2164				
321,4602				
321,2377				

<b>Varianza Muestral</b>	925,3551387
--------------------------	-------------

$$W_0 = \frac{1}{(n-1)S^2} \left[ \sum_{i=1}^k a_i (X_{(n-i+1)} - X_{(i)}) \right]^2 = \frac{1}{(40-1)925,355} [152,191]^2 = 0,642$$

<b>Factor de confiabilidad <math>\alpha</math></b>	0,05
--	------

<b>W(1-<math>\alpha</math>;n) (shapiro-Wilks tabla)</b>	0,987
---	-------

Fuente: Autores

De la tabla 7 se concluye que  $W_o < W$ , aceptando la hipótesis nula ( $H_o$ ), es decir que los datos de la variable costo tienen una distribución normal con una confiabilidad del 95%.

- **Homocedasticidad (Varianza Constante):** Para verificar la Homocedasticidad de los datos de la variable costo, se utilizó la prueba de Prueba de Bartlett, utilizando la siguiente formula:

$$X_o^2 = \frac{\left[ \text{Ln} \left( \frac{\sum S^2(n-1)}{\sum(n-1)} \right) \sum(n-1) \right] - \sum \text{Ln} S^2(n-1)}{1 + \frac{K+1}{3(K-1)(N-K)}}$$

Donde  $S^2$  es la varianza muestral de los tratamientos, n es el número de réplicas por tratamiento, k es el número de tratamientos por factor y N es el número total de datos.

$X^2$  es la distribución del estadístico ji-cuadrada con  $k - 1$  grados de libertad con una con una significancia del 0,05 ( $\alpha=5\%$ ). Si  $X_o^2 > X^2$ , se rechaza la hipótesis nula ( $H_1$ ), es decir que no hay homocedasticidad en los datos; si  $X_o^2 < X^2$ , se acepta la hipótesis nula ( $H_o$ ), es decir que hay homocedasticidad en los datos.

Los datos de la variable costo para el supuesto de la homocedasticidad se representan en la tabla 8.

Tabla 8. Verificación de la Homocedasticidad de los datos del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Simple

PRUEBA DE BARTLETT PARA HOMOCEASTICIDAD DE VARIANZAS					
Factor "Número de Luciérnagas"	n	n-1	S <sup>2</sup>	S <sup>2</sup> *(n-1)	LN(S <sup>2</sup> )*(n-1)
5	5	4	22,278	89,111	12,414
6	5	4	41,455	165,818	14,898
7	5	4	6,490	25,959	7,481
8	5	4	11,382	45,529	9,728
9	5	4	7,097	28,386	7,838
10	5	4	1,187	4,746	0,684
11	5	4	14,182	56,728	10,608
12	5	4	3,995	15,981	5,540
<b>Total</b>		<b>32</b>		<b>432,259</b>	<b>69,193</b>

<b>N</b>	40
<b>K</b>	8

$$X_o^2 = \frac{\left[ \text{Ln} \left( \frac{\sum S^2(n-1)}{\sum(n-1)} \right) \sum(n-1) \right] - \sum \text{Ln} S^2(n-1)}{1 + \frac{K+1}{3(K-1)(N-K)}} = \frac{\left[ \text{Ln} \left( \frac{432,259}{32} \right) 32 \right] - 69,193}{1 + \frac{8+1}{3(8-1)(40-8)}} = 13,926$$

<b>Factor de Confiabilidad α</b>	0,05
----------------------------------	------

<b>X<sup>2</sup>(α,k-1)</b>	14,067
-----------------------------	--------

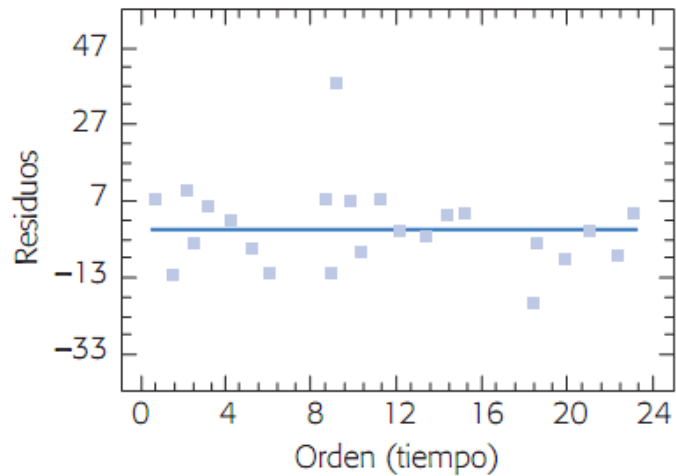
Fuente: Autores

De la tabla 8 se concluye que  $X_o^2 < X^2$ , aceptando la hipótesis nula (Ho), es decir que los datos de la variable costo tiene varianza constante con una confiabilidad del 95%.

- **Independencia:** Para verificar la Independencia de los datos de la variable costo, se utilizó el método gráfico, este supuesto puede verificarse si se grafica en el eje X el orden en que se obtuvo los datos y en el eje Y los residuo de cada dato. Si los puntos se presentan de forma aleatoria como se puede observar en la gráfica 45 los datos son independientes unos de otros, cumpliendo el supuesto; si los puntos presentan una correlación o tendencia, como se observa en la gráfica

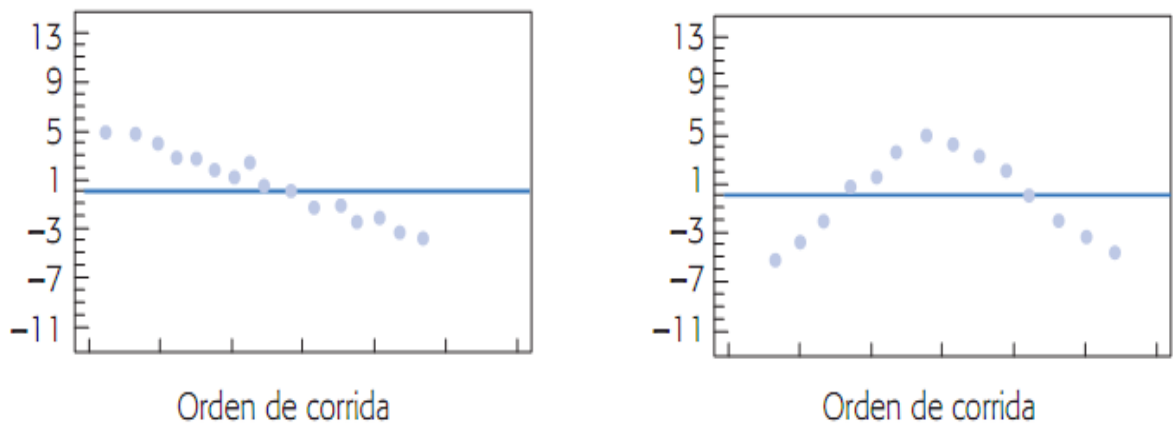
46, los datos presentan un tendencia dependiente entre ellos y no se cumple el supuesto.

Gráfica 45. Ejemplo de una gráfica donde se cumple el supuesto de independencia



Fuente: GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y VARA SALAZAR, Román de la. Análisis y diseño de Experimentos. 2 ed. México: McGraw-Hill, 2008. p. 90.

Gráfica 46. Ejemplo de una gráfica donde no se cumple el supuesto de independencia



Fuente: Ibíd., p. 86.

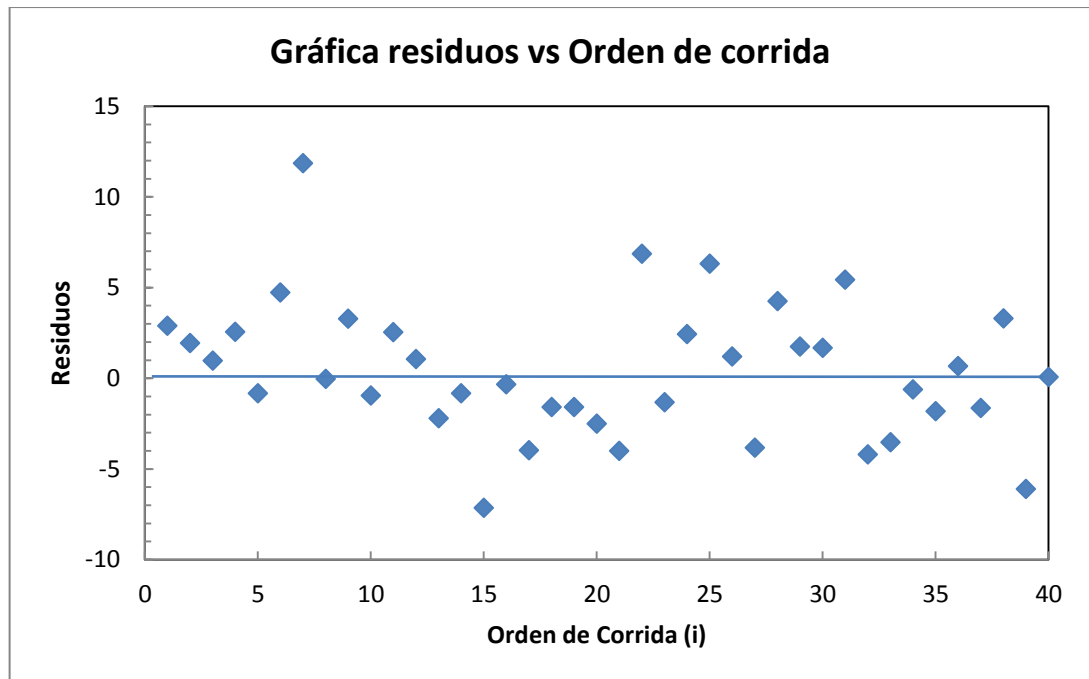
Los residuos de la variable costo se obtiene de la diferencia entre la respuesta observada (datos de la variable costo) y la respuesta predicha por el modelo (promedio de los tratamientos). Como se observa en la tabla 9.

Tabla 9. Datos para la gráfica de Independencia del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Simple

Orden de Corrida (i)	Factor "Número de Luciérnagas"	Orden de obtención de los datos	Promedio de los tratamientos	Residuos
1	7	366,6038	363,71386	2,88994
2	9	341,6289	339,7007	1,9282
3	6	383,9549	382,98618	0,96872
4	8	351,7818	349,22514	2,55666
5	12	322,2164	323,05894	-0,84254
6	11	332,1639	327,4432	4,7207
7	5	428,686	416,8349	11,8511
8	10	334,8981	334,93878	-0,04068
9	11	330,719	327,4432	3,2758
10	5	415,8792	416,8349	-0,9557
11	12	325,5861	323,05894	2,52716
12	7	364,7593	363,71386	1,04544
13	8	347,0225	349,22514	-2,20264
14	9	338,8711	339,7007	-0,8296
15	6	375,838	382,98618	-7,14818
16	10	334,5992	334,93878	-0,33958
17	8	345,257	349,22514	-3,96814
18	12	321,4602	323,05894	-1,59874
19	7	362,1119	363,71386	-1,60196
20	11	324,9254	327,4432	-2,5178
21	5	412,8202	416,8349	-4,0147
22	6	389,8505	382,98618	6,86432
23	10	333,6063	334,93878	-1,33248
24	9	342,1288	339,7007	2,4281
25	5	423,1372	416,8349	6,3023
26	7	364,9163	363,71386	1,20244
27	11	323,6165	327,4432	-3,8267
28	8	353,4678	349,22514	4,24266
29	12	324,7943	323,05894	1,73536
30	10	336,618	334,93878	1,67922
31	6	388,407	382,98618	5,42082
32	9	335,5016	339,7007	-4,1991
33	7	360,178	363,71386	-3,53586
34	8	348,5966	349,22514	-0,62854
35	12	321,2377	323,05894	-1,82124
36	9	340,3731	339,7007	0,6724
37	11	325,7912	327,4432	-1,652
38	5	420,1359	416,8349	3,301
39	6	376,8805	382,98618	-6,10568
40	10	335,0123	334,93878	0,07352

Fuente: Autores

Gráfica 47. Verificación de la Independencia de los datos del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Simple



Fuente: Autores

De la gráfica 47 se puede concluir que los datos no tienen ningún patrón o tendencia, es decir que los datos de la variable costo son independientes entre sí.

**5.1.2 Parametrización del Factor “Número de Movimientos”.** Para parametrizar el número de movimientos, se hace del mismo modo que se parametrizó el número de luciérnagas; se fija el número de luciérnagas = 11 que fue el parámetro óptimo del análisis de varianza anterior, de igual modo se fija un número de iteraciones = 2000. Por experiencia de los autores con respecto al algoritmo, los 8 valores de los tratamientos con los que trabajó el factor “Número de Movimientos” es: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40.

En la tabla 10 se puede observar los resultados del diseño experimental aplicados para el factor “Número de Movimientos”.

Tabla 10. Resultados del diseño experimental de para el factor “Número de Movimientos” cavidad simple

TRIÁNGULO (CAVIDAD SIMPLE)							
ALGORITMO LUCIÉRNAGA							
Número de Movimientos	Parámetros a Optimizar	Número de Replicas					Promedio de los tratamientos
		1	2	3	4	5	
5	Distancia [Pulg]	383,408	377,787	380,382	379,062	380,704	380,269
	Tiempo [Sg]	648,141	727,500	610,172	671,735	695,922	670,694
10	Distancia [Pulg]	331,293	333,358	332,829	330,514	332,212	332,041
	Tiempo [Sg]	1105,020	1051,700	1086,630	1078,660	1060,200	1076,442
15	Distancia [Pulg]	318,682	319,036	320,437	318,825	321,736	319,743
	Tiempo [Sg]	1264,640	1365,840	1347,630	1273,060	1330,880	1316,410
20	Distancia [Pulg]	312,179	313,995	314,546	313,833	314,598	313,830
	Tiempo [Sg]	1685,140	1751,950	1761,420	1779,750	1764,840	1748,620
25	Distancia [Pulg]	314,350	312,760	312,420	313,274	312,023	312,965
	Tiempo [Sg]	2002,480	2041,270	1794,750	1958,510	1871,310	1933,664
30	Distancia [Pulg]	313,396	312,760	312,280	311,821	312,280	312,507
	Tiempo [Sg]	2320,750	2268,860	1982,640	2258,450	1982,640	2162,668
35	Distancia [Pulg]	313,711	313,620	310,891	315,501	310,891	312,923
	Tiempo [Sg]	2731,810	2729,880	2555,810	2637,890	2555,810	2642,240
40	Distancia [Pulg]	311,882	312,876	311,882	313,161	312,479	312,456
	Tiempo [Sg]	2956,270	2733,240	2936,780	2529,590	2876,170	2806,410

Fuente: Autores

En la tabla 10 se puede ver claramente la diferencia del promedio de los tratamientos tanto para el costo como el tiempo de simulación para el factor “Número de Movimientos”, por lo consiguiente, los valores del factor “Número de Movimientos” afectan la respuesta del costo y el tiempo de simulación como se observa en el análisis de varianza.

**5.1.2.1 Análisis de Varianza para el Costo y Tiempo de simulación.** En la tabla 11 y 12 se observa el análisis de varianza con respecto a la respuesta costo y tiempo.

Tabla 11. Análisis de varianza para el costo del factor “Número de Movimientos” cavidad simple

Variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Estadístico de Prueba Fo	Valor crítico de la Prueba de Fisher (F) con un 95% de confiabilidad
Tratamientos	$SC_{Trat} = 19296,877$	$K-1 = 8-1 = 7$	$CM_{Trat} = \frac{SC_{Trat}}{(K-1)} = \frac{19296,877}{7} = 2756,697$	$\frac{CM_{Trat}}{CM_E} = 1582,49$	2,313
Error	$SC_E = SC_T - SC_{Trat} = 55,74$	$N-K = 40-8 = 32$	$CM_E = \frac{SC_E}{(N-K)} = \frac{55,74}{32} = 1,742$		
total	$SC_T = 19352,617$	$N-1 = 39$			

Fuente: Autores

Tabla 12. Análisis de varianza para el tiempo del factor “Número de Movimientos” cavidad simple

Variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Estadístico de Prueba Fo	Valor crítico de la Prueba de Fisher (F) con un 95% de confiabilidad
Tratamientos	$SC_{Trat} = 19533806,628$	$K-1 = 8-1 = 7$	$CM_{Trat} = \frac{SC_{Trat}}{(K-1)} = \frac{19533806,628}{7} = 2790543,804$	$\frac{CM_{Trat}}{CM_E} = 269,939$	2,313
Error	$SC_E = SC_T - SC_{Trat} = 330805,84$	$N-K = 40-8 = 32$	$CM_E = \frac{SC_E}{(N-K)} = \frac{330805,84}{32} = 10337,683$		
total	$SC_T = 19864612,468$	$N-1 = 39$			

Fuente: Autores

A partir de los resultados obtenidos de las tablas 11 y 12, se concluye que con una confiabilidad del 95%,  $F_o > F$ , es decir que se rechaza la hipótesis nula tanto para la respuesta costo como el tiempo, es decir que al menos dos valores del factor “Número de Movimientos” afecta la respuesta del costo y del tiempo. Por lo consiguiente, se procede a aplicar el método LSD.

$$LSD_{costo} = 2,037 \sqrt{\frac{2 \cdot (1,742)}{5}} = 1,7$$

$$LSD_{tiempo} = 2,037 \sqrt{\frac{2 \cdot (10337,683)}{5}} = 130,988$$

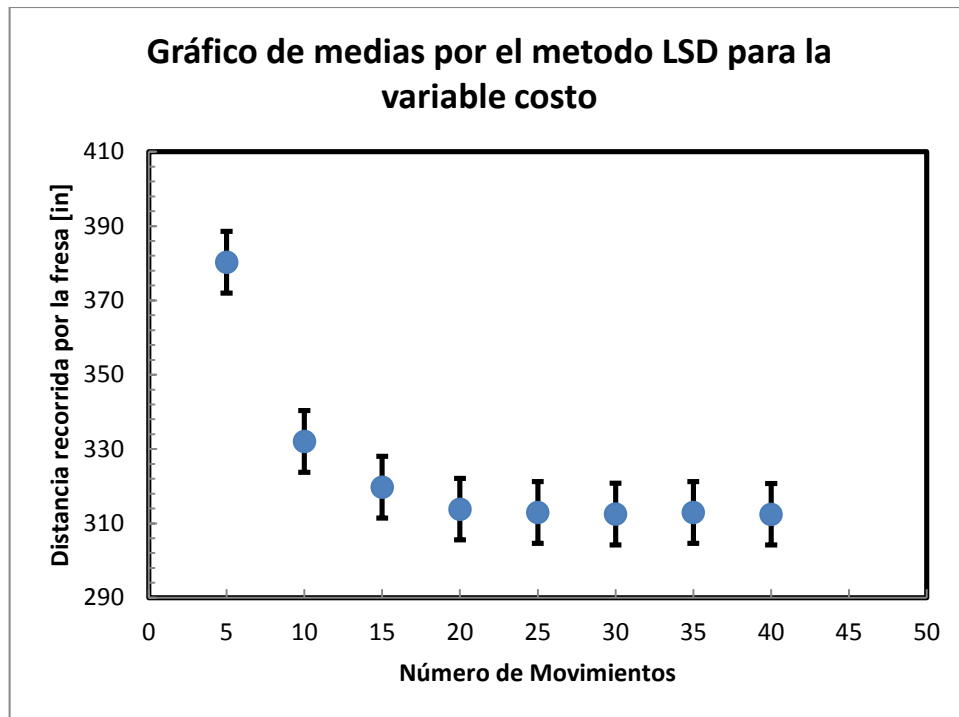
Los resultados de la diferencia mínima significativa, se puede observar en la tabla 13 y en las gráficas 48 y 49.

Tabla 13. Aplicación de la prueba LSD al factor “Número de Movimientos” cavidad simple

Costo			Tiempo		
Comparación entre Movimientos	$ \bar{X}_i - \bar{X}_j $	Hipótesis	Comparación entre Movimientos	$ \bar{X}_i - \bar{X}_j $	Hipótesis
Mov=5 - Mov=10	48,22758	H1	Mov=5 - Mov=10	405,748	H1
Mov=5 - Mov=15	60,5255	H1	Mov=5 - Mov=15	645,716	H1
Mov=5 - Mov=20	66,43828	H1	Mov=5 - Mov=20	1077,926	H1
Mov=5 - Mov=25	67,30322	H1	Mov=5 - Mov=25	1262,97	H1
Mov=5 - Mov=30	67,76146	H1	Mov=5 - Mov=30	1491,974	H1
Mov=5 - Mov=35	67,34586	H1	Mov=5 - Mov=35	1971,546	H1
Mov=5 - Mov=40	67,81268	H1	Mov=5 - Mov=40	2135,716	H1
Mov=10 - Mov=15	12,29792	H1	Mov=10 - Mov=15	239,968	H1
Mov=10 - Mov=20	18,2107	H1	Mov=10 - Mov=20	672,178	H1
Mov=10 - Mov=25	19,07564	H1	Mov=10 - Mov=25	857,222	H1
Mov=10 - Mov=30	19,53388	H1	Mov=10 - Mov=30	1086,226	H1
Mov=10 - Mov=35	19,11828	H1	Mov=10 - Mov=35	1565,798	H1
Mov=10 - Mov=40	19,5851	H1	Mov=10 - Mov=40	1729,968	H1
Mov=15 - Mov=20	5,91278	H1	Mov=15 - Mov=20	432,21	H1
Mov=15 - Mov=25	6,77772	H1	Mov=15 - Mov=25	617,254	H1
Mov=15 - Mov=30	7,23596	H1	Mov=15 - Mov=30	846,258	H1
Mov=15 - Mov=35	6,82036	H1	Mov=15 - Mov=35	1325,83	H1
Mov=15 - Mov=40	7,28718	H1	Mov=15 - Mov=40	1490	H1
Mov=20 - Mov=25	0,86494	Ho	Mov=20 - Mov=25	185,044	H1
Mov=20 - Mov=30	1,32318	Ho	Mov=20 - Mov=30	414,048	H1
Mov=20 - Mov=35	0,90758	Ho	Mov=20 - Mov=35	893,62	H1
Mov=20 - Mov=40	1,3744	Ho	Mov=20 - Mov=40	1057,79	H1
Mov=25 - Mov=30	0,45824	Ho	Mov=25 - Mov=30	229,004	H1
Mov=25 - Mov=35	0,04264	Ho	Mov=25 - Mov=35	708,576	H1
Mov=25 - Mov=40	0,50946	Ho	Mov=25 - Mov=40	872,746	H1
Mov=30 - Mov=35	0,4156	Ho	Mov=30 - Mov=35	479,572	H1
Mov=30 - Mov=40	0,05122	Ho	Mov=30 - Mov=40	643,742	H1
Mov=35 - Mov=40	0,46682	Ho	Mov=35 - Mov=40	164,17	H1

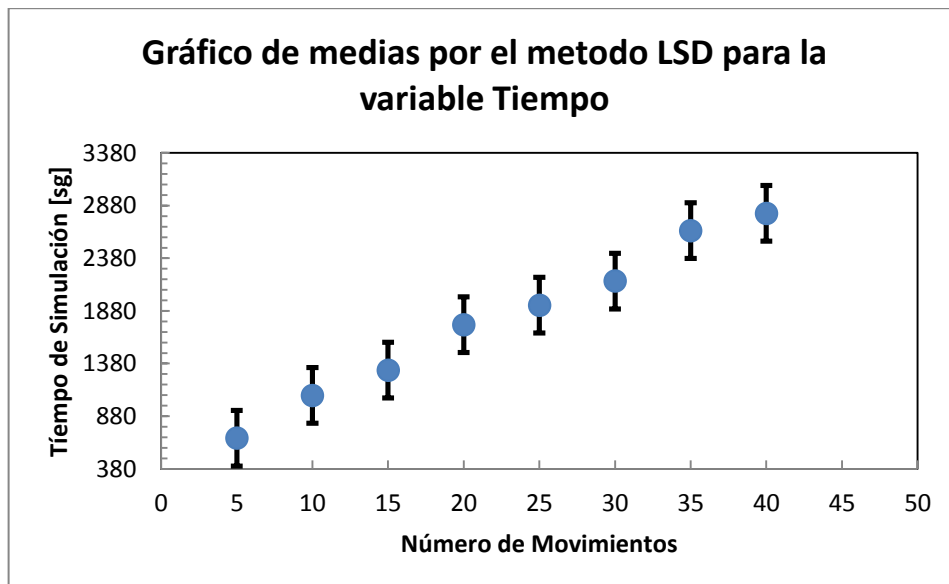
Fuente: Autores

Gráfica 48. Gráfico de medias para la variable costo del factor “Número de Movimientos” cavidad Simple



Fuente: Autores

Gráfica 49. Gráfico de medias para la variable Tiempo del factor “Número de Movimientos” cavidad Simple



Fuente: Autores

De la tabla 13 y de las gráficas 48 y 49 se concluye que con una confiabilidad del 95% que los valores del factor “Número de Movimientos” que no tienen una diferencia significativa con respecto a la respuesta costo son: 20, 25, 30, 35 y 40, es decir que si se usa cualquiera de estos dos valores, la respuesta costo va a hacer prácticamente igual. Para repuesta del tiempo, todos los valores tienen una diferencia significativa, por lo tanto, usando cualquiera de los valores del factor “Número de Luciérnagas”, afecta la respuesta del tiempo.

Se concluye que el valor óptimo para el factor “Número de Movimientos” es 20, ya que este valor genera una mínima trayectoria de fresado con respecto a los valores de 5, 10 y 15, y con un óptimo tiempo de simulación con respecto a los valores de 25, 30, 35 y 40.

#### **5.1.2.2 Verificación de los supuestos del Análisis de Varianza**

- **Normalidad:** El supuesto de la normalidad de la variable costo para el factor “Número de Movimientos” se muestra en la tabla 14, y se concluye que  $W_o < W$ , aceptando la hipótesis nula ( $H_o$ ), es decir que los datos de la variable costo tienen una distribución normal con una confiabilidad del 95%.

Tabla 14. Verificación de la Normalidad de los datos del factor “Número de Movimientos” cavidad Simple

TEST SHAPIRO-WILK PARA NORMALIDAD				
Orden de los datos de mayor a menor	i	X(n-i+1)-X(i)	Coefficiente del estadístico a(i)	a(i)*[X(n-i+1)-X(i)]
383,4084	1	69,5754	0,3964	27,57968856
380,7036	2	66,9925	0,2737	18,33584725
380,3816	3	66,7618	0,2368	15,80919424
379,0621	4	65,6663	0,2098	13,77678974
377,7872	5	64,5134	0,1878	12,11561652
333,3575	6	20,197	0,1691	3,4153127
332,829	7	19,9528	0,1526	3,04479728
332,212	8	19,4523	0,1376	2,67663648
331,293	9	18,5333	0,1237	2,29256921
330,5135	10	18,0349	0,1108	1,99826692
321,736	11	9,3157	0,0986	0,91852802
320,4372	12	8,1575	0,087	0,7097025
319,0357	13	6,756	0,0759	0,5127804
318,8246	14	6,6459	0,0651	0,43264809
318,6819	15	6,6592	0,0546	0,36359232
315,5005	16	3,6184	0,0444	0,16065696
314,5984	17	2,7163	0,0343	0,09316909
314,546	18	2,7253	0,0244	0,06649732
314,3503	19	3,4592	0,0146	0,05050432
313,9954	20	3,1043	0,0049	0,01521107
313,833	<b>Total</b>			104,368009
313,7111				
313,6198				
313,3958	<b>Varianza Muestral S<sup>2</sup></b>	496,2209369		
313,2738				
313,1605				
312,8762				
312,7597				
312,7597				
312,4786				
312,4203				
312,2797	<b>Factor de confiabilidad α</b>	0,05		
312,2797				
312,1787				
312,0227				
311,8821	<b>W(1-α;n) (shapiro-Wilks tabla)</b>	0,987		
311,8821				
311,8207				
310,8911				
310,8911				

$$W_o = \frac{1}{(n-1)S^2} \left[ \sum_{i=1}^k a_i (X_{(n-i+1)} - X_{(i)}) \right]^2 = \frac{1}{(40-1)496,221} [104,368]^2 = 0,563$$

Fuente: Autores

- **Homocedasticidad (Varianza Constante):** Los datos de la variable costo para el supuesto de la homocedasticidad se representan en la tabla 15 y se concluye que  $X_0^2 < X^2$ , aceptando la hipótesis nula (Ho), es decir que los datos de la variable costo tiene varianza constante con una confiabilidad del 95%.

Tabla 15. Verificación de la Homocedasticidad de los datos del factor “Número de Movimientos” cavidad Simple

PRUEBA DE BARTLETT PARA HOMOCEASTICIDAD DE VARIANZAS					
Factor "Número de Movimientos"	n	n-1	S <sup>2</sup>	S <sup>2</sup> *(n-1)	LN(S <sup>2</sup> )*(n-1)
5	5	4	4,418	17,673	5,943
10	5	4	1,319	5,276	1,108
15	5	4	1,731	6,924	2,195
20	5	4	0,964	3,857	-0,145
25	5	4	0,810	3,241	-0,841
30	5	4	0,357	1,428	-4,120
35	5	4	4,002	16,007	5,547
40	5	4	0,333	1,332	-4,398
Total		32		55,739	5,288

N	40
K	8

$$X_0^2 = \frac{\left[ \frac{\sum S^2(n-1)}{\sum(n-1)} \right] \sum(n-1) - \sum LnS^2(n-1)}{1 + \frac{K+1}{3(K-1)(N-K)}} = \frac{\left[ \frac{55,739}{32} \right] 32 - 5,288}{1 + \frac{8+1}{3(8-1)(40-8)}} = 12,305$$

Factor de Confiabilidad $\alpha$	0,05
----------------------------------	------

$X^2(\alpha, k-1)$	14,067
--------------------	--------

Fuente: Autores

- **Independencia:** Los residuos de la variable costo para la verificación de la independencia de los datos se muestran en la tabla 16.

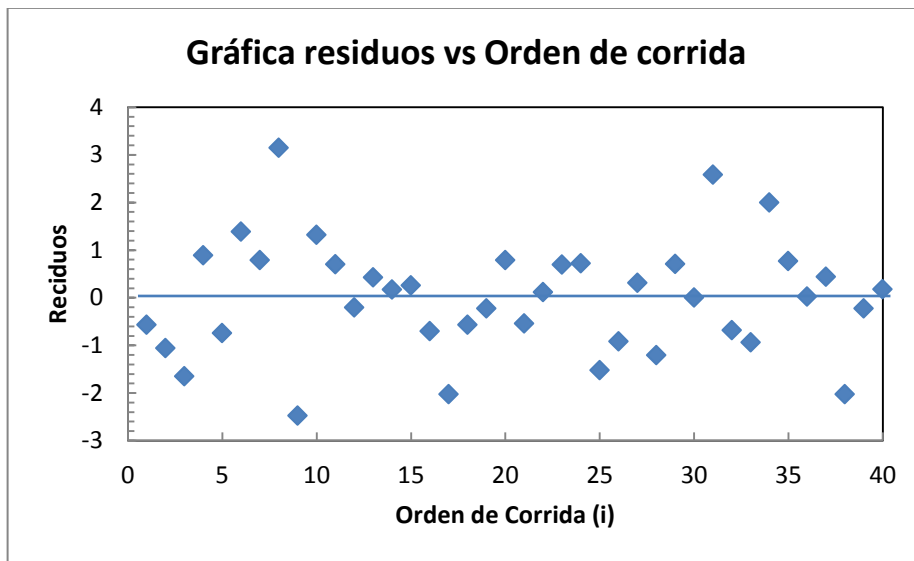
Tabla 16. Datos para la gráfica de Independencia del factor “Número de Movimientos” cavidad Simple

Orden de Corrida (i)	Factor “Número de Movimientos”	Orden de obtención de los datos	Promedio de los tratamientos	Residuos
1	40	311,8821	312,4559	-0,5738
2	15	318,6819	319,74308	-1,06118
3	20	312,1787	313,8303	-1,6516
4	30	313,3958	312,50712	0,88868
5	10	331,293	332,041	-0,748
6	25	314,3503	312,96536	1,38494
7	35	313,7111	312,92272	0,78838
8	5	383,4084	380,26858	3,13982
9	5	377,7872	380,26858	-2,48138
10	10	333,3575	332,041	1,3165
11	35	313,6198	312,92272	0,69708
12	25	312,7597	312,96536	-0,20566
13	40	312,8762	312,4559	0,4203
14	20	313,9954	313,8303	0,1651
15	30	312,7597	312,50712	0,25258
16	15	319,0357	319,74308	-0,70738
17	35	310,8911	312,92272	-2,03162
18	40	311,8821	312,4559	-0,5738
19	30	312,2797	312,50712	-0,22742
20	10	332,829	332,041	0,788
21	25	312,4203	312,96536	-0,54506
22	5	380,3816	380,26858	0,11302
23	15	320,4372	319,74308	0,69412
24	20	314,546	313,8303	0,7157
25	10	330,5135	332,041	-1,5275
26	15	318,8246	319,74308	-0,91848
27	25	313,2738	312,96536	0,30844
28	5	379,0621	380,26858	-1,20648
29	40	313,1605	312,4559	0,7046
30	20	313,833	313,8303	0,0027
31	35	315,5005	312,92272	2,57778
32	30	311,8207	312,50712	-0,68642
33	25	312,0227	312,96536	-0,94266
34	15	321,736	319,74308	1,99292
35	20	314,5984	313,8303	0,7681
36	40	312,4786	312,4559	0,0227
37	5	380,7036	380,26858	0,43502
38	35	310,8911	312,92272	-2,03162
39	30	312,2797	312,50712	-0,22742
40	10	332,212	332,041	0,171

Fuente: Autores

De la gráfica 50 se puede concluir que los datos no tienen ningún patrón o tendencia, es decir que los datos de la variable costo son independientes entre sí.

Gráfica 50. Verificación de la Independencia de los datos del factor “Número de Movimientos” cavidad Simple

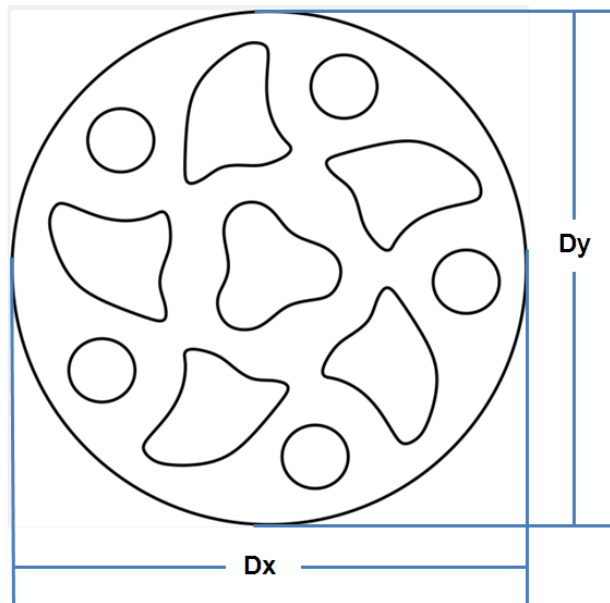


Fuente: Autores

## 5.2 AJUSTES DE LOS PARÁMETROS PARA LA OPCIÓN DE CAVIDAD COMPLEJA

Para el ajuste de los parámetros de la cavidad Compleja, se tomó una cavidad en forma de círculo con 11 islas en su interior que tiene formas irregulares como se muestra en la gráfica 51.

Gráfica 51. Cavity circular con 11 islas para el ajuste de los parámetros de la cavity compleja



Fuente: Autores

Se usaron los siguientes parámetros para la obtención del número de puntos maquinables en la pieza:

- Diámetro de la fresa =  $3/8$ "
- Distancia entre puntos =  $0,24$ " (superposición = 36%)
- $Dx = 14$ ";  $Dy = 14$ "
- Número de puntos maquinables = 1196

**5.2.1 Parametrización del factor "número de luciérnagas".** Para parametrizar el número de luciérnagas, se fijó el número de movimientos = 11 con un número de iteraciones = 6000 por criterio de los autores. Del mismo modo, por experiencia de los autores con respecto al algoritmo, los 8 valores de los tratamientos con los que trabajó el factor "Número de Luciérnagas" son los mismos que se aplicaron a la cavidad simple, que son: 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12.

En la tabla 17 se puede observar los resultados del diseño experimental aplicados para el factor “Número de Luciérnagas”.

Tabla 17. Resultados del diseño experimental de para el factor “Número de Luciérnagas” cavidad compleja

PIEZA 11 ISLAS (CAVIDAD COMPLEJA)							
ALGORITMO LUCIÉRNAGA							
Número de Luciérnagas	Parámetros a Optimizar	Número de Replicas					Promedio de los tratamientos
		1	2	3	4	5	
5	Distancia [Pulg]	388,909	382,037	385,064	382,037	381,636	383,937
	Tiempo [Sg]	977,938	1178,000	1059,660	1178,140	1037,770	1086,302
6	Distancia [Pulg]	359,181	360,023	358,256	357,935	356,625	358,404
	Tiempo [Sg]	1237,170	1269,530	1269,730	1280,980	1228,050	1257,092
7	Distancia [Pulg]	341,217	338,026	347,096	345,574	341,488	342,680
	Tiempo [Sg]	1453,690	1391,800	1432,560	1492,160	1310,610	1416,164
8	Distancia [Pulg]	324,087	327,008	327,008	326,155	332,498	327,351
	Tiempo [Sg]	1749,190	1855,340	1918,270	1902,260	1954,450	1875,902
9	Distancia [Pulg]	327,846	323,608	323,455	327,846	322,183	324,987
	Tiempo [Sg]	2125,700	2211,860	2255,250	2000,160	2023,140	2123,222
10	Distancia [Pulg]	313,842	317,670	315,416	317,102	313,842	315,574
	Tiempo [Sg]	2581,390	2468,330	2574,420	2500,130	2607,170	2546,288
11	Distancia [Pulg]	314,577	309,799	315,697	312,465	312,066	312,921
	Tiempo [Sg]	2771,800	2967,110	2828,500	2935,920	2907,720	2882,210
12	Distancia [Pulg]	308,976	308,976	308,281	307,609	308,911	308,551
	Tiempo [Sg]	3175,310	3076,380	3069,270	3308,030	3277,660	3181,330

Fuente: Autores

En la tabla 17 se puede ver claramente la diferencia del promedio de los tratamientos tanto para el costo como el tiempo de simulación para el factor “Número de Luciérnagas”, por lo consiguiente, los valores del factor “Número de Luciérnagas” afectan la respuesta del costo y el tiempo de simulación como se observa en el análisis de varianza.

**5.2.1.1 Análisis de Varianza para el Costo y Tiempo de simulación.** En la tabla 18 y 19 se observa el análisis de varianza con respecto a la respuesta costo y tiempo.

Tabla 18. Análisis de varianza para el costo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad compleja

Variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Estadístico de Prueba Fo	Valor crítico de la Prueba de Fisher (F) con un 95% de confiabilidad
Tratamientos	$SC_{Trat} = 23603,914$	$K-1 = 8-1 = 7$	$CM_{Trat} = \frac{SC_{Trat}}{(K-1)} = 3371,988$	$\frac{CM_{Trat}}{CM_E} = 537,283$	2,313
Error	$SC_E = SC_T - SC_{Trat} = 200,839$	$N-K = 40-8 = 32$	$CM_E = \frac{SC_E}{(N-K)} = 6,276$		
total	$SC_T = 23804,753$	$N-1 = 39$			

Fuente: Autores

Tabla 19. Análisis de varianza para el tiempo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad compleja

Variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Estadístico de Prueba Fo	Valor crítico de la Prueba de Fisher (F) con un 95% de confiabilidad
Tratamientos	$SC_{Trat} = 21067481,14$	$K-1 = 8-1 = 7$	$CM_{Trat} = \frac{SC_{Trat}}{(K-1)} = 3009640,163$	$\frac{CM_{Trat}}{CM_E} = 443,298$	2,313
Error	$SC_E = SC_T - SC_{Trat} = 217254,31$	$N-K = 40-8 = 32$	$CM_E = \frac{SC_E}{(N-K)} = 6789,197$		
total	$SC_T = 21284735,45$	$N-1 = 39$			

Fuente: Autores

A partir de los resultados obtenidos de las tablas 18 y 19, se concluye que con una confiabilidad del 95%,  $F_o > F$ , es decir que se rechaza la hipótesis nula tanto para la respuesta costo como el tiempo, es decir que al menos dos valores del factor “Número de Luciérnagas” afecta la respuesta del costo y del tiempo. Por lo consiguiente, se procede a aplicar el método LSD.

$$LSD_{costo} = 2,037 \sqrt{\frac{2 \cdot (627,6)}{5}} = 3,227$$

$$LSD_{tiempo} = 2,037 \sqrt{\frac{2 \cdot (6789,197)}{5}} = 106,152$$

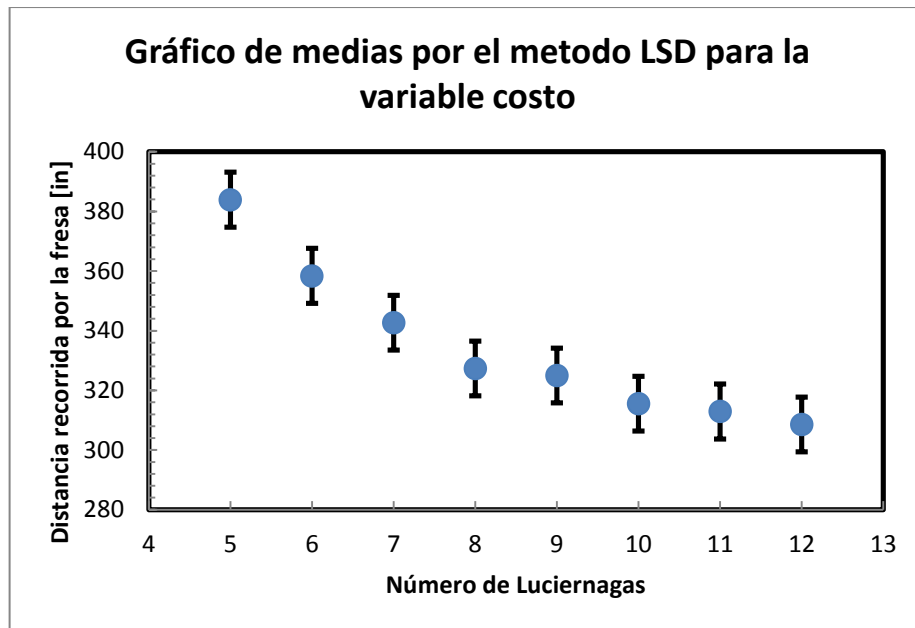
Los resultados de la diferencia mínima significativa, se puede observar en la tabla 20 y en las gráficas 52 y 53.

Tabla 20. Aplicación de la prueba LSD al factor “Número de Luciérnagas” cavidad compleja

Costo			Tiempo		
Comparación entre Luciérnagas	$ \bar{X}_i - \bar{X}_j $	Hipótesis	Comparación entre Luciérnagas	$ \bar{X}_i - \bar{X}_j $	Hipótesis
Luc=5 - Luc=6	25,53264	H1	Luc=5 - Luc=6	170,7904	H1
Luc=5 - Luc=7	41,25666	H1	Luc=5 - Luc=7	329,8624	H1
Luc=5 - Luc=8	56,58546	H1	Luc=5 - Luc=8	789,6004	H1
Luc=5 - Luc=9	58,94924	H1	Luc=5 - Luc=9	1036,9204	H1
Luc=5 - Luc=10	68,36218	H1	Luc=5 - Luc=10	1459,9864	H1
Luc=5 - Luc=11	71,01576	H1	Luc=5 - Luc=11	1795,9084	H1
Luc=5 - Luc=12	75,38614	H1	Luc=5 - Luc=12	2095,0284	H1
Luc=6 - Luc=7	15,72402	H1	Luc=6 - Luc=7	159,072	H1
Luc=6 - Luc=8	31,05282	H1	Luc=6 - Luc=8	618,81	H1
Luc=6 - Luc=9	33,4166	H1	Luc=6 - Luc=9	866,13	H1
Luc=6 - Luc=10	42,82954	H1	Luc=6 - Luc=10	1289,196	H1
Luc=6 - Luc=11	45,48312	H1	Luc=6 - Luc=11	1625,118	H1
Luc=6 - Luc=12	49,8535	H1	Luc=6 - Luc=12	1924,238	H1
Luc=7 - Luc=8	15,3288	H1	Luc=7 - Luc=8	459,738	H1
Luc=7 - Luc=9	17,69258	H1	Luc=7 - Luc=9	707,058	H1
Luc=7 - Luc=10	27,10552	H1	Luc=7 - Luc=10	1130,124	H1
Luc=7 - Luc=11	29,7591	H1	Luc=7 - Luc=11	1466,046	H1
Luc=7 - Luc=12	34,12948	H1	Luc=7 - Luc=12	1765,166	H1
Luc=8 - Luc=9	2,36378	Ho	Luc=8 - Luc=9	247,32	H1
Luc=8 - Luc=10	11,77672	H1	Luc=8 - Luc=10	670,386	H1
Luc=8 - Luc=11	14,4303	H1	Luc=8 - Luc=11	1006,308	H1
Luc=8 - Luc=12	18,80068	H1	Luc=8 - Luc=12	1305,428	H1
Luc=9 - Luc=10	9,41294	H1	Luc=9 - Luc=10	423,066	H1
Luc=9 - Luc=11	12,06652	H1	Luc=9 - Luc=11	758,988	H1
Luc=9 - Luc=12	16,4369	H1	Luc=9 - Luc=12	1058,108	H1
Luc=10 - Luc=11	2,65358	Ho	Luc=10 - Luc=11	335,922	H1
Luc=10 - Luc=12	7,02396	H1	Luc=10 - Luc=12	635,042	H1
Luc=11 - Luc=12	4,37038	H1	Luc=11 - Luc=12	299,12	H1

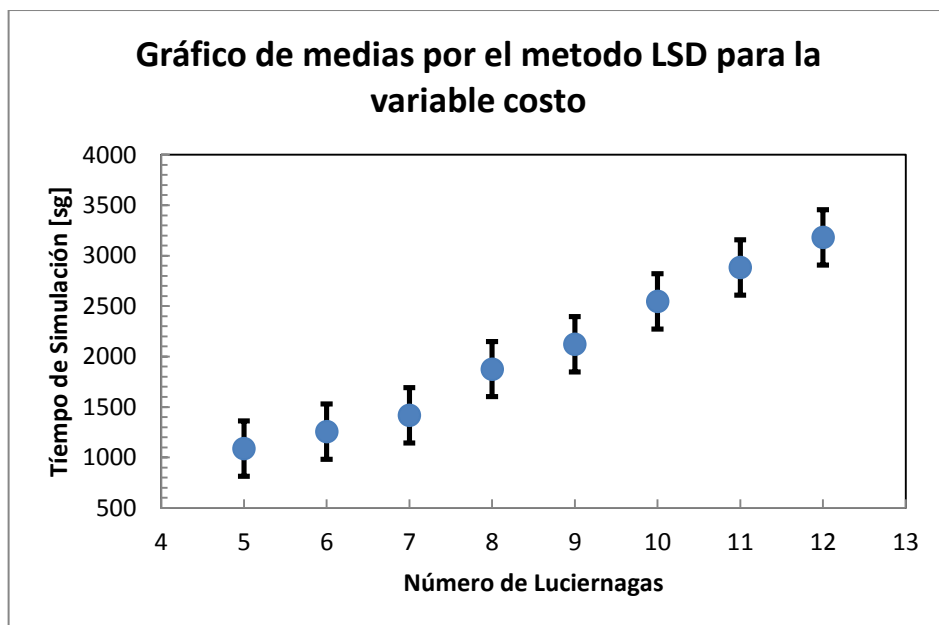
Fuente: Autores

Gráfica 52. Gráfico de medias para la variable costo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Compleja



Fuente: Autores

Gráfica 53. Gráfico de medias para la variable tiempo del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Compleja



Fuente: Autores

De la tabla 20 y de las gráficas 52 y 53 se concluye que con una confiabilidad del 95% que los valores del factor “Número de Luciérnagas” que no tienen una diferencia significativa con respecto a la respuesta costo son: 8 y 9; 10 y 11 es decir que si se usa los valores de 8 y 9, la respuesta costo va a hacer prácticamente igual, lo mismo pasa si se usa 10 y 11. Para repuesta del tiempo, todos los valores tienen una diferencia significativa, por lo tanto, usando cualquiera de los valores del factor “Número de Luciérnagas”, afecta la respuesta del tiempo.

Se concluye que el valor óptimo para el factor “Número de Luciérnagas” es 10, aunque la mínima distancia recorrida por la fresa se genera con el valor de 12, no se escogió debido a que el tiempo de simulación es muy grande, el tiempo de simulación que se ahorra al escoger el valor de 10 y no de 12 es aproximadamente 635 segundos, es decir se ahorra 10 minutos y 35 segundos en la simulación del algoritmo, y la diferencia de la distancia recorrida por la fresa entre el valor de 10 y 12 es de tan solo 7 pulgadas. Al escoger 10, ayuda en gran medida a reducir el tiempo de simulación, cuando se optimicé el valor del factor “Números de Movimientos”.

#### **5.2.1.2 Verificación de los supuestos del Análisis de Varianza**

- **Normalidad:** El supuesto de la normalidad de la variable costo para el factor “Número de Luciérnagas” se muestra en la tabla 21, y se concluye que  $W_o < W$ , aceptando la hipótesis nula ( $H_o$ ), es decir que los datos de la variable costo tienen una distribución normal con una confiabilidad del 95%.

Tabla 21. Verificación de la Normalidad de los datos del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Compleja

TEST SHAPIRO-WILK PARA NORMALIDAD				
Orden de los datos de mayor a menor	i	X(n-i+1)-X(i)	Coficiente del estadístico a(i)	a(i)*[X(n-i+1)-X(i)]
388,9086	1	62,7536	0,3964	24,87552704
385,0639	2	60,977	0,2737	16,6894049
382,0373	3	58,4293	0,2368	13,83605824
382,0373	4	58,5823	0,2098	12,29056654
381,6361	5	59,4536	0,1878	11,16538608
360,023	6	42,3527	0,1691	7,16184157
359,181	7	42,0791	0,1526	6,42127066
358,256	8	42,559	0,1376	5,8561184
357,935	9	42,519	0,1237	5,2596003
356,625	10	42,0478	0,1108	4,65889624
347,0956	11	33,2535	0,0986	3,2787951
345,5738	12	31,7318	0,087	2,7606666
341,4881	13	29,0227	0,0759	2,20282293
341,2168	14	29,1508	0,0651	1,89771708
338,0256	15	28,2268	0,0546	1,54118328
332,4981	16	23,5224	0,0444	1,04439456
327,846	17	18,8703	0,0343	0,64725129
327,8455	18	18,9343	0,0244	0,46199692
327,008	19	18,727	0,0146	0,2734142
327,0079	20	19,399	0,0049	0,0950551
326,155	<b>Total</b>			122,417967
324,0869				
323,608				
323,455				
322,1825				
317,6703				
317,1019				
315,697				
315,416				
314,5772				
313,8421				
313,842				
312,4654				
312,066				
309,7988				
308,9757				
308,9757				
308,9112				
308,281				
307,6089				

<b>Varianza Muestral S<sup>2</sup></b>	610,3782791
--	-------------

$$W_o = \frac{1}{(n-1)S^2} \left[ \sum_{i=1}^k a_i (X_{(n-i+1)} - X_{(i)}) \right]^2 = \frac{1}{(40-1)610,378} [122,418]^2 = 0,629$$
  

<b>Factor de confiabilidad α</b>	0,05
----------------------------------	------

<b>W(1-α;n) (shapiro-Wilks tabla)</b>	0,987
---	-------

Fuente: Autores

- **Homocedasticidad (Varianza Constante):** Los datos de la variable costo para el supuesto de la homocedasticidad se representan en la tabla 22 y se concluye que  $X_o^2 < X^2$ , aceptando la hipótesis nula (Ho), es decir que los datos de la variable costo tiene varianza constante con una confiabilidad del 95%.

Tabla 22. Verificación de la Homocedasticidad de los datos del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Compleja

PRUEBA DE BARTLETT PARA HOMOCEASTICIDAD DE VARIANZAS					
Factor "Número de Luciérnagas"	n	n-1	S^2	S^2*(n-1)	LN(S^2)*(n-1)
5	5	4	9,625	38,499	9,057
6	5	4	1,658	6,632	2,022
7	5	4	13,274	53,097	10,343
8	5	4	9,703	38,813	9,090
9	5	4	7,115	28,459	7,849
10	5	4	3,188	12,753	4,638
11	5	4	5,284	21,136	6,659
12	5	4	0,363	1,451	-4,056
Total		32		200,838	45,602

N	40
K	8

$$X_o^2 = \frac{\left[ \text{Ln} \left( \frac{\sum S^2(n-1)}{\sum(n-1)} \right) \sum(n-1) \right] - \sum \text{Ln} S^2(n-1)}{1 + \frac{K+1}{3(K-1)(N-K)}} = \frac{\left[ \text{Ln} \left( \frac{200,838}{32} \right) 32 \right] - 45,602}{1 + \frac{8+1}{3(8-1)(40-8)}} = 13$$

Factor de Confiabilidad $\alpha$	0,05
----------------------------------	------

$X^2(\alpha, k-1)$	14,067
--------------------	--------

Fuente: Autores

- **Independencia:** Los residuos de la variable costo para la verificación de la independencia de los datos se muestran en la tabla 23.

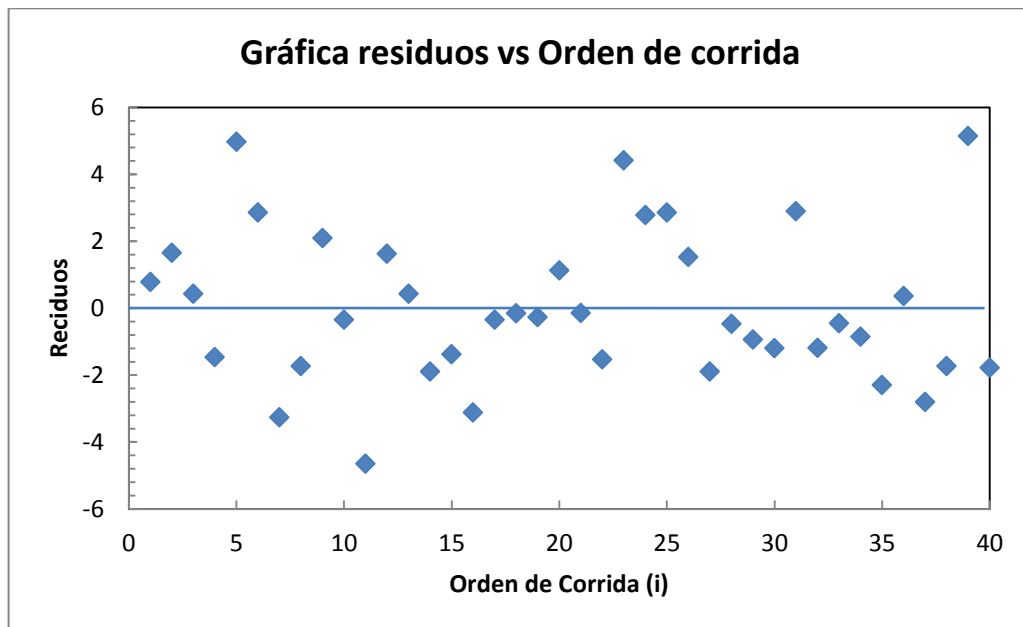
Tabla 23. Datos para la gráfica de Independencia del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Compleja

Orden de Corrida (i)	Factor "Número de Luciérnagas"	Orden de obtención de los datos	Promedio de los tratamientos	Residuos
1	6	359,181	358,404	0,777
2	11	314,5772	312,92088	1,65632
3	12	308,9757	308,5505	0,4252
4	7	341,2168	342,67998	-1,46318
5	5	388,9086	383,93664	4,97196
6	9	327,846	324,9874	2,8586
7	8	324,0869	327,35118	-3,26428
8	10	313,842	315,57446	-1,73246
9	10	317,6703	315,57446	2,09584
10	8	327,008	327,35118	-0,34318
11	7	338,0256	342,67998	-4,65438
12	6	360,023	358,404	1,619
13	12	308,9757	308,5505	0,4252
14	5	382,0373	383,93664	-1,89934
15	9	323,608	324,9874	-1,3794
16	11	309,7988	312,92088	-3,12208
17	8	327,0079	327,35118	-0,34328
18	10	315,416	315,57446	-0,15846
19	12	308,281	308,5505	-0,2695
20	5	385,0639	383,93664	1,12726
21	6	358,256	358,404	-0,148
22	9	323,455	324,9874	-1,5324
23	7	347,0956	342,67998	4,41562
24	11	315,697	312,92088	2,77612
25	9	327,8455	324,9874	2,8581
26	10	317,1019	315,57446	1,52744
27	5	382,0373	383,93664	-1,89934
28	6	357,935	358,404	-0,469
29	12	307,6089	308,5505	-0,9416
30	8	326,155	327,35118	-1,19618
31	7	345,5738	342,67998	2,89382
32	7	341,4881	342,67998	-1,19188
33	11	312,4654	312,92088	-0,45548
34	11	312,066	312,92088	-0,85488
35	5	381,6361	383,93664	-2,30054
36	12	308,9112	308,5505	0,3607
37	9	322,1825	324,9874	-2,8049
38	10	313,8421	315,57446	-1,73236
39	8	332,4981	327,35118	5,14692
40	6	356,625	358,404	-1,779

Fuente: Autores

De la gráfica 54 se puede concluir que los datos no tienen ningún patrón o tendencia, es decir que los datos de la variable costo son independientes entre sí.

Gráfica 54. Verificación de la Independencia de los datos del factor “Número de Luciérnagas” cavidad Compleja



Fuente: Autores

**5.2.2 Parametrización del factor “número de movimientos”.** Para parametrizar el número de movimientos, se hace del mismo modo como se parametrizó el número de luciérnagas; se fija el número de luciérnagas = 10 que fue el parámetro óptimo del análisis de varianza anterior, de igual modo se fija un número de iteraciones = 6000. Por experiencia de los autores con respecto al algoritmo, los 8 valores de los tratamientos con los que trabajó el factor “Número de Movimientos” son los mismos valores que se aplicaron a la cavidad simple que son: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40.

En la tabla 24 se puede observar los resultados del diseño experimental aplicados para el factor “Número de Movimientos”.

Tabla 24. Resultados del diseño experimental de para el factor “Número de Movimientos” cavidad compleja

PIEZA 11 ISLAS (CAVIDAD SIMPLE)							
ALGORITMO LUCIÉRNAGA							
Número de Movimientos	Parámetros a Optimizar	Número de Replicas					Promedio de los tratamientos
		1	2	3	4	5	
5	Distancia [Pulg]	362,935	356,665	364,362	357,098	361,641	360,540
	Tiempo [Sg]	1817,830	1824,780	1773,580	1657,580	1627,760	1740,306
10	Distancia [Pulg]	316,161	323,660	323,194	315,566	319,191	319,554
	Tiempo [Sg]	2377,880	2523,050	2514,970	2449,530	2461,390	2465,364
15	Distancia [Pulg]	309,348	307,110	306,630	305,270	307,468	307,165
	Tiempo [Sg]	3191,750	3006,190	3073,250	3142,270	3136,420	3109,976
20	Distancia [Pulg]	305,538	303,960	303,484	303,404	302,370	303,751
	Tiempo [Sg]	3906,480	3928,640	3925,980	3729,130	3858,440	3869,734
25	Distancia [Pulg]	306,504	303,618	307,019	299,554	303,582	304,055
	Tiempo [Sg]	4720,670	3860,470	4764,990	4933,360	4529,880	4561,874
30	Distancia [Pulg]	303,600	302,370	303,214	299,363	303,661	302,442
	Tiempo [Sg]	5650,940	5548,990	5918,610	5780,840	5617,520	5703,380
35	Distancia [Pulg]	305,692	302,749	303,658	305,588	302,749	304,087
	Tiempo [Sg]	6370,690	5369,440	6123,500	6212,630	5317,880	5878,828
40	Distancia [Pulg]	307,556	305,615	302,728	304,977	307,556	305,687
	Tiempo [Sg]	6525,770	6863,560	6772,800	6842,330	6470,690	6695,030

Fuente: Autores

En la tabla 24 se puede ver claramente la diferencia del promedio de los tratamientos tanto para el costo como el tiempo de simulación para el factor “Número de Movimientos”, por lo consiguiente, los valores del factor “Número de Movimientos” afectan la respuesta del costo y el tiempo de simulación como se observa en el análisis de varianza.

**5.2.2.1 Análisis de Varianza para el Costo y Tiempo de simulación.** En la tabla 25 y 26 se observa el análisis de varianza con respecto a la respuesta costo y tiempo.

Tabla 25. Análisis de varianza para el costo del factor “Número de Movimientos” cavidad compleja

Variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Estadístico de Prueba Fo	Valor crítico de la Prueba de Fisher (F) con un 95% de confiabilidad
<b>Tratamientos</b>	$SC_{Trat} = 13728,341$	$K-1 = 8-1 = 7$	$CM_{Trat} = \frac{SC_{Trat}}{(K-1)} = 1961,191$	$\frac{CM_{Trat}}{CM_E} = 324,54$	2,313
<b>Error</b>	$SC_E = SC_T - SC_{Trat} = 193,364$	$N-K = 40-8 = 32$	$CM_E = \frac{SC_E}{(N-K)} = 6,043$		
<b>total</b>	$SC_T = 13921,705$	$N-1 = 39$			

Fuente: Autores

Tabla 26. Análisis de varianza para el tiempo del factor “Número de Movimientos” cavidad compleja

Variaciones	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Estadístico de Prueba Fo	Valor crítico de la Prueba de Fisher (F) con un 95% de confiabilidad
<b>Tratamientos</b>	$SC_{Trat} = 108842513,8$	$K-1 = 8-1 = 7$	$CM_{Trat} = \frac{SC_{Trat}}{(K-1)} = 15548930,54$	$\frac{CM_{Trat}}{CM_E} = 248,52$	2,313
<b>Error</b>	$SC_E = SC_T - SC_{Trat} = 2002129,8$	$N-K = 40-8 = 32$	$CM_E = \frac{SC_E}{(N-K)} = 62566,556$		
<b>total</b>	$SC_T = 110844643,6$	$N-1 = 39$			

Fuente: Autores

A partir de los resultados obtenidos de las tablas 25 y 26, se concluye que con una confiabilidad del 95%,  $F_o > F$ , es decir que se rechaza la hipótesis nula tanto

para la respuesta costo como el tiempo, es decir que al menos dos valores del factor “Número de Movimientos” afecta la respuesta del costo y del tiempo. Por lo consiguiente, se procede a aplicar el método LSD.

$$LSD_{costo} = 2,037 \sqrt{\frac{2 \cdot (6,043)}{5}} = 3,167$$

$$LSD_{tiempo} = 2,037 \sqrt{\frac{2 \cdot (62566,556)}{5}} = 322,25$$

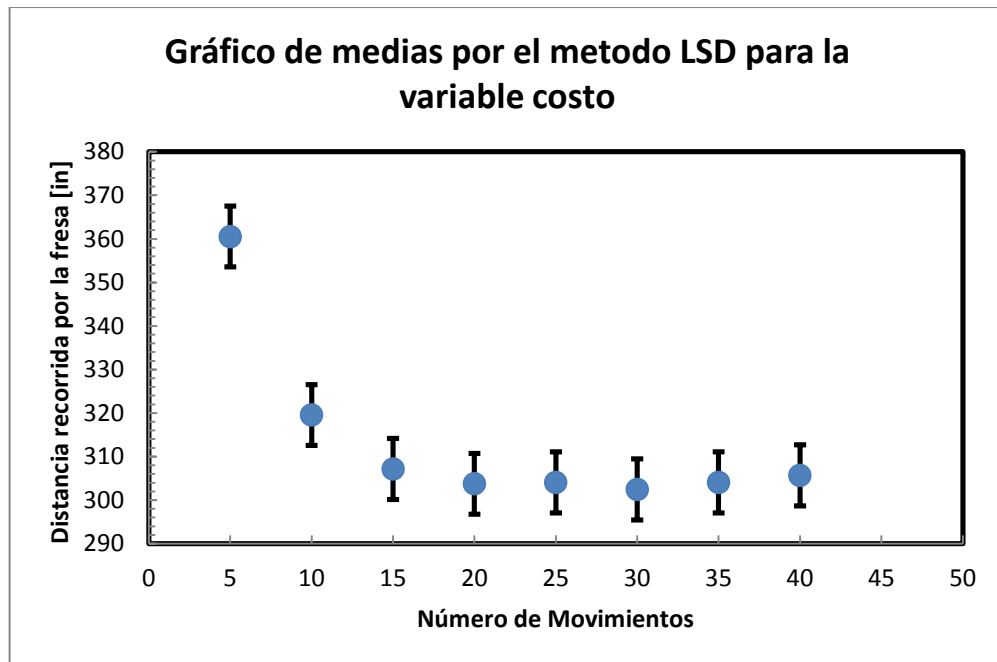
Los resultados de la diferencia mínima significativa, se puede observar en la tabla 27 y en las gráficas 55 y 56.

Tabla 27. Aplicación de la prueba LSD al factor “Número de Movimientos” cavidad Compleja

Costo			Tiempo		
Comparación entre Movimientos	$ \bar{X}_i - \bar{X}_j $	Hipótesis	Comparación entre Movimientos	$ \bar{X}_i - \bar{X}_j $	Hipótesis
Mov=5 - Mov=10	40,9858	H1	Mov=5 - Mov=10	725,058	H1
Mov=5 - Mov=15	53,37504	H1	Mov=5 - Mov=15	1369,67	H1
Mov=5 - Mov=20	56,78884	H1	Mov=5 - Mov=20	2129,428	H1
Mov=5 - Mov=25	56,4847	H1	Mov=5 - Mov=25	2821,568	H1
Mov=5 - Mov=30	58,0984	H1	Mov=5 - Mov=30	3963,074	H1
Mov=5 - Mov=35	56,4529	H1	Mov=5 - Mov=35	4138,522	H1
Mov=5 - Mov=40	54,85358	H1	Mov=5 - Mov=40	4954,724	H1
Mov=10 - Mov=15	12,38924	H1	Mov=10 - Mov=15	644,612	H1
Mov=10 - Mov=20	15,80304	H1	Mov=10 - Mov=20	1404,37	H1
Mov=10 - Mov=25	15,4989	H1	Mov=10 - Mov=25	2096,51	H1
Mov=10 - Mov=30	17,1126	H1	Mov=10 - Mov=30	3238,016	H1
Mov=10 - Mov=35	15,4671	H1	Mov=10 - Mov=35	3413,464	H1
Mov=10 - Mov=40	13,86778	H1	Mov=10 - Mov=40	4229,666	H1
Mov=15 - Mov=20	3,4138	H1	Mov=15 - Mov=20	759,758	H1
Mov=15 - Mov=25	3,10966	Ho	Mov=15 - Mov=25	1451,898	H1
Mov=15 - Mov=30	4,72336	H1	Mov=15 - Mov=30	2593,404	H1
Mov=15 - Mov=35	3,07786	Ho	Mov=15 - Mov=35	2768,852	H1
Mov=15 - Mov=40	1,47854	Ho	Mov=15 - Mov=40	3585,054	H1
Mov=20 - Mov=25	0,30414	Ho	Mov=20 - Mov=25	692,14	H1
Mov=20 - Mov=30	1,30956	Ho	Mov=20 - Mov=30	1833,646	H1
Mov=20 - Mov=35	0,33594	Ho	Mov=20 - Mov=35	2009,094	H1
Mov=20 - Mov=40	1,93526	Ho	Mov=20 - Mov=40	2825,296	H1
Mov=25 - Mov=30	1,6137	Ho	Mov=25 - Mov=30	1141,506	H1
Mov=25 - Mov=35	0,0318	Ho	Mov=25 - Mov=35	1316,954	H1
Mov=25 - Mov=40	1,63112	Ho	Mov=25 - Mov=40	2133,156	H1
Mov=30 - Mov=35	1,6455	Ho	Mov=30 - Mov=35	175,448	Ho
Mov=30 - Mov=40	3,24482	H1	Mov=30 - Mov=40	991,65	H1
Mov=35 - Mov=40	1,59932	Ho	Mov=35 - Mov=40	816,202	H1

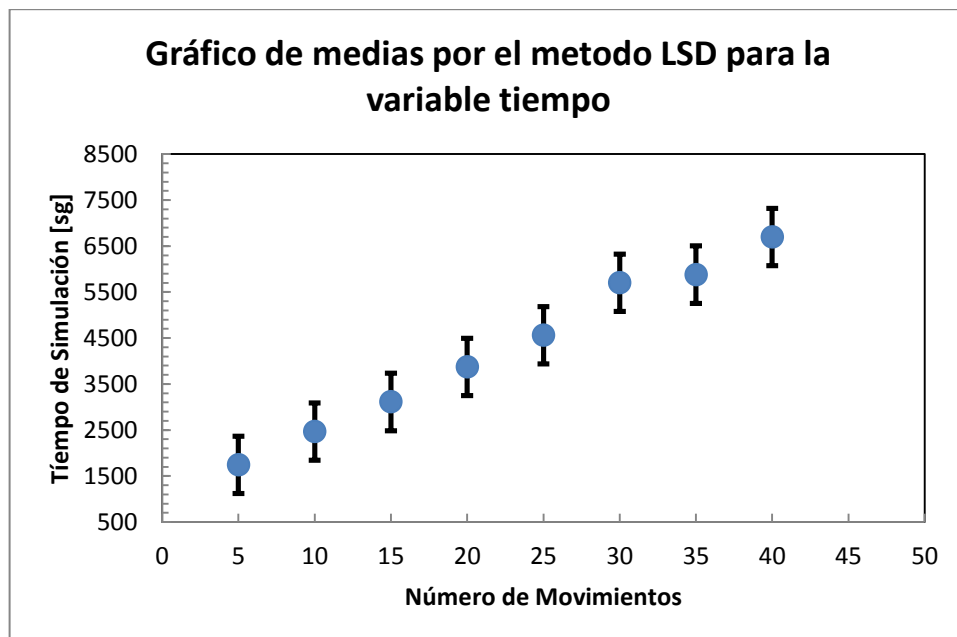
Fuente: Autores

Gráfica 55. Gráfico de medias para la variable costo del factor “Número de Movimientos” cavidad Compleja



Fuente: Autores

Gráfica 56. Gráfico de medias para la variable tiempo del factor “Número de Movimientos” cavidad Compleja



Fuente: Autores

De la tabla 27 y de las gráficas 55 y 56 se puede concluir que con una confiabilidad del 95% que los valores del factor “Número de Movimientos” que no tienen una diferencia significativa con respecto a la respuesta costo son: 15 con 25, 35 y 40; 20 con 25, 30, 35 y 40; 25 con 30, 35 y 40; 30 con 35 y por ultimo 35 con 40. Es decir que la comparación entre estos valores del factor “Número de Movimientos” para la respuesta de la variable costo va a hacer prácticamente igual. Para repuesta del tiempo, los únicos valores que no tienen una diferencia significativa son 30 con 35 y por lo mismo, al usar cualquiera de estos valores, la respuesta de la variable tiempo va a hacer completamente igual.

Se concluye que el valor óptimo para el factor “Número de Movimientos” es 15, aunque la mínima distancia recorrida por la fresa se genera con el valor de 30, no se escogió debido a que el tiempo de simulación es muy grande, el tiempo de simulación que se ahorra al escoger el valor de 15 y no de 30 es aproximadamente 2593 segundos, es decir se ahorra 43 minutos y 13 segundos en la simulación del algoritmo, y la diferencia de la distancia recorrida por la fresa entre el valor de 15 y 30 es de tan solo 4,72 pulgadas.

#### **5.2.2.2 Verificación de los supuestos del Análisis de Varianza**

- **Normalidad:** El supuesto de la normalidad de la variable costo para el factor “Número de Movimientos” se muestra en la tabla 28, y se concluye que  $W_o < W$ , aceptando la hipótesis nula ( $H_o$ ), es decir que los datos de la variable costo tienen una distribución normal con una confiabilidad del 95%.

Tabla 28. Verificación de la Normalidad de los datos del factor “Número de Movimientos” cavidad Compleja

TEST SHAPIRO-WILK PARA NORMALIDAD				
Orden de los datos de mayor a menor	i	X(n-i+1)-X(i)	Coefficiente del estadístico a(i)	a(i)*[X(n-i+1)-X(i)]
364,3615	1	58,7736	0,3964	23,2979
362,9351	2	57,3968	0,2737	15,7095
361,6414	3	56,3719	0,2368	13,3489
357,098	4	52,1011	0,2098	10,9308
356,6648	5	52,7047	0,1878	9,8979
323,6603	6	19,9992	0,1691	3,3819
323,194	7	19,5361	0,1526	2,9812
319,1911	8	15,5728	0,1376	2,1428
316,1606	9	12,5609	0,1237	1,5538
315,566	10	11,9741	0,1108	1,3267
309,3481	11	5,8599	0,0986	0,5778
307,5563	12	4,1523	0,087	0,3613
307,5563	13	4,3419	0,0759	0,3296
307,4675	14	4,7182	0,0651	0,3072
307,1103	15	4,361	0,0546	0,2381
307,0193	16	4,291	0,0444	0,1905
306,6303	17	4,26	0,0343	0,1461
306,504	18	4,1337	0,0244	0,1009
305,692	19	6,1381	0,0146	0,0896
305,6152	20	6,2518	0,0049	0,0306
305,5879	<b>Total</b>			86,943
305,5383				
305,2695				
304,9969				
303,9601				
303,6611				
303,6579				
303,6183				
303,5997				
303,5919				
303,4882				
303,404				
303,2144				
302,7493				
302,7493				
302,7283				
302,3703				
302,3703				
299,5539				
299,3634				

<b>Varianza Muestral S<sup>2</sup></b>	356,951
--	---------

$$W_0 = \frac{1}{(n-1)S^2} \left[ \sum_{i=1}^k a_i (X_{(n-i+1)} - X_{(i)}) \right]^2 = \frac{1}{(40-1)356,951} [86,943]^2 = 0,543$$
  

<b>Factor de confiabilidad α</b>	0,05
----------------------------------	------

<b>W(1-α;n) (shapiro-Wilks tabla)</b>	0,987
---	-------

Fuente: Autores

- **Homocedasticidad (Varianza Constante):** Los datos de la variable costo para el supuesto de la homocedasticidad se representan en la tabla 29 y se concluye que  $X_0^2 < X^2$ , aceptando la hipótesis nula (Ho), es decir que los datos de la variable costo tiene varianza constante con una confiabilidad del 95%.

Tabla 29. Verificación de la Homocedasticidad de los datos del factor “Número de Movimientos” cavidad Compleja

PRUEBA DE BARTLETT PARA HOMOCEASTICIDAD DE VARIANZAS					
Factor "Número de Movimientos"	n	n-1	S <sup>2</sup>	S <sup>2</sup> *(n-1)	LN(S <sup>2</sup> )*(n-1)
5	5	4	12,104	48,417	9,974
10	5	4	14,416	57,663	10,673
15	5	4	2,185	8,739	3,126
20	5	4	1,334	5,336	1,153
25	5	4	8,865	35,459	8,728
30	5	4	3,226	12,906	4,686
35	5	4	2,148	8,592	3,058
40	5	4	4,063	16,252	5,608
<b>Total</b>		<b>32</b>		<b>193,365</b>	<b>47,006</b>

<b>N</b>	40
<b>K</b>	8

$$X_0^2 = \frac{\left[ \text{Ln} \left( \frac{\sum S^2(n-1)}{\sum(n-1)} \right) \sum(n-1) \right] - \sum \text{Ln} S^2(n-1)}{1 + \frac{K+1}{3(K-1)(N-K)}} = \frac{\left[ \text{Ln} \left( \frac{193,365}{32} \right) 32 \right] - 47,006}{1 + \frac{8+1}{3(8-1)(40-8)}} = 10,417$$

<b>Factor de Confiabilidad α</b>	0,05
----------------------------------	------

<b>X<sup>2</sup>(α,k-1)</b>	14,067
-----------------------------	--------

Fuente: Autores

- **Independencia:** Los residuos de la variable costo para la verificación de la independencia de los datos se muestran en la tabla 30.

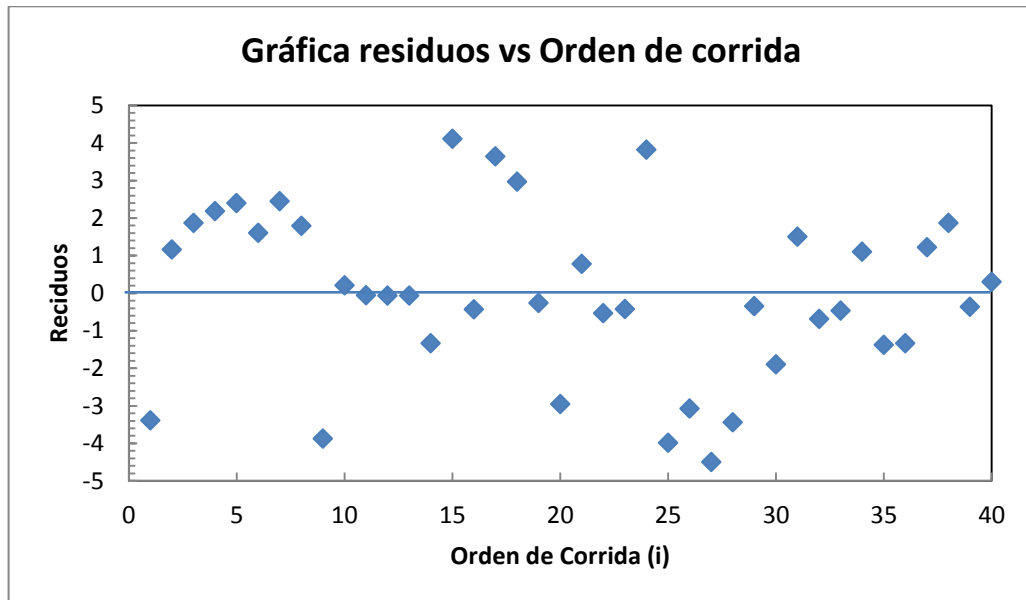
Tabla 30. Datos para la gráfica de Independencia del factor “Número de Movimientos” cavidad Compleja

Orden de Corrida (i)	Factor "Número de Movimientos"	Orden de obtención de los datos	Promedio de los tratamientos	Residuos
1	10	316,1606	319,55438	-3,39378
2	30	303,5997	302,44178	1,15792
3	40	307,5563	305,6866	1,8697
4	15	309,3481	307,16514	2,18296
5	5	362,9351	360,54018	2,39492
6	35	305,692	304,08728	1,60472
7	25	306,504	304,05548	2,44852
8	20	305,5383	303,75134	1,78696
9	5	356,6648	360,54018	-3,87538
10	20	303,9601	303,75134	0,20876
11	15	307,1103	307,16514	-0,05484
12	40	305,6152	305,6866	-0,0714
13	30	302,3703	302,44178	-0,07148
14	35	302,7493	304,08728	-1,33798
15	10	323,6603	319,55438	4,10592
16	25	303,6183	304,05548	-0,43718
17	10	323,194	319,55438	3,63962
18	25	307,0193	304,05548	2,96382
19	20	303,4882	303,75134	-0,26314
20	40	302,7283	305,6866	-2,9583
21	30	303,2144	302,44178	0,77262
22	15	306,6303	307,16514	-0,53484
23	35	303,6579	304,08728	-0,42938
24	5	364,3615	360,54018	3,82132
25	10	315,566	319,55438	-3,98838
26	30	299,3634	302,44178	-3,07838
27	25	299,5539	304,05548	-4,50158
28	5	357,098	360,54018	-3,44218
29	20	303,404	303,75134	-0,34734
30	15	305,2695	307,16514	-1,89564
31	35	305,5879	304,08728	1,50062
32	40	304,9969	305,6866	-0,6897
33	25	303,5919	304,05548	-0,46358
34	5	361,6414	360,54018	1,10122
35	20	302,3703	303,75134	-1,38104
36	35	302,7493	304,08728	-1,33798
37	30	303,6611	302,44178	1,21932
38	40	307,5563	305,6866	1,8697
39	10	319,1911	319,55438	-0,36328
40	15	307,4675	307,16514	0,30236

Fuente: Autores

De la gráfica 57 se puede concluir que los datos no tienen ningún patrón o tendencia, es decir que los datos de la variable costo son independientes entre sí.

Gráfica 57. Verificación de la Independencia de los datos del factor “Número de Movimientos” Cavidad Compleja



Fuente: Autores

### 5.3 RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL ALGORITMO LUCIÉRNAGA

Del ajuste y optimización de los parámetros realizados anteriormente se determinó los valores de los factores “Número de Luciérnagas” y “Número de Movimientos” para cavidades simples y complejas, que están representados en la tabla 31.

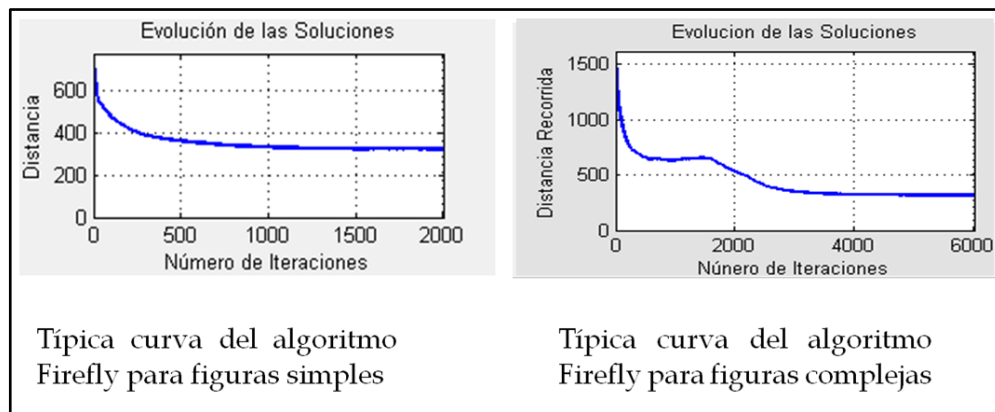
Tabla 31. Parámetros del Algoritmo Luciérnaga

Parámetros para la utilización del algoritmo Luciérnaga	
Cavidad Simple	Cavidad Compleja
Número de Luciérnagas = 11	Número de Luciérnagas = 10
Número de Movimientos = 20	Número de Movimientos = 15
Número de Iteraciones = 2000	Número de Iteraciones = 6000

Fuente: Autores

Cabe destacar que no es necesario hacer un análisis de varianza para el número de iteraciones, ya que este parámetro se escogió debido al comportamiento de las gráficas que se presentan en el proceso del algoritmo que indica la curva distancia vs número de iteraciones. Como se muestra en la gráfica 58.

Gráfica 58. Evolución de las Soluciones



Fuente: Autores

Del mismo modo, en la tabla 32 se puede observar el número de iteraciones necesarias para encontrar la distancia óptima recorrida por la fresa con los parámetros óptimos para las cavidades simple y compleja con 5 réplicas para cada una.

Tabla 32. Resultados parámetros óptimos para la cavidad simple y compleja

TRIÁNGULO (CAVIDAD SIMPLE)				PIEZA 11 ISLAS (CAVIDAD SIMPLE)			
ALGORITMO LUCIÉRNAGA				ALGORITMO LUCIÉRNAGA			
diámetro = 0.375"		# Luciérnagas = 11		diámetro = 0.375"		# Luciérnagas = 10	
Superposición = 36 %		# Movimientos = 20		Superposición = 36 %		# Movimientos = 15	
Dx = 12"		# Iteraciones = 2000		Dx = 14"		# Iteraciones = 6000	
Dy=12"		# Puntos = 1261		Dy=14"		# Puntos = 1196	
# Réplicas	Distancia [Pulg]	iteraciones	Tiempo [Sg]	# Réplicas	Distancia [Pulg]	iteraciones	Tiempo [Sg]
1	312,1787	1879	1685,14	1	309,3481	5997	3191,75
2	313,9954	1990	1751,95	2	307,1103	5362	3006,19
3	314,546	1951	1761,42	3	306,6303	5796	3073,25
4	313,833	1992	1779,75	4	305,2695	5908	3142,27
5	314,5984	1986	1764,84	5	307,4675	6000	3136,42
Promedio	313,8303	1960	1748,62	Promedio	307,16514	5813	3109,976

Fuente: Autores

Como se observa en la tabla 32, el promedio de la iteraciones para la cavidad simple es de 1960 y para la cavidad compleja es de 5813, entonces si se usan menos iteraciones, tanto para la cavidad simple como la compleja, la distancia recorrida por la fresa no sería la óptima y si se usan más iteraciones, el tiempo de simulación aumentaría y la distancia recorrida por la fresa solo disminuiría como máximo 2 pulgadas (experiencia de los autores).

Se debe considerar que los resultados de los parámetros estudiados (Número de luciérnagas y Número de Movimienteos) mediante el ANOVA se realizó con una cantidad de puntos maquinables cercana a 1200 tanto para la figura simple como para la compleja debido a que esta es la máxima cantidad de puntos para la cual fue diseñado el algoritmo Luciérnaga ya que es una cantidad que permite la realización de piezas con cavidades de forma detallada además de fresar espacios estrechos en figuras con demasiadas islas sin excedernos en puntos que serían innecesarios.

Cabe destacar que se observó con satisfacción que a medida que se realizan pruebas con una cantidad de puntos inferior a 1200 el algoritmo Luciérnagas mejora su desempeño considerablemente con los parámetros hallados en el presente análisis de varianza, pero también es importante mencionar que estos parámetros no deben ser tomados como camisa de fuerza, ya que en la medida que se trabaje con este software y diferentes configuración de piezas puede apelar a la experiencia para su sintonización de manera empírica y mejorar los resultados obtenidos hasta ahora, ayudándose de la información y comportamiento que se presenta en la gráfica 58 (Evolución de las soluciones) tanto par piezas simples o complejas el cual debe ser similar al mostrado en cada caso.

## 6. DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE

Este trabajo está dirigido al desarrollo de un software implementando el algoritmo luciérnaga para reducir el recorrido que debe realizar una herramienta de una maquina fresadora en la realización de los procesos de desbaste y acabado de una cavidad, con el fin de que se tengan que utilizar menos herramientas de fresado, se disminuya el tiempo de mecanizado, el tiempo de vuelo de la herramienta y la energía consumida en tal proceso, lo cual permite una disminución en los costos de producción y en el mejoramiento de la calidad del producto haciendo que la Industria Manufacturera se vuelva más competitiva y rentable.

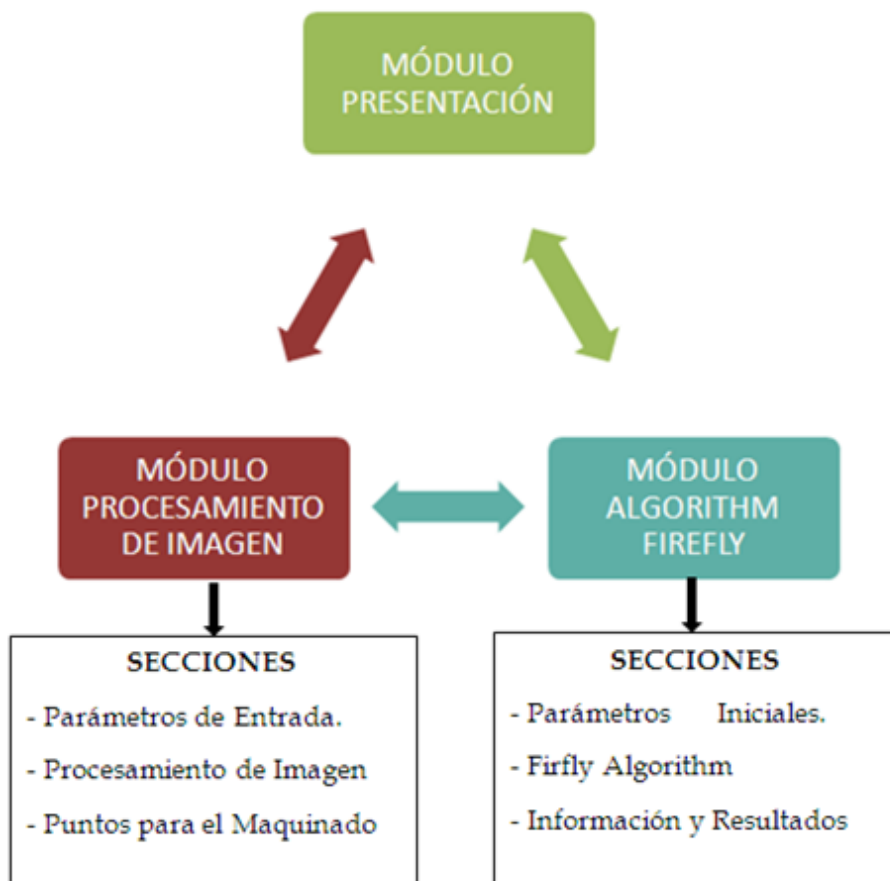
El programa está basado en uno de los último pseudocódigo bio-inspirados propuesto por Xin-She Yang, implementado para nuestra necesidad (optimizar las trayectorias de mecanizado), utilizando el entorno de Matlab® (MATrix LABoratory) debido a que es un programa de amplia aplicación dentro de la Universidad al presentar gran potencia de lenguaje de programación frente a su complejidad, utilizado en gran medida en centros de investigación y desarrollo, además posee la herramienta de interfaz gráfica GUIDE que es un entorno de desarrollo visual de buena calidad que facilita el manejo de los módulos diseñados para en este software.

El software está compuesto apenas de 3 módulos muy intuitivos los cuales son la presentación, el procesamiento de Imagen y el módulo algoritmo Firefly, los dos últimos módulos están divididos en 3 secciones, como se puede apreciar en la gráfica 59.

La primera sección pertenece a todo los datos que deben ser ingresados o seleccionados por el usuario, en la segunda sección se visualiza el procesamiento de la información y la tercera sección pertenece a obtención y visualización de

resultados, es importante que la secuencia de manejo de las secciones se realice en el orden mencionado los cuales el usuario encuentra distribuido en la pantalla de su PC de izquierda a derecha, el suministro o ejecución de información se realiza de arriba hacia abajo en cada sección, cabe destacar que todas las secciones se realimentan entre sí, como se observa en la gráfica 60, pero si algún tipo de información no es suministrada por el usuario en cada sección, el programa esta adecuado de tal manera que se muestre los mensajes pertinentes para que sean identificados los datos que hacen falta y se pueda seguir con el proceso.

Gráfica 59. Estructura de la plataforma software para la optimización de mecanizado de cavidades utilizando el algoritmo luciérnagas “firefly algorithm”



Fuente: Autores

Gráfica 60. Flujo de información de las Secciones en cada Módulo



Fuente: Autores

En el módulo de procesamiento de Imagen, a partir de los datos suministrados, el programa determina las regiones y puntos maquinables tanto para el proceso de Desbaste como para el Acabado en tiempo real.

En el módulo del Algorithm Firefly el cual se alimenta de la información que se obtuvo del procesamiento de Imagen se determina cuál es el recorrido óptimo que debe desempeñar la herramienta de mecanizado y un informe detallado de los resultados recopilados en los dos módulos.

Una de las características más importantes que tiene el programa es que cada módulo tiene un botón de ayuda para que el usuario pueda acceder a la documentación necesaria de uso y manejo de cada uno de los módulos que contiene la plataforma<sup>31</sup>.

---

<sup>31</sup> Esta información es una descripción general del funcionamiento del software. Para mayores detalles ver el Anexo: Manual del Usuario.

## 6.1 USO DEL SOFTWARE

**6.1.1 Módulo de la presentación.** La presentación del programa la cual se muestra en la gráfica 61 se observa una imagen donde se aprecia claramente el logo adoptado por los autores, que hace referencia al algoritmo luciérnaga y el objetivo para el cual se implementó el software, también tiene de manera visible cuatro botones los cuales cumplen las siguientes funciones:

**6.1.1.1 Botón de Ayuda.** Al oprimirlo suministra la información en formato PDF del funcionamiento y Uso del software o Módulo en que se encuentre.

**6.1.1.2 Botón de Procesamiento de Imagen.** Al oprimir este botón, direcciona al usuario hacia el módulo llamado Procesamiento de Imagen, cuyo objetivo es obtener los puntos maquinables de acabado y desbaste resultado de un proceso de reconocimiento de la imagen de una cavidad teniendo en cuenta la geometría de la herramienta fresadora.

**6.1.1.3 Botón de Algorithm Firefly.** Al oprimir este botón direcciona al usuario hacia el módulo llamado Algorithm Firefly, cuyo objetivo es obtener el orden de los puntos coordinados para que la herramienta fresadora realice el maquinado en una ruta de menor distancia posible, pero cabe destacar que en este módulo no se podrá realizar ninguna operación sin antes haber completado el módulo de procesamiento de Imagen, por tal razón se le sugerirá al usuario en éste módulo mediante un mensaje que primero se direcciona y complete la información referente al módulo de procesamiento de Imagen.

**6.1.1.4 Botón Salir.** Al oprimir este botón el usuario cierra el módulo que se encuentra abierto y borrando todo tipo de información que se haya obtenido por tal razón, el programa pregunta que si desea cerrar o continuar en el módulo.

Gráfica 61. Módulo de presentación



Fuente: Autores

Nota: Cabe aclarar que el módulo de presentación puede tardar aproximadamente entre 5 a 15 segundos en aparecer visible para el usuario, dependiendo del computador.

A continuación se explican los módulos de Procesamiento de Imagen y Algoritmo Firefly con información útil para usar la herramienta computacional<sup>32</sup>.

**6.1.2 Módulo de procesamiento de imagen.** El módulo de Procesamiento de Imagen que se muestra en la gráfica 62, se aprecian 3 secciones importantes que son: Parámetros de Entrada, Procesamiento de Imagen y Puntos para el maquinado, el flujo de información se debe realizar por secciones de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo siempre llenando toda la información que se le

<sup>32</sup> Estos pasos son una guía general de uso. Para mayores detalles ver el Anexo: Manual del Usuario.

sea pedida sin excepción, también cuenta como en todos los módulos con el botón de ayuda donde se localiza el manual del usuario que le muestra detalladamente cómo funciona el módulo.

Gráfica 62. Módulo procesamiento de imagen



Fuente: Autores

**6.1.2.1 Sección 1: Parámetros de entrada.** Aquí se encuentra, selecciona o suministra información referente a las unidades de medida con las cuales desea trabajar, las características de la Imagen de la cavidad a procesar, datos geométricos de la herramienta fresadora y una vista previa de cómo queda la configuración de los puntos (Rejilla) de Desbaste.

**6.1.2.2 Sección 2: Procesamiento de imagen.** En esta sección se importan imágenes de cavidades hechas previamente en programas como SolidWork o CorelDraw en un fondo blanco y con líneas negras, se tiene la posibilidad de redimensionamiento de imagen en caso de que no tenga las dimensiones que el

usuario desea, una vez escogida la cavidad se procede a oprimir el botón de procesamiento de imagen en el cual se puede ver en tiempo real los puntos no maquinables (color verde), los puntos maquinables (color azul) y los puntos de acabado (color amarillo), una vez terminado el procesamiento de imagen se activan tres botones que permiten ver en forma más detallada los puntos mencionados anteriormente, cabe destacar que al iniciar este proceso se muestra el % de progreso y el tiempo estimado que dura el procesamiento de imagen, el cual se puede interrumpir en cualquier momento oprimiendo el botón detener.

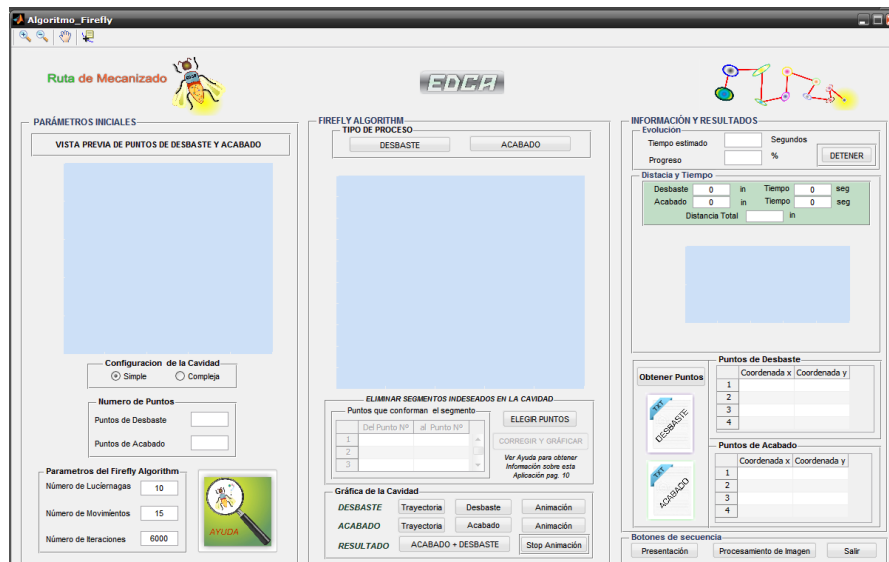
**6.1.2.3 Sección 3: Puntos para el maquinado.** Esta sección cuenta con dos botones, el primero llamado Obtener puntos de la Imagen el cual sirve para una vez realizado el proceso de las secciones 1 y 2 guardar tanto los puntos de acabado y desbaste en las tablas de esta sección, el segundo botón llamado Obtener puntos de Excel, es una opción que tiene el usuario de Importar puntos que no son resultado del módulo de Procesamiento de Imagen.

Al finalizar con éxito la alimentación de las tres secciones mencionadas anteriormente se puede proceder con los botones de secuencia; donde el botón llamado Algoritmo Firefly direcciona al módulo que tiene su mismo nombre, en donde se realiza el proceso de obtención de la ruta optima de mecanizado con los puntos que se encuentran en la tablas de la sección 3, el botón llamado presentación direcciona al usuario al módulo que tiene su mismo nombre y el botón salir que cierra el módulo actual.

**6.1.3 Módulo del Algorithm firefly.** Este módulo que se muestra en la gráfica 63, donde se aprecian 3 secciones importantes que son: Parámetros Iniciales, Firefly Algorithm y Información y Resultados, el flujo de información se debe realizar por secciones de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo siempre llenando toda la información que se le sea pedida sin excepción, también cuenta como en todos los

módulos con el botón de ayuda donde se encuentra el manual del usuario que muestra detalladamente cómo funciona el módulo.

Gráfica 63. Módulo Algorithm firefly



Fuente: Autores

**6.1.3.1 Sección 1: Parámetros iniciales.** En esta sección, el usuario tendrá una vista previa de los puntos de desbaste (color azul) y los puntos de acabado (color verde), en seguida se tendrán que seleccionar si la cavidad es simple<sup>33</sup> o compleja<sup>34</sup>, a continuación se le informa la cantidad de puntos con los cuales dispone la cavidad para la simulación tanto en acabado como en desbaste y finalmente el usuario deberá suministrar los parámetros propios del algoritmo luciérnaga, los cuales fueron nombrados así: Número de luciérnagas, Número de Movimientos y Número de Iteraciones. (Para mayor información ver anexo B. Manual del Usuario).

<sup>33</sup> CAVIDAD SIMPLE: contornos de la cavidad sin demasiadas curvas, con pocas islas (Zonas interiores al contorno que no deben mecanizarse), independiente de los puntos de simulación.

<sup>34</sup> CAVIDAD COMPLEJA: Contornos complicados y puntudos, con muchas islas y demasiados puntos para la simulación (entre 800 y 1200 puntos)

**6.1.3.2 Sección 2: Firefly algorithm.** En esta sección se obtiene la ruta de mecanizado con la menor distancia de recorrido mediante el Algoritmo Luciérnaga, se pueden hacer correcciones de segmentos indeseados o líneas que cortan regiones no maquinables, además de mostrar diferentes tipos de gráficas que muestran el resultado final de la trayectoria de mecanizado.

**6.1.3.3 Sección 3: Información y resultados.** En esta sección se informa el tiempo estimado (tiempo en que el algoritmo luciérnagas puede terminar su proceso) y el progreso porcentual del algoritmo luciérnaga, la distancias de la mejor ruta y el tiempo (segundos) en el cual se encontró, tanto para los procesos de desbaste y acabado. Una vez terminado todo el proceso desarrollado en el presente módulo se muestra en sus respectivas tablas las coordenadas (ordenadas) de los puntos de Desbaste y Acabado y un informe en un documento de formato .txt, que informa el valor de la mejor distancia encontrada, el diámetro con el cual se hizo el maquinado, además de los puntos coordenados de forma ordenada.

## **6.2 REQUERIMIENTOS COMPUTACIONALES**

Para el uso de la herramienta computacional se requiere contar como mínimo con las siguientes herramientas informáticas:

### **6.2.1 Software**

- Matlab R2012a de 32 bits o 62 bits dependiendo de la estructura del PC
- Cualquier programa de diseño y Digitalización de Imágenes los cuales pueden ser SolidWork, CorelDraw (utilizado por los autores de este proyecto), y otros
- Sistema Operativo: Windows XP (utilizada por los autores de este proyecto)

**6.2.2 Hardware.** Los requerimientos de hardware mínimos son los siguientes:

- Procesador Intel Pentium Dual-Core T2060 1.60 GHz o superior.
- Memoria RAM de 1GB o superior
- 100 Mb disponibles de disco duro
- Monitor de 14"

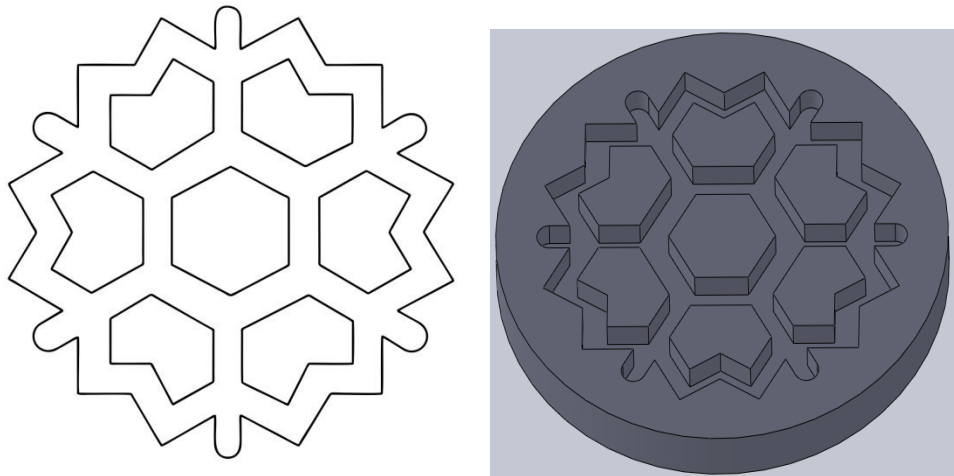
## 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 7.1 LONGITUD Y GRÁFICAS DE TRAYECTORIAS DESCRITAS POR LOS SOFTWARE EDCA Firefly y MASTERCAM X5

En el presente capítulo se determina la longitud de la trayectoria de mecanizado y gráficas del recorrido de la trayectoria de la herramienta fresadora obtenida mediante el software MasterCam y el software EDCA Firefly tanto para los procesos de acabado y desbaste y el resultado final de la realización de los dos procesos, realizando las pruebas con las mismas figuras, dimensiones geométricas y parámetros de corte.

#### 7.1.1 Cavidad 1: Copo de nieve

Gráfica 64. Geometría del Copo de Nieve



Fuente: Autores. Dibujo CorelDraw y SolidWork

**7.1.1.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly.** El software EDCA Firefly está diseñado mediante un algoritmo Metaheurísticos los cuales se caracterizan por ser investigativos, pero que nunca obtienen los mismos resultados en cada prueba como sucede con los algoritmos determinísticos por tal razón se decidió realizar 5 pruebas o replicas para observar la consistencia de los resultados y la mejor distancia total de recorrido. En la tabla 33 se puede observar los parámetros geométricos de la cavidad y la fresa de corte (escogidos por los autores de este proyecto teniendo en cuenta que la cavidad tenga un buen maquinado final) además de los parámetros del algoritmo con los cuales se trabajó para la obtención de la mejor longitud de trayectoria de maquinado (resaltada en verde) para los proceso de acabado y desbaste. Este procedimiento se repita para cada una de cavidades que se analizan de aquí en adelante.

Tabla 33. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para el Copo de Nieve

COPO DE NIEVE (Cavidad compleja)							
Algoritmo Luciérnaga							
Parámetros de la cavidad				Parámetros del Algoritmo			
Diámetro de la Fresa = 3/8" distancia entre puntos = 0,27" tipo de acabado = Rombo Dx = 17,75" Dy = 18"				Puntos de desbaste = 1188 Puntos de acabado = 816 Número de Luciérnagas = 10 Número de Movimientos = 15 Número de Iteraciones = 6000			
Nº de réplicas	Desbaste			Acabado (cavidad simple)			Distancia total (Desbaste + Acabado)
	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	
1	342,135	5829	3059,28	194,5045	1991	928,75	536,64
2	343,27	5562	2971,52	196,0536	1699	665,75	539,324
3	342,028	5984	3108,8	193,8665	1278	502,219	535,895
4	341,6807	5822	3049,72	194,4788	1931	881,813	536,16
5	340,2286	5862	3070,17	207,653	1903	755,375	547,882
6	344,093	4722	2569,41	207,3108	654	331,844	551,404

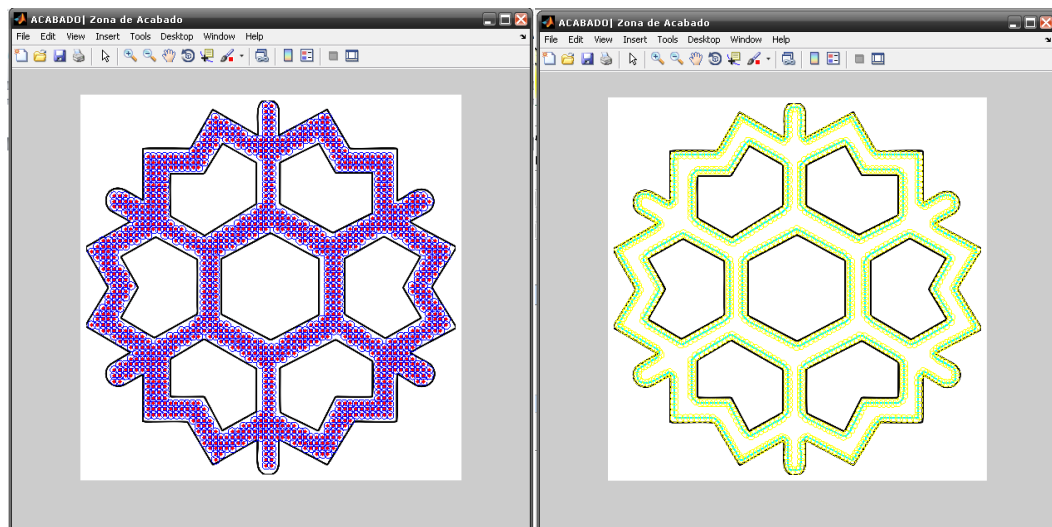
Fuente: Autores.

- **Descripción gráfica de los puntos y trayectoria de maquinado:** A continuación se muestra las gráficas que se obtuvieron de los puntos de maquinado mediante el software EDCA Firefly en el módulo “Procesamiento de Imagen” tanto para los procesos de desbaste y acabado (ver gráfica 65), también se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software EDCA Firefly en el módulo “Algorithm Firefly” tanto para el procesos de desbaste como para el proceso de acabado y finalmente el resultado final del maquinado una vez se han realizado los dos procesos mencionados. Ver gráficas 66, 67 y 68.

Este procedimiento se repita para cada una de cavidades que se analizan de aquí en adelante mediante el software EDCA Firefly.

- **Puntos de desbaste de y acabado resultado del procesamiento de imagen del software EDCA Firefly**

Gráfica 65. Puntos de Maquinado para el Copo de Nieve



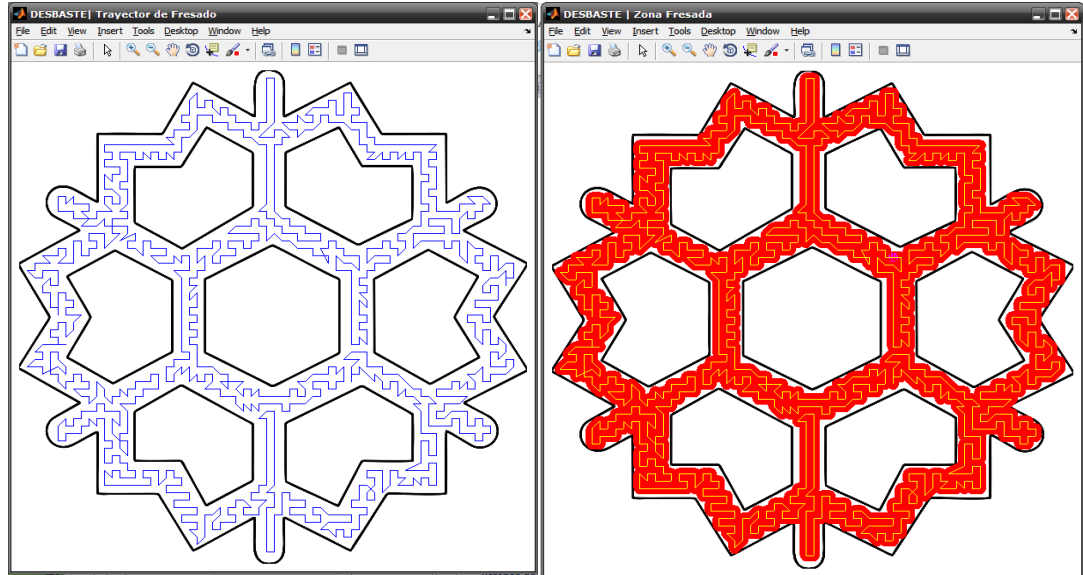
a. Puntos de Desbaste

b. Puntos de Acabado

Fuente: Autores

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 66. Proceso de Desbaste para el Copo de Nieve.



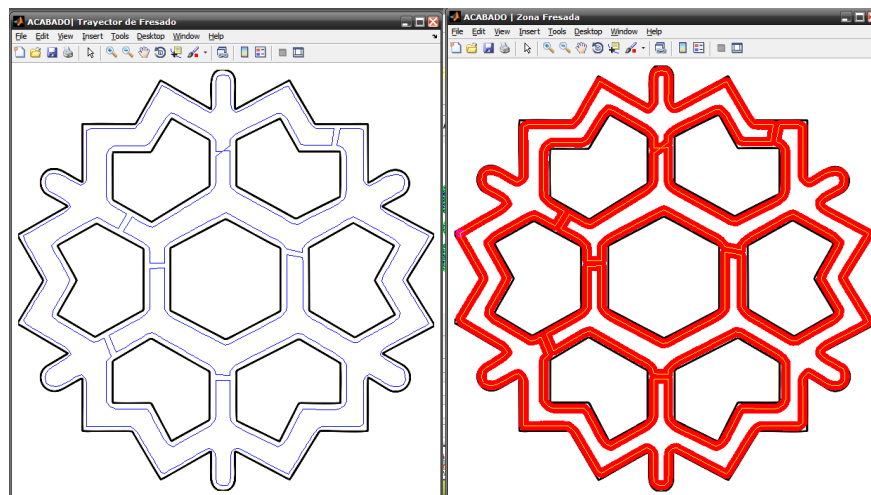
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Autores

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 67. Proceso de Acabado para el Copo de Nieve



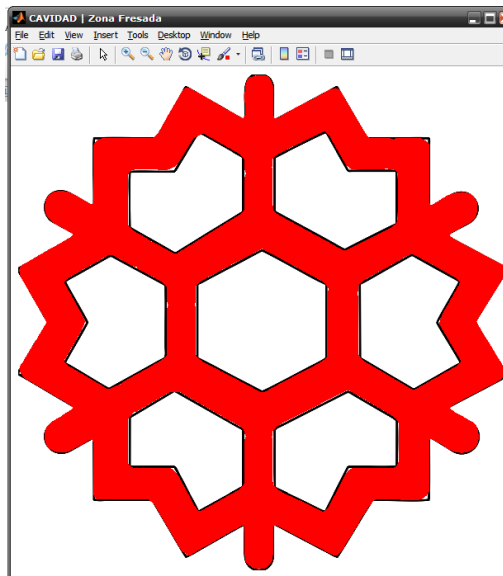
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Autores

- **Cavidad terminada resultado del software EDCA firefly**

Gráfica 68. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Copo de Nieve



Zona Fresada

Fuente: Autores

**7.1.1.2 Trayectorias generadas por MasterCam.** El software MasterCam se pueden generar 8 métodos los cuales son Zigzag, Constant Overlap Spiral, Parallel Spiral, Parallel Spiral Clear Corners, Morph Spiral, High Speed, One Way y True Spiral; con cada uno de ellos se hallan la longitud de la mejor trayectoria de mecanizado para observar cual es la más eficiente (resaltada en color Azul cielo); Ver tabla 34. Este procedimiento se repita para cada una de cavidades que se analizan de aquí en adelante mediante el software MasterCam.

Tabla 34. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para el Copo de Nieve

Distancias en MasterCam [in]			
Método de corte	Distancia desbaste	Distancia acabado	Distancia Total
Zigzag	457,2698	211,1913	668,4611
Constant Overlap Spiral	1637,2058	211,1913	1848,3971
Parallel Spiral	1009,7803	211,1913	1220,9716
Parallel Spiral, Clean Corners	1033,1332	211,1913	1244,3245
Morph Spiral	1939,3209	211,1913	2150,5122
High Speed	2194,6597	211,1913	2405,851
One Way	518,7547	211,1913	729,946
True Spiral	1032,6213	211,1913	1243,8126

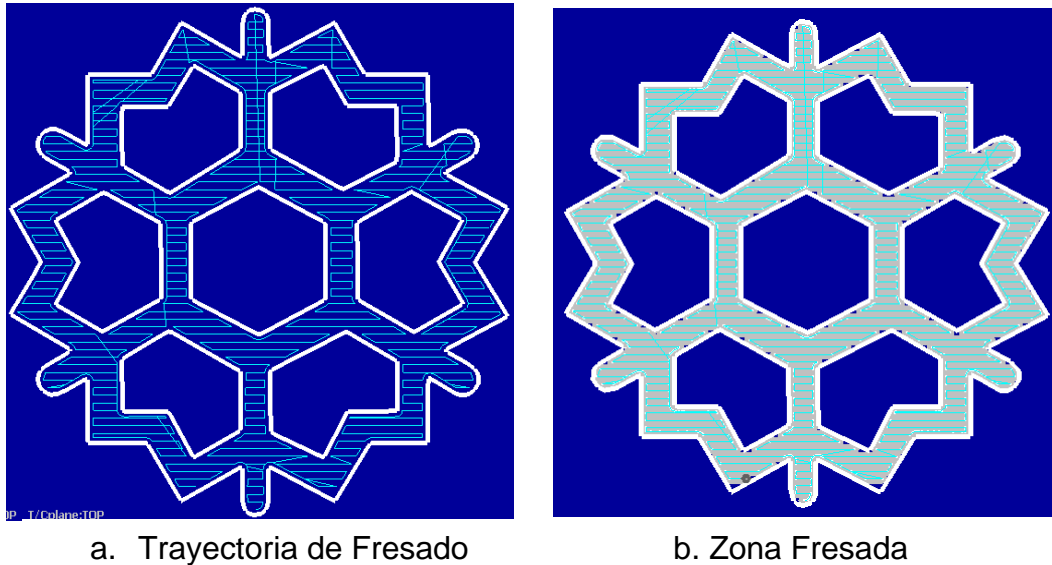
Fuente: Autores

- Descripción gráfica de la trayectoria de maquinado:** A continuación se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software MasterCam solo para el método de corte más eficiente (en éste caso Zigzag) hallado para los procesos de desbaste y acabado, y finalmente también se muestra el resultado final del maquinado una vez se realizan los dos procesos mencionados. Ver gráficas 69, 70 y 71.

Este procedimiento se repita para cada una de cavidades que se analizan de aquí en adelante mediante el software MasterCam.

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado del software MasterCam**

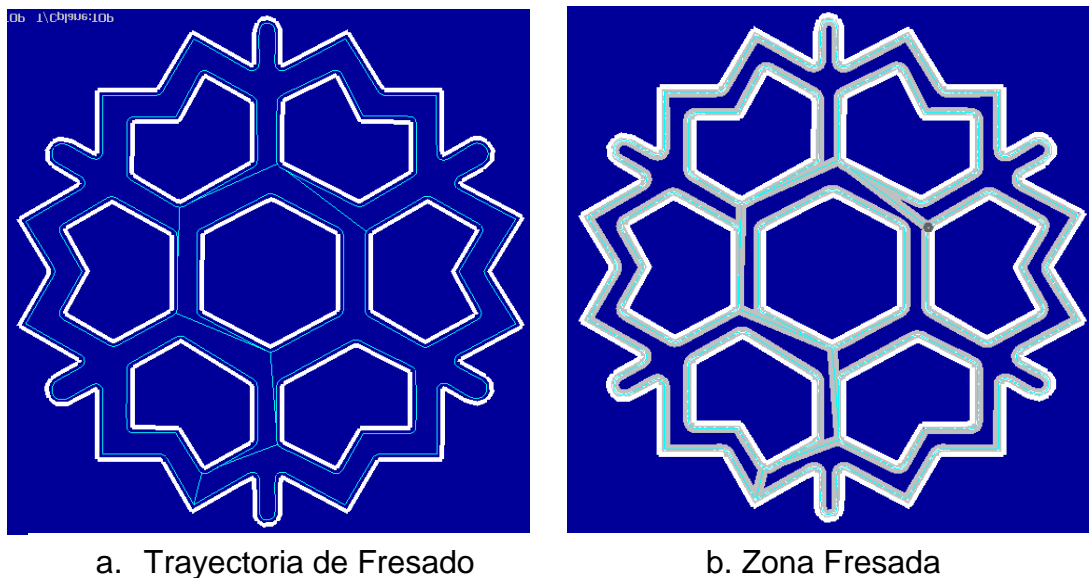
Gráfica 69. Proceso de Desbaste para el Copo de Nieve



Fuente: Programa MasterCam

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software MasterCam**

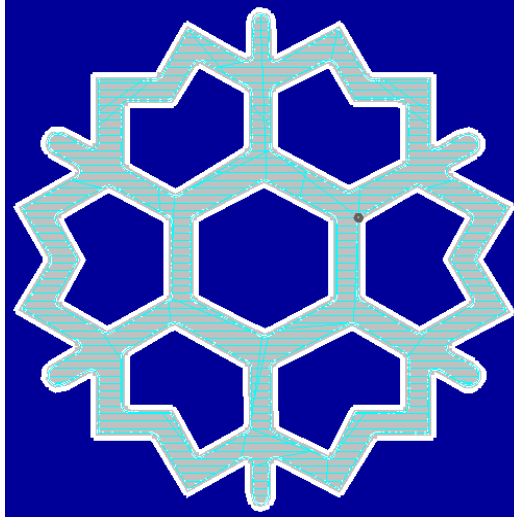
Gráfica 70. Proceso de Acabado para el Copo de Nieve



Fuente: Programa MasterCam

- **Cavidad terminada resultado del software MasterCam**

Gráfica 71. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Copo de Nieve

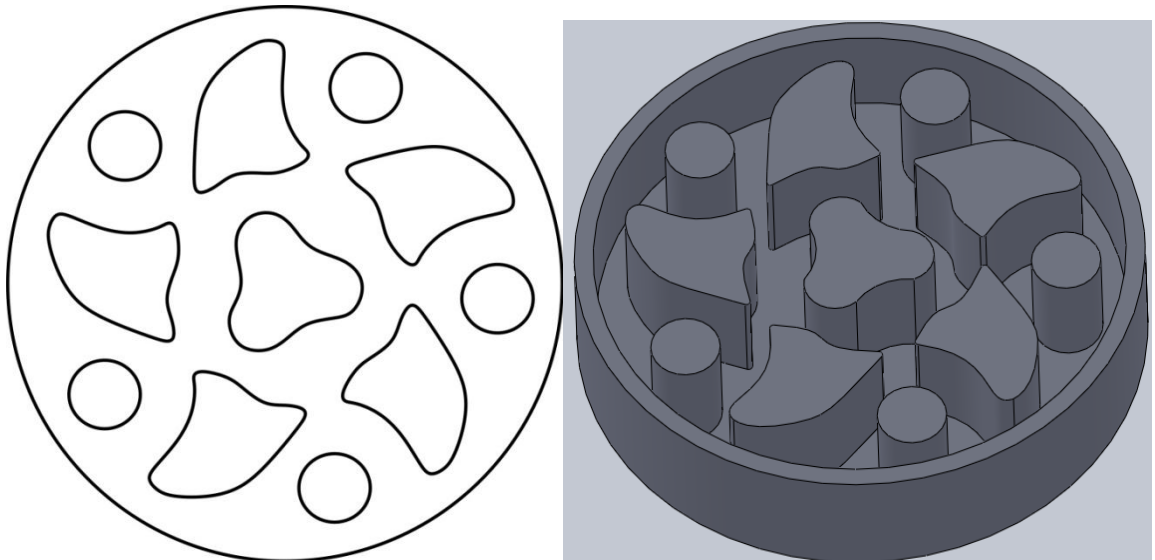


Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

### 7.1.2 Cavidad 2: Pieza de 11 islas

Gráfica 72. Geometría de la pieza de 11 Islas



Fuente: Autores. Dibujo CorelDraw y SolidWork

**7.1.2.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly.** En la tabla 35 se observa los parámetros de la cavidad con los que se obtiene un buen maquinado y los parámetros que fueron suministrados en el software EDCA Firefly para realizar la simulación y escoger la mejor trayectoria de mecanizado (resaltada en un color verde) dentro de las 5 pruebas realizadas.

Tabla 35. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para la pieza de 11 Islas

PIEZA DE 11 ISLAS (Cavidad Compleja)							
Algoritmo Luciérnaga							
Parámetros de la cavidad				Parámetros del Algoritmo			
Diámetro de la Fresa = 3/8" Distancia entre puntos = 0,24" Tipo de acabado = Disco Dx = 14" Dy = 14"				Puntos de desbaste = 1196 Puntos de acabado = 761 Número de Luciérnagas = 10 Número de Movimientos = 15 Número de Iteraciones = 6000			
Nº de réplicas	Desbaste			Acabado (cavidad simple)			Distancia total (Desbaste + Acabado)
	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	
1	309,348	5997	3192	161,5811	1994	954,41	470,929
2	307,11	5362	3006	173,4077	1818	843,75	480,518
3	306,63	5796	3073	161,5811	1994	948,61	468,211
4	305,27	5908	3142	161,2901	1709	818,83	466,560
5	307,468	6000	3136	160,8015	1600	770,75	468,269

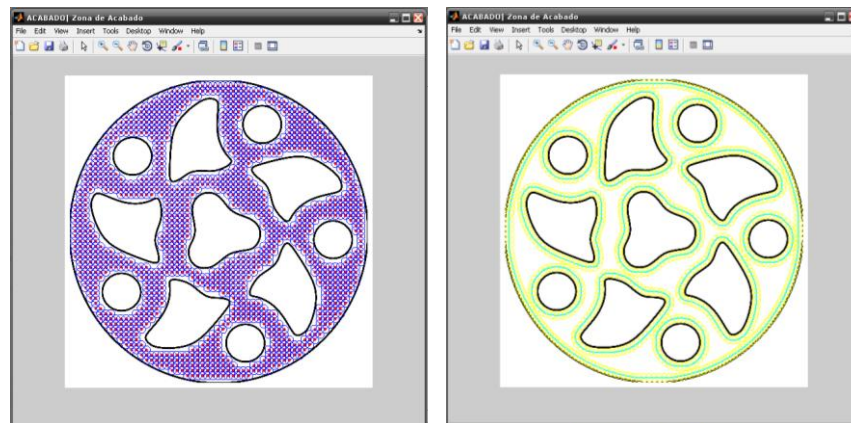
Fuente: Autores.

- **Descripción gráfica de los puntos y trayectoria de maquinado.** A continuación se muestra las gráficas que se obtuvieron de los puntos de maquinado mediante el software EDCA Firefly en el módulo “Procesamiento de Imagen” tanto para los procesos de desbaste y acabado (ver gráfica 73), también se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software EDCA Firefly en el módulo “Algoritmo Firefly” tanto para el procesos de desbaste

como para el proceso de acabado y finalmente el resultado final del maquinado una vez se han realizado los dos procesos mencionados. Ver gráficas 74, 75 y 76.

- **Puntos de desbaste de y acabado resultado del procesamiento de imagen del software EDCA Firefly**

Gráfica 73. Puntos de Maquinado para para la pieza de 11 Islas



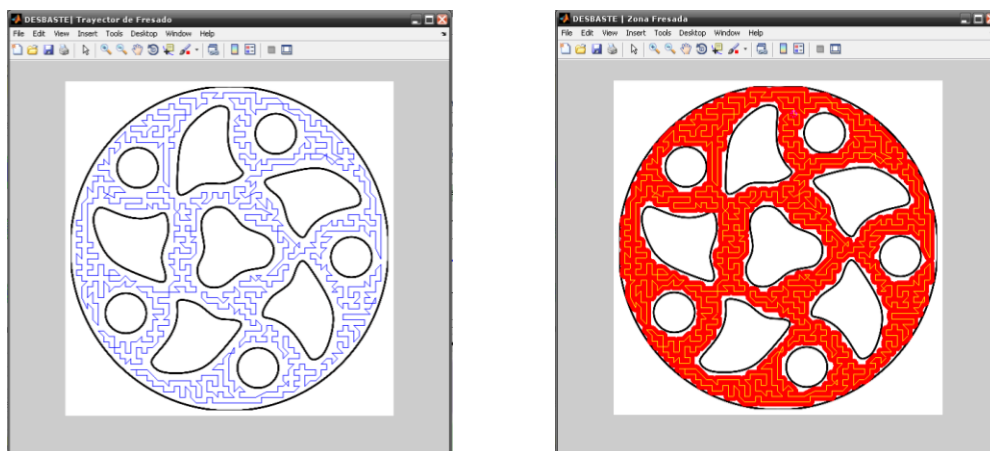
a. Puntos de Desbaste

b. Puntos de Acabado

Fuente: Autores

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado**

Gráfica 74. Proceso de Desbaste para para la pieza de 11 Islas



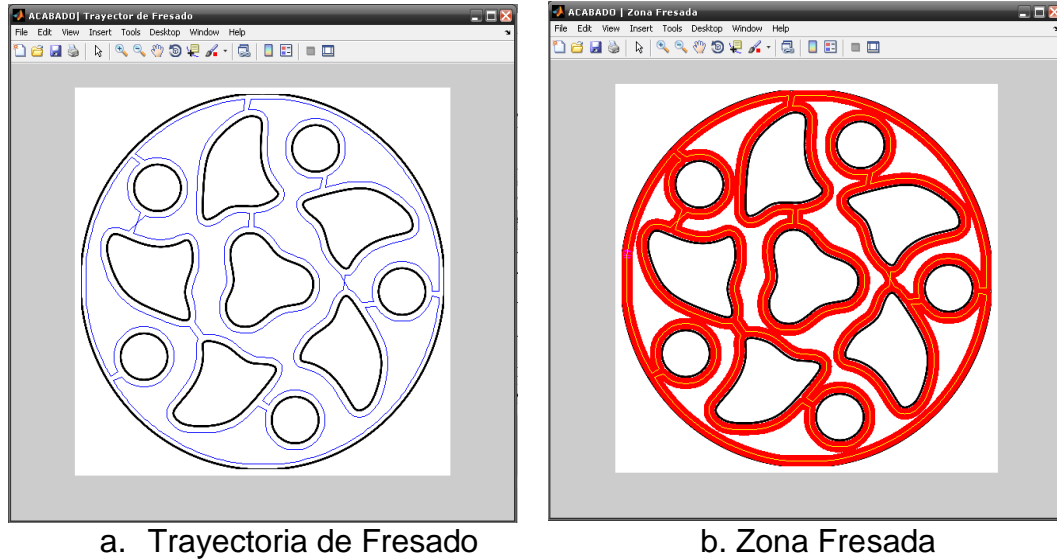
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Autores

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software EDCA Firefly**

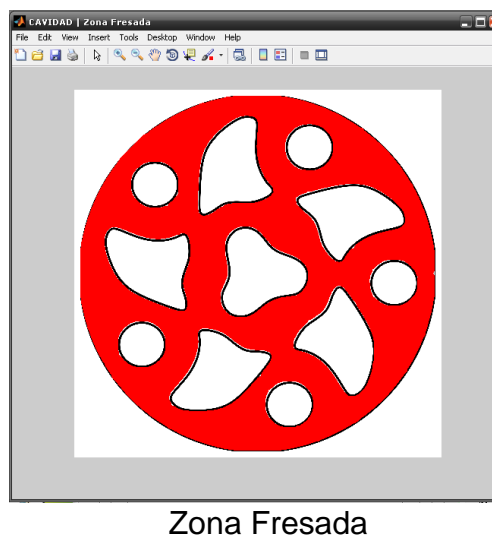
Gráfica 75. Proceso de Acabado para para la pieza de 11 Islas



Fuente: Autores

- **Cavidad terminada resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 76. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para para la pieza de 11 Islas



Fuente: Autores

**7.1.2.2 Trayectorias generadas por MasterCam.** El software MasterCam se pueden generar 8 métodos los cuales son Zigzag, Constant Overlap Spiral, Parallel Spiral, Parallel Spiral Clear Corners, Morph Spiral, High Speed, One Way y True Spiral; con cada uno de ellos se halla la longitud de la mejor trayectoria de mecanizado para observar cual es la más eficiente (resaltada en color Azul cielo); Ver tabla 36.

Tabla 36. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para la pieza de 11 Islas

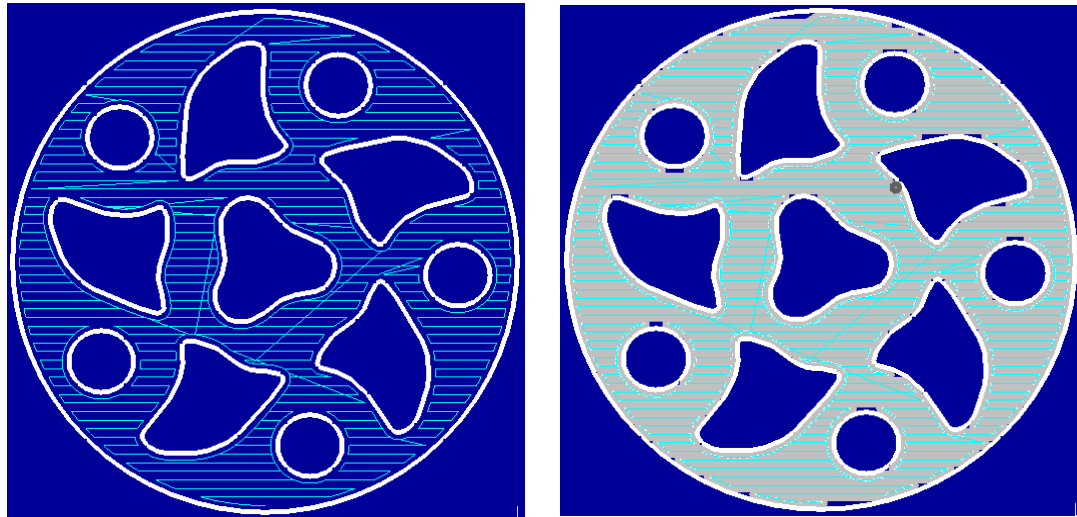
Distancias en MasterCam [in]			
Método de corte	Distancia desbaste	Distancia acabado	Distancia total
Zigzag	454,7672	183,8568	638,624
Constant Overlap Spiral	1255,246	183,8568	1439,1028
Parallel Spiral	883,4147	183,8568	1067,2715
Parallel Spiral, Clean Corners	937,2245	183,8568	1121,0813
Morph Spiral	1264,5086	183,8568	1448,3654
High Speed	2937,0584	183,8568	3120,9152
One Way	457,0284	183,8568	640,8852
True Spiral	748,2141	183,8568	932,0709

Fuente: Autores.

- **Descripción gráfica de la trayectoria de maquinado.** A continuación se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software MasterCam solo para el método de corte más eficiente (en éste caso Zigzag) hallado para los procesos de desbaste y acabado, y finalmente también se muestra el resultado final del maquinado una vez se han realizado los dos procesos mencionados. Ver gráficas 77, 78 y 79.

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado del software MasterCam**

Gráfica 77. Proceso de Desbaste para para la pieza de 11 Islas



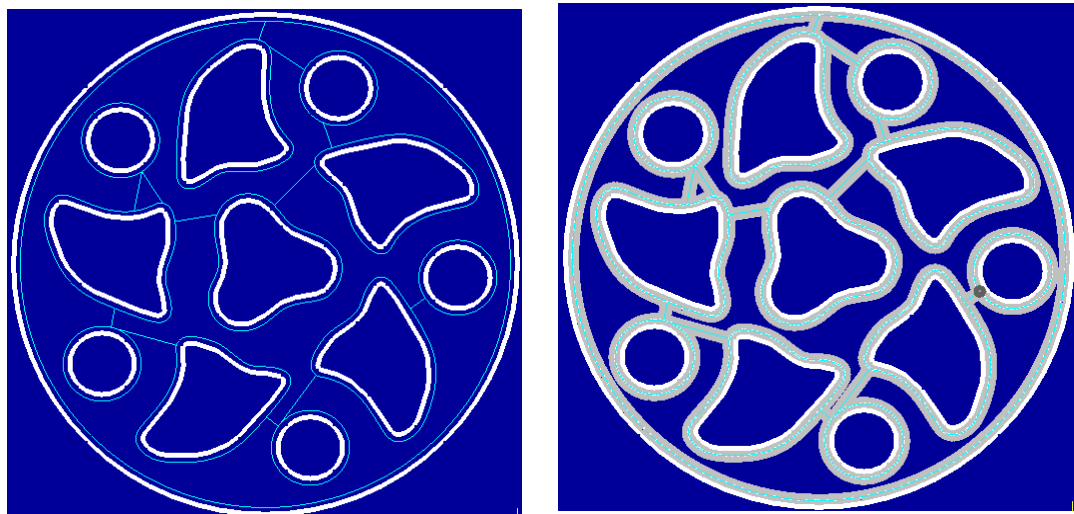
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software MasterCam**

Gráfica 78. Proceso de Acabado para para la pieza de 11 Islas



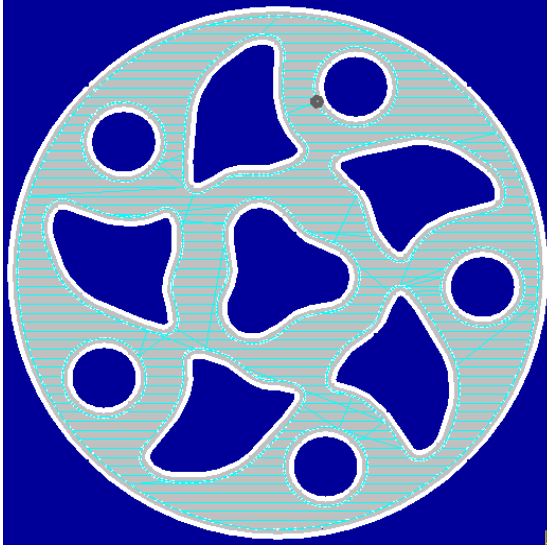
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

- **Cavidad terminada resultado del software MasterCam**

Gráfica 79. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para la pieza de 11 Islas

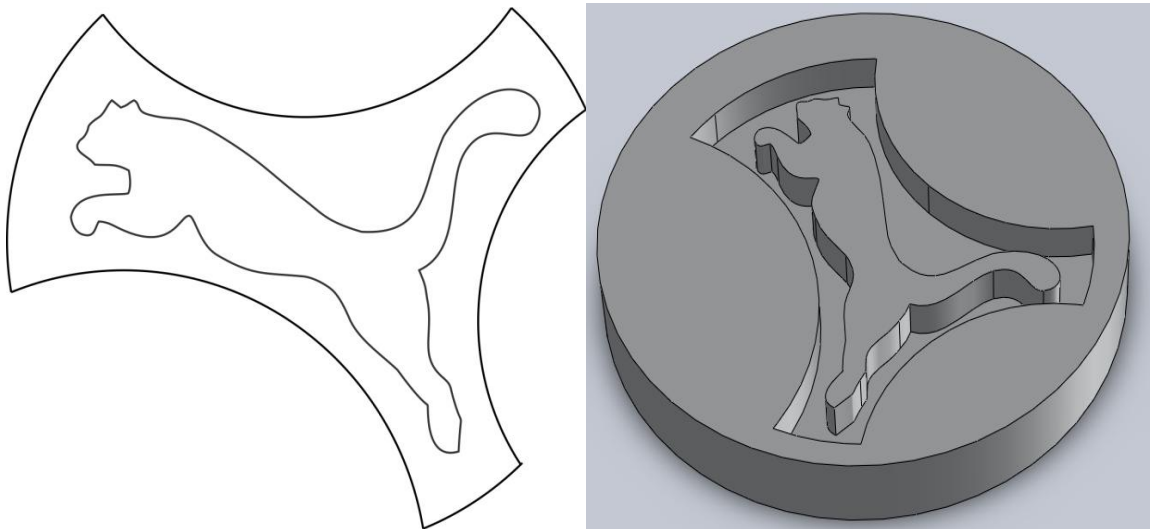


Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

### 7.1.3 Cavidad 3: Puma

Gráfica 80. Geometría del Puma



Fuente: Autores. Dibujo CorelDraw y SolidWork

**7.1.3.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly.** En la tabla 37 se observa los parámetros de la cavidad con los que se obtiene un buen maquinado y los parámetros que fueron suministrados en el software EDCA Firefly para realizar la simulación y escoger la mejor trayectoria de mecanizado (resaltada en un color verde) dentro de las 5 pruebas realizadas.

Tabla 37. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para el Puma

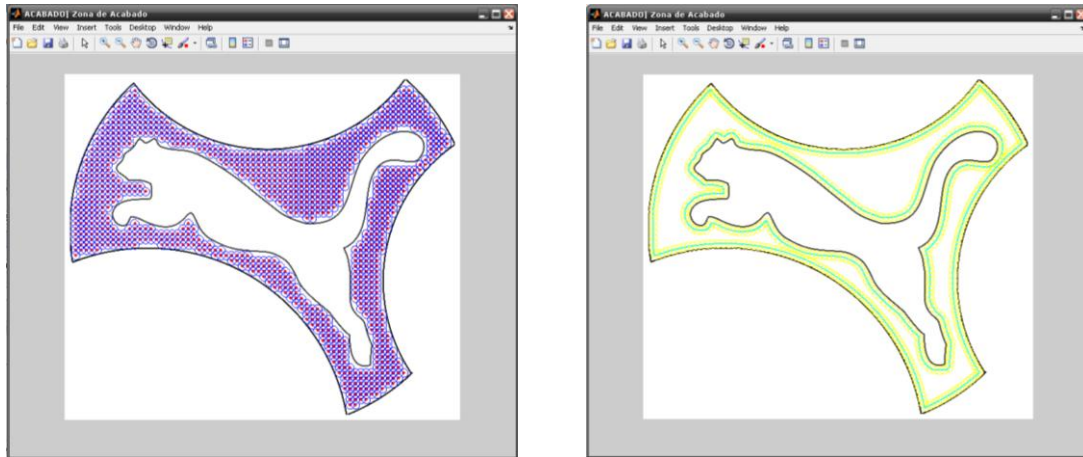
Puma (Cavidad compleja)							
Algoritmo Luciérnaga							
Parámetros de la cavidad				Parámetros del Algoritmo			
Diámetro de la Fresa = 1/4" Distancia entre puntos = 0,16" Tipo de acabado = Disco Dx = 11,43" Dy = 10,05"				Puntos de desbaste = 989 Puntos de acabado = 536 Número de Luciérnagas = 10 Número de Movimientos = 15 Número de Iteraciones = 6000			
Nº de réplicas	Desbaste			Acabado (cavidad simple)			Distancia total (Desbaste + Acabado)
	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	
1	170,7297	5858	2113,3	71,5783	646	177,593	242,308
2	167,6366	5988	2152,3	71,5415	1931	486,187	239,178
3	170,4388	5485	2041,5	71,6267	1916	454,843	242,066
4	171,0635	5826	2089,7	71,4577	1743	432,884	242,522
5	168,7995	5947	2152,1	71,7597	595	145,016	240,56

Fuente: Autores.

- **Descripción gráfica de los puntos y trayectoria de maquinado.** A continuación se muestra las gráficas que se obtuvieron de los puntos de maquinado mediante el software EDCA Firefly en el módulo “Procesamiento de Imagen” tanto para los procesos de desbaste y acabado (ver gráfica 81), también se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software EDCA Firefly en el módulo “Algoritmo Firefly” tanto para el procesos de desbaste como para el proceso de acabado y finalmente el resultado final del maquinado una vez se han realizado los dos procesos mencionados. Ver gráficas 82,83 y 84.

- **Puntos de desbaste de y acabado resultado del procesamiento de imagen del software EDCA Firefly**

Gráfica 81. Puntos de Maquinado para el Puma



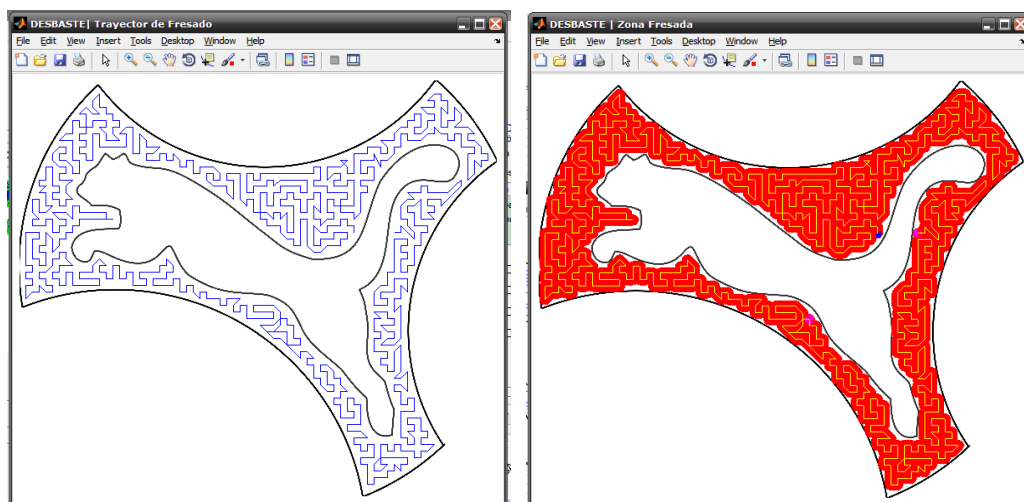
a. Puntos de Desbaste

b. Puntos de Acabado

Fuente: Autores

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 82. Proceso de Acabado para el Puma



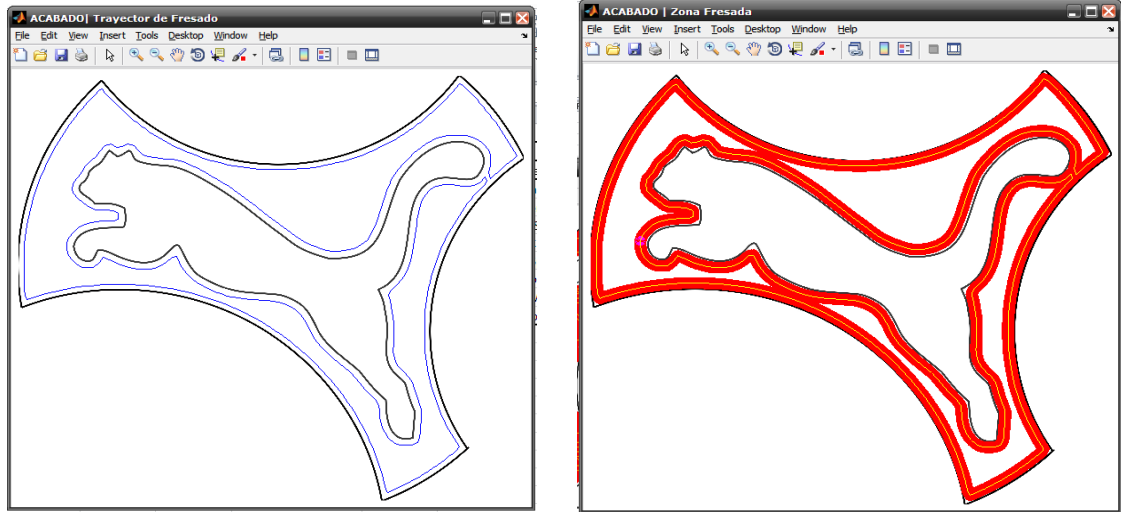
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Autores

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 83. Proceso de Acabado para el Puma



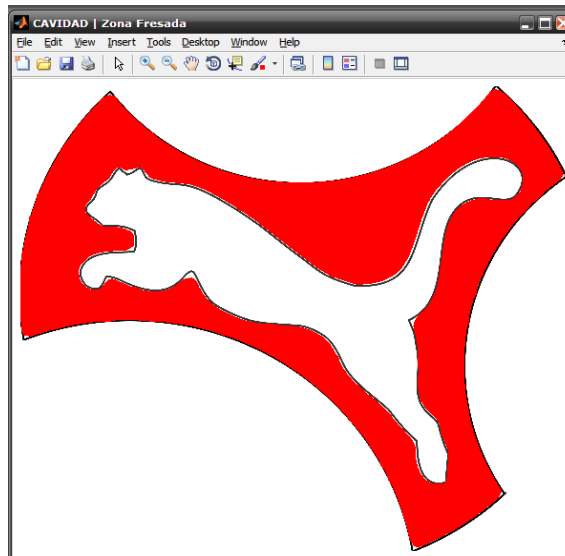
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Autores

- **Cavidad terminada resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 84. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Puma



Zona Fresada

Fuente: Autores

**7.1.3.2 Trayectorias generadas por MasterCam.** El software MasterCam se pueden generar 8 métodos los cuales son Zigzag, Constant Overlap Spiral, Parallel Spiral, Parallel Spiral Clear Corners, Morph Spiral, High Speed, One Way y True Spiral; con cada uno de ellos se halla la longitud de la mejor trayectoria de mecanizado para observar cual es la más eficiente (resaltada en color Azul cielo); Ver tabla 38.

Tabla 38. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para el Puma

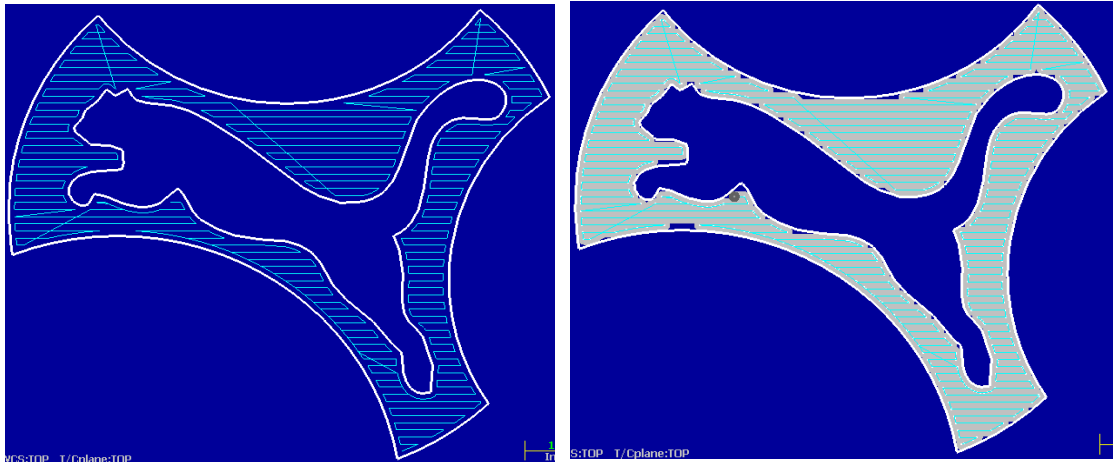
Distancias en MasterCam [in]			
Método de corte	distancia desbaste	distancia acabado	distancia total
Zigzag	210,9011	73,6504	284,5515
Constant Overlap Spiral	531,7393	73,6504	605,3897
Parallel Spiral	409,9383	73,6504	483,5887
Parallel Spiral, Clean Corners	450,6838	73,6504	524,3342
Morph Spiral	557,8942	73,6504	631,5446
High Speed	1498,7853	73,6504	1572,4357
One Way	265,0101	73,6504	338,6605
True Spiral	1053,7945	73,6504	1127,4449

Fuente: Autores.

- **Descripción gráfica de la trayectoria de maquinado.** A continuación se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software MasterCam solo para el método de corte más eficiente (en éste caso Zigzag) hallado para los procesos de desbaste y acabado, y finalmente también se muestra el resultado final del maquinado una vez se han realizado los dos procesos mencionados. Ver gráficas 85, 86 y 87.

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado del software MasterCam**

Gráfica 85. Proceso de Desbaste para el Puma



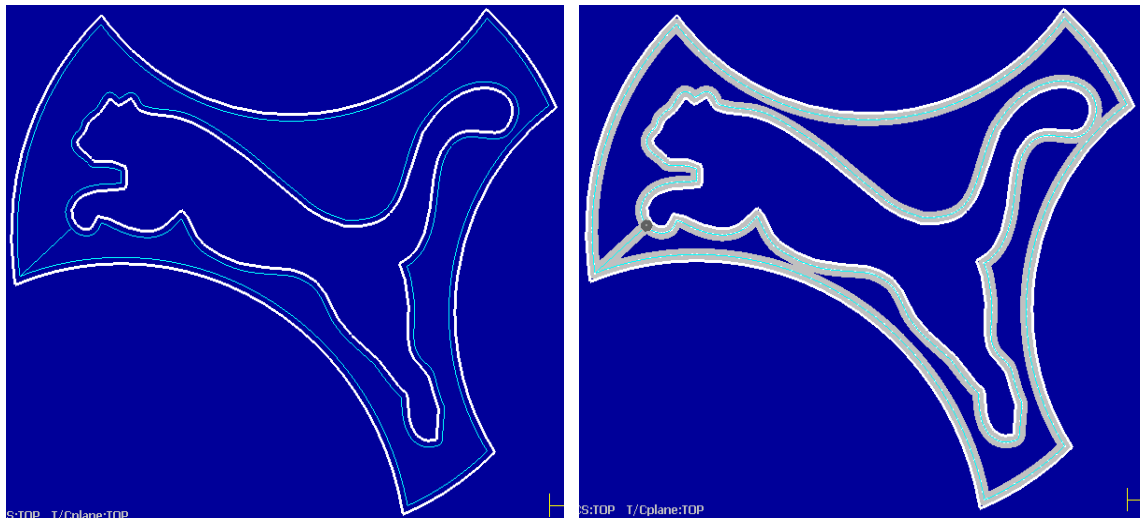
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software MasterCam**

Gráfica 86. Proceso de Acabado para el Puma



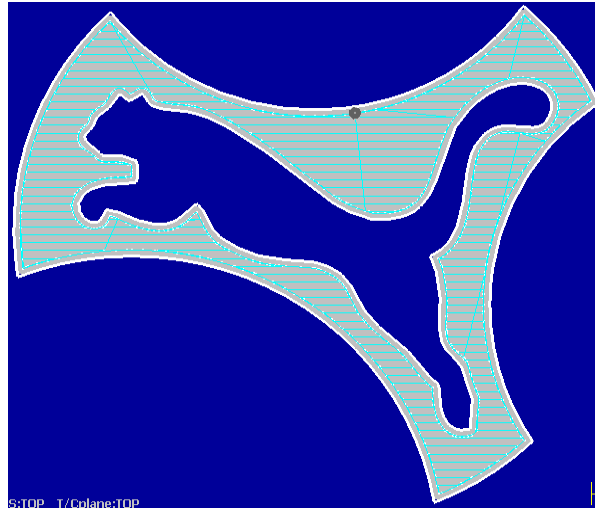
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

- **Cavidad terminada resultado del software MasterCam**

Gráfica 87. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Puma

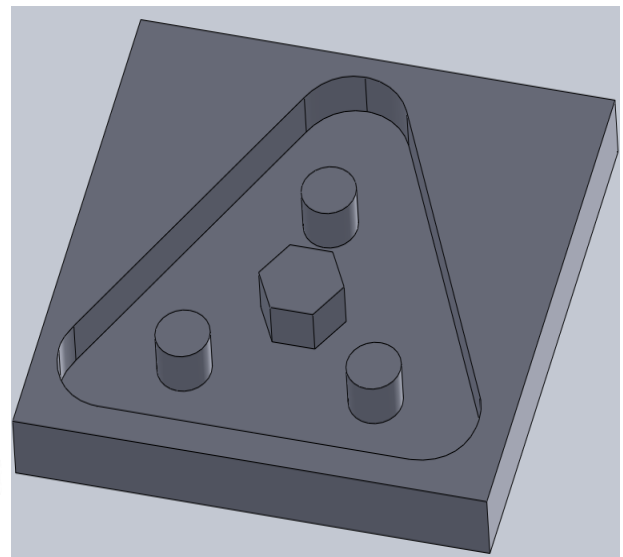
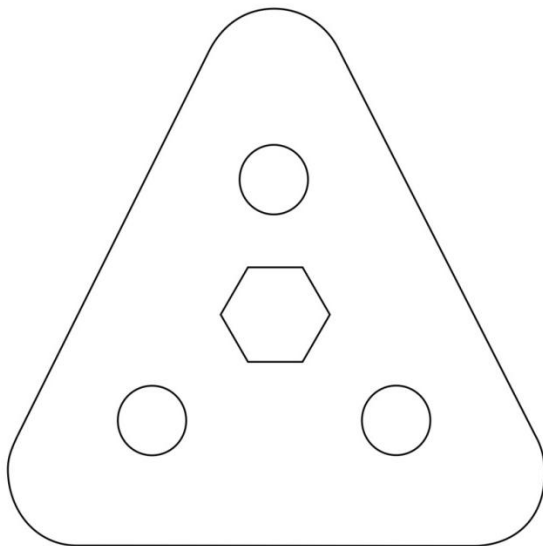


Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

#### 7.1.4 Cavidad 4: Triángulo

Gráfica 88. Geometría del Triángulo



Fuente: Autores. Dibujo CorelDraw y SolidWork

**7.1.4.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly.** En la tabla 39 se observa los parámetros de la cavidad con los que se obtiene un buen maquinado y los parámetros que fueron suministrados en el software EDCA Firefly para realizar la simulación y escoger la mejor trayectoria de mecanizado (resaltada en un color verde) dentro de las 5 pruebas realizadas.

Tabla 39. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para el Triángulo

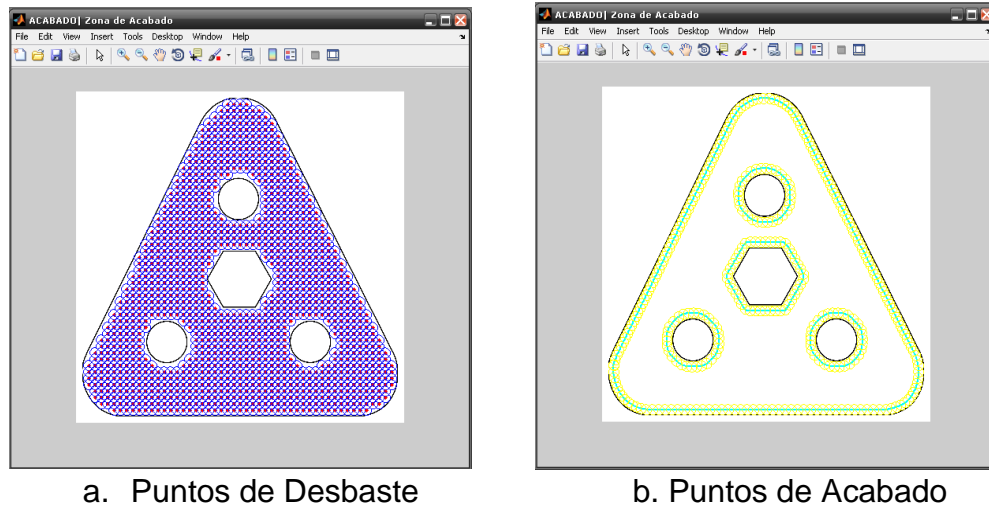
TRIANGULO (Cavidad Simple)							
Algoritmo Luciérnaga							
Parámetros de la cavidad				Parámetros del Algoritmo			
Diámetro de la Fresa = 3/8" Distancia entre puntos = 0,24" Tipo de acabado = Disco Dx = 12" Dy = 12"				Puntos de desbaste = 1261 Puntos de acabado = 326 Número de Luciérnagas = 11 Número de Movimientos = 20 Número de Iteraciones = 2000			
Nº réplicas	Desbaste			Acabado (cavidad simple)			Distancia total (Desbaste + Acabado)
	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	
1	312,1787	1879	1685,14	72,5592	759	182,875	384,738
2	313,9954	1990	1751,95	72,5354	775	188,328	386,531
3	314,546	1951	1761,42	72,5787	223	75,312	387,125
4	313,833	1992	1779,75	72,5434	1288	286,172	386,376
5	314,5984	1986	1764,84	72,5493	1406	324,25	387,148

Fuente: Autores.

- **Descripción gráfica de los puntos y trayectoria de maquinado.** A continuación se muestra las gráficas que se obtuvieron de los puntos de maquinado mediante el software EDCA Firefly en el módulo “Procesamiento de Imagen” tanto para los procesos de desbaste y acabado (ver gráfica 89), también se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software EDCA Firefly en el módulo “Algorithm Firefly” tanto para el procesos de desbaste como para el proceso de acabado y finalmente el resultado final del maquinado una vez se han realizado los dos procesos mencionados. Ver gráficas 90, 91y 92.

- **Puntos de desbaste de y acabado resultado del procesamiento de imagen del software EDCA Firefly**

Gráfica 89. Puntos de Maquinado para el Triángulo



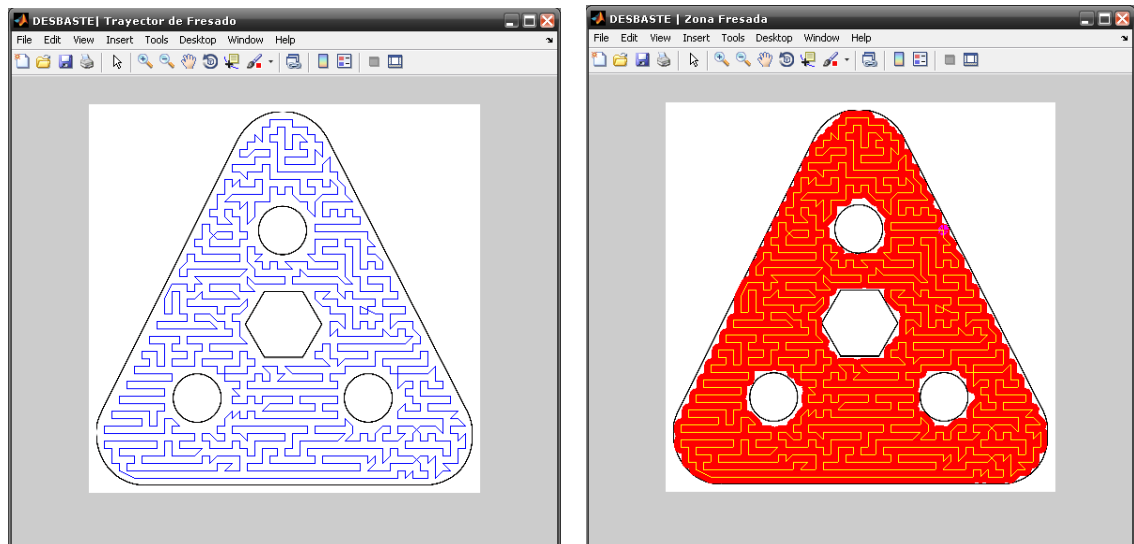
a. Puntos de Desbaste

b. Puntos de Acabado

Fuente: Autores

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 90. Proceso de Desbaste para el Triángulo



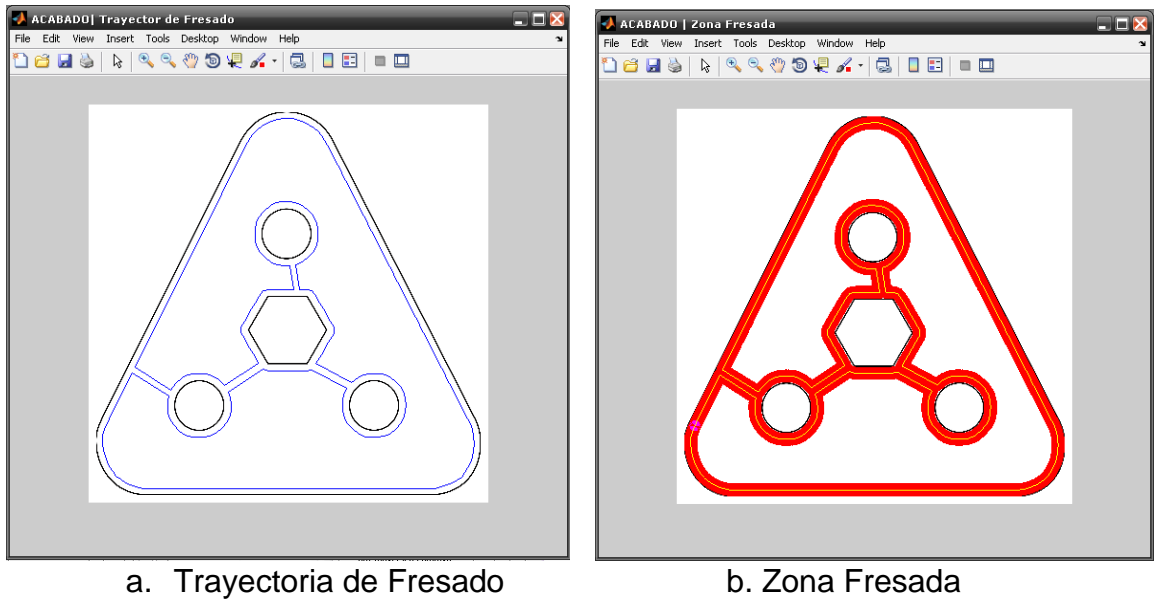
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Autores

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software EDCA Firefly**

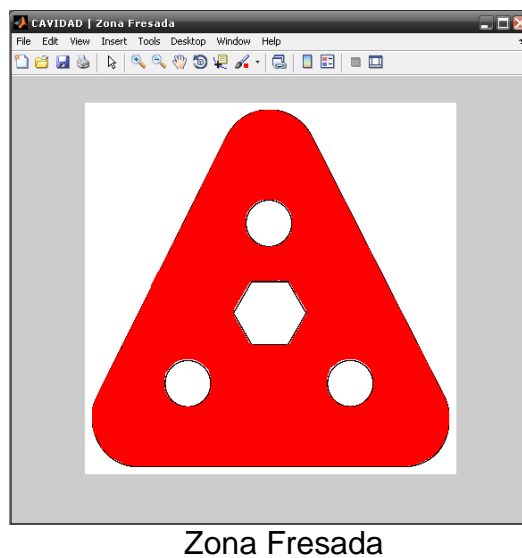
Gráfica 91. Proceso de Acabado para el Triángulo



Fuente: Autores

- **Cavidad terminada resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 92. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Triángulo



Fuente: Autores

**7.1.4.2 Trayectorias generadas por MasterCam.** El software MasterCam se pueden generar 8 métodos los cuales son Zigzag, Constant Overlap Spiral, Parallel Spiral, Parallel Spiral Clear Corners, Morph Spiral, High Speed, One Way y True Spiral; con cada uno de ellos se halla la longitud de la mejor trayectoria de mecanizado para observar cual es la más eficiente (resaltada en color Azul cielo); Ver tabla 40.

Tabla 40. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para el Triángulo

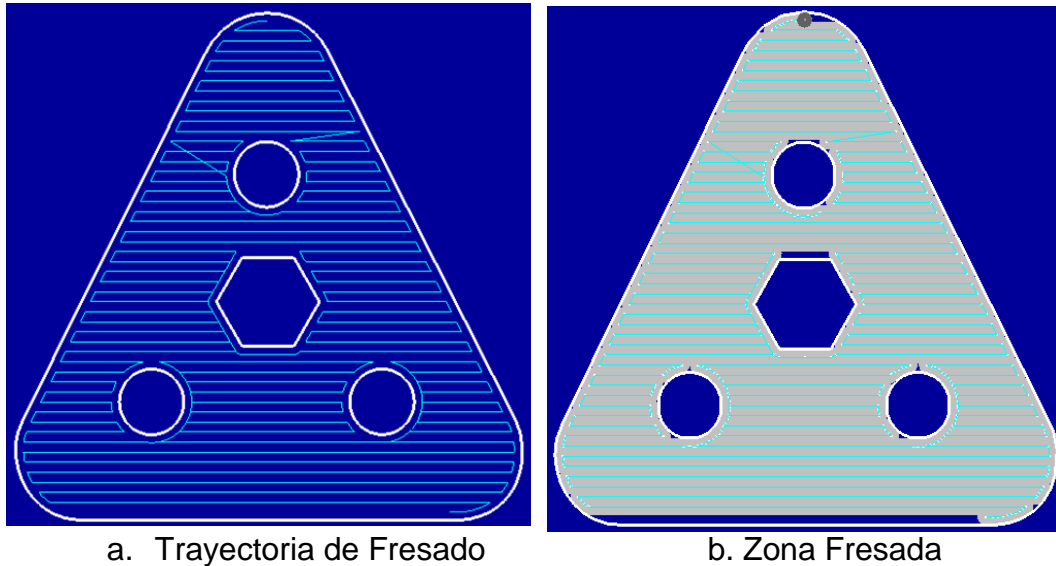
Distancias en MasterCam [in]			
Método de corte	Distancia desbaste	Distancia acabado	Distancia total
Zigzag	335,3406	77,7396	413,0802
Constant Overlap Spiral	559,8837	77,7396	637,6233
Parallel Spiral	513,8429	77,7396	591,5825
Parallel Spiral, Clean Corners	532,9894	77,7396	610,729
Morph Spiral	834,0714	77,7396	911,811
High Speed	1480,1609	77,7396	1557,9005
One Way	364,34	77,7396	442,0796
True Spiral	622,4813	77,7396	700,2209

Fuente: Autores.

**Descripción gráfica de la trayectoria de maquinado.** A continuación se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software MasterCam solo para el método de corte más eficiente (en éste caso Zigzag) hallado para los procesos de desbaste y acabado, y finalmente también se muestra el resultado final del maquinado una vez se han realizado los dos procesos mencionados. Ver gráficas 93, 94 y 95.

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado del software MasterCam**

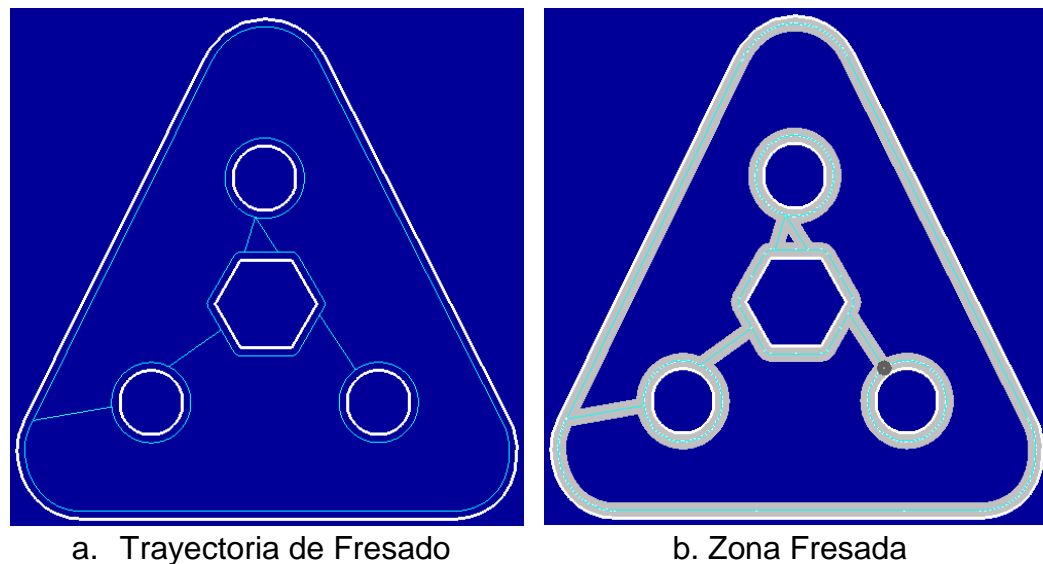
Gráfica 93. Proceso de Desbaste para el Triángulo



Fuente: Programa MasterCam

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software MasterCam**

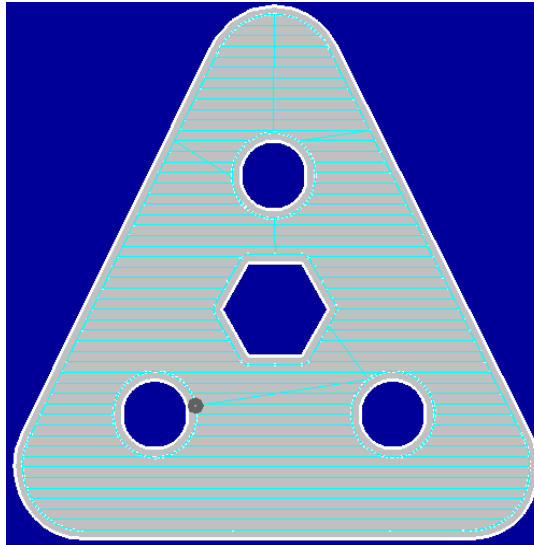
Gráfica 94. Proceso de Acabado para el Triángulo



Fuente: Programa MasterCam

- **Cavidad terminada resultado del software MasterCam**

Gráfica 95. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste

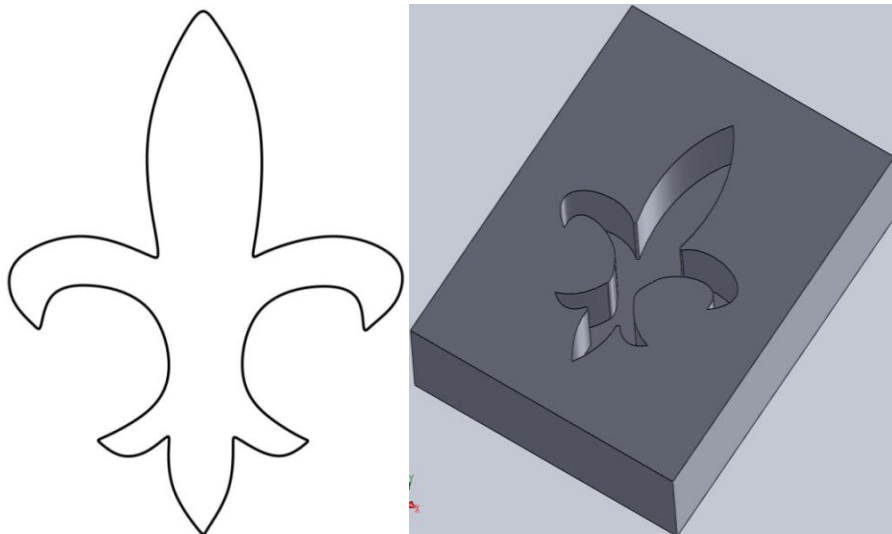


Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

### 7.1.5 Cavidad 5: Flor de lis

Gráfica 96. Geometría de la Flor de lis



Fuente: Autores. Dibujo CorelDraw y SolidWork

**7.1.5.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly.** En la tabla 41 se observa los parámetros de la cavidad con los que se obtiene un buen maquinado y los parámetros que fueron suministrados en el software EDCA Firefly para realizar la simulación y escoger la mejor trayectoria de mecanizado (resaltada en un color verde) dentro de las 6 pruebas realizadas.

Tabla 41. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para la Flor de Lis

FLOR DE LIS (Cavidad simple)							
Algoritmo Luciérnaga							
Parámetros de la cavidad				Parámetros del Algoritmo			
Diámetro de la Fresa = 1/4" distancia entre puntos = 0,16" tipo de acabado = Disco Dx = 6" Dy = 8"				Puntos de desbaste = 443 Puntos de acabado = 224 Número de Luciérnagas = 11 Número de Movimientos = 20 Número de Iteraciones = 2000			
Nº réplicas	Desbaste			Acabado (cavidad simple)			Distancia total (Desbaste + Acabado)
	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	
1	73,9255	1635	516,917	28,6493	0	0	102,575
2	74,6225	1974	594,08	28,6493	0	0	103,272
3	76,1332	1309	424,624	28,6493	0	0	104,783
4	73,6625	1975	605,305	28,6493	0	0	102,312
5	73,6236	1855	571,342	28,6493	0	0	102,273
6	73,4626	960	342,069	28,6493	0	0	102,112

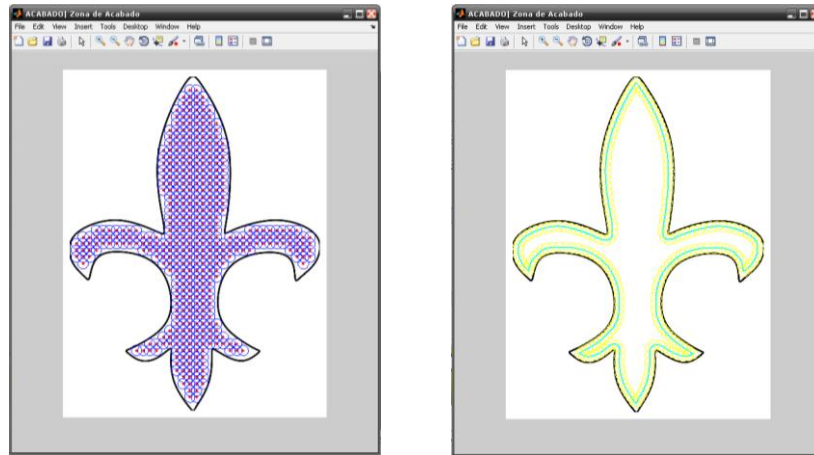
Fuente: Autores.

- **Descripción gráfica de los puntos y trayectoria de maquinado.** A continuación se muestra las gráficas que se obtuvieron de los puntos de maquinado mediante el software EDCA Firefly en el módulo “Procesamiento de Imagen” tanto para los procesos de desbaste y acabado (ver gráfica 97), también se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software EDCA Firefly en el módulo “Algorithm Firefly” tanto para el procesos de desbaste como para el proceso de acabado y finalmente el resultado final del maquinado

una vez se han realizado los dos procesos mencionados. Ver gráficas 98, 99 y 100.

- **Puntos de desbaste de y acabado resultado del procesamiento de imagen del software EDCA Firefly**

Gráfica 97. Puntos de Maquinado para la Flor de Lis



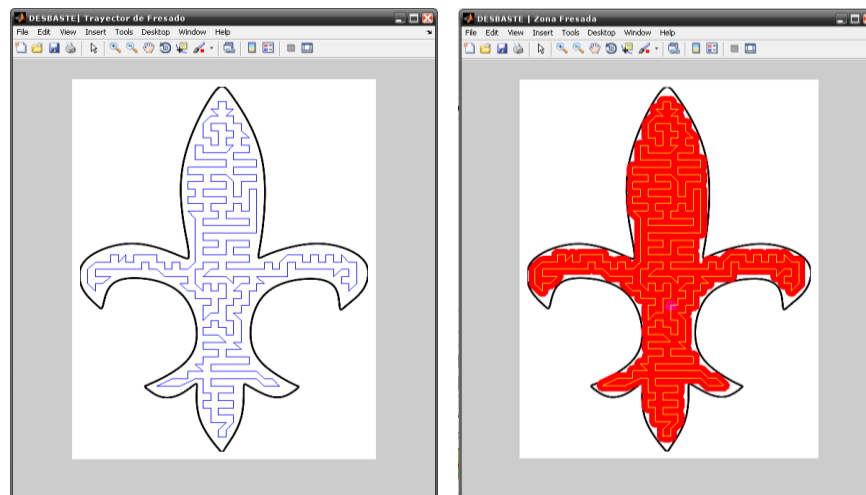
a. Puntos de Desbaste

b. Puntos de Acabado

Fuente: Autores

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 98. Proceso de Desbaste para la Flor de Lis



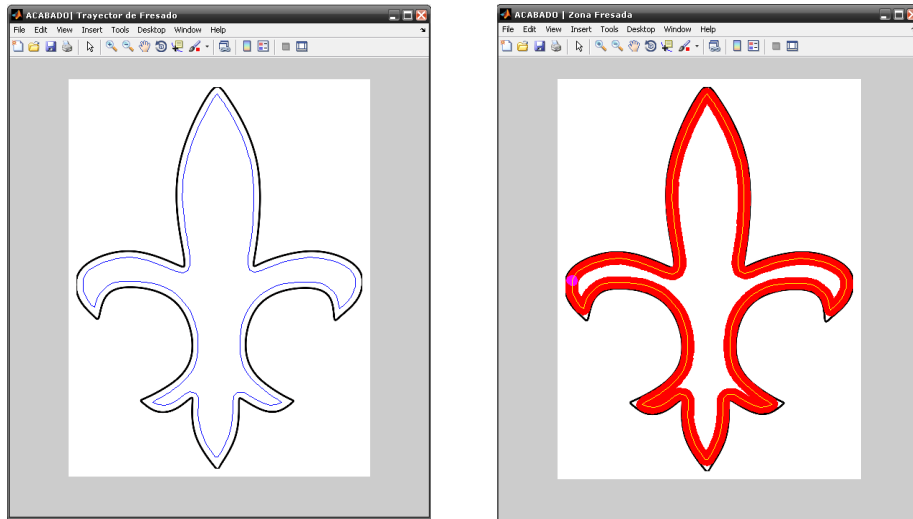
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Autores

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 99. Proceso de Acabado para la Flor de Lis



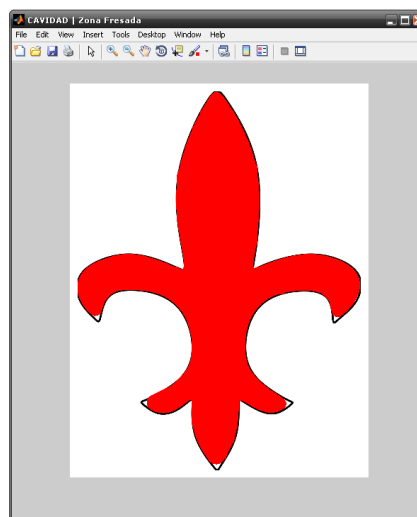
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Autores

- **Cavidad terminada resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 100. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para la Flor de Lis



Zona Fresada

Fuente: Autores

**7.1.5.2 Trayectorias generadas por MasterCam.** El software MasterCam se pueden generar 8 métodos los cuales son Zigzag, Constant Overlap Spiral, Parallel Spiral, Parallel Spiral Clear Corners, Morph Spiral, High Speed, One Way y True Spiral; con cada uno de ellos se halla la longitud de la mejor trayectoria de mecanizado para observar cual es la más eficiente (resaltada en color Azul cielo); Ver tabla 42.

Tabla 42. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para la Flor de Lis

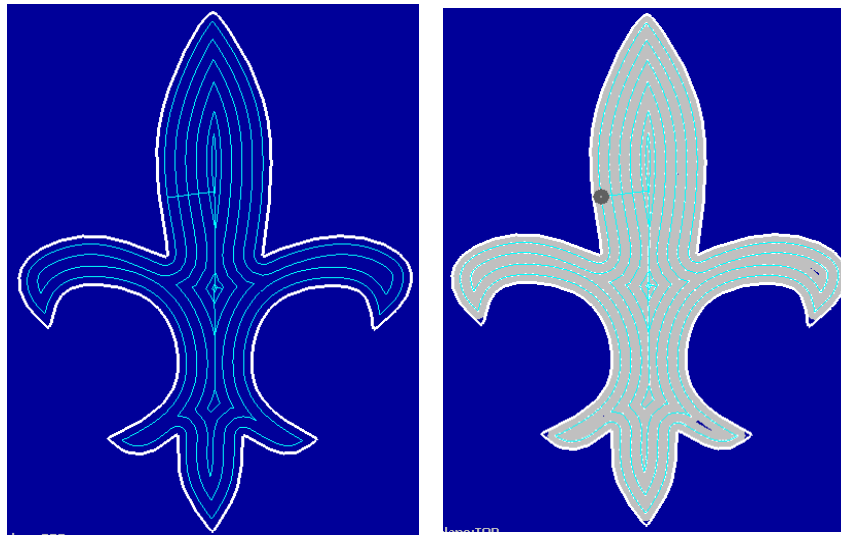
Distancias en MasterCam [in]			
Método de corte	Distancia desbaste	Distancia acabado	Distancia total
Zigzag	96,8832	29,3685	126,2517
Constant Overlap Spiral	95,5525	29,3685	124,921
Parallel Spiral	88,0355	29,3685	117,404
Parallel Spiral, Clean Corners	100,4092	29,3685	129,7777
Morph Spiral	364,7433	29,3685	394,1118
High Speed	569,5394	29,3685	598,9079
One Way	105,9972	29,3685	135,3657
True Spiral	303,9034	29,3685	333,2719

Fuente: Autores.

- **Descripción gráfica de la trayectoria de maquinado.** A continuación se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software MasterCam solo para el método de corte más eficiente (en éste caso Zigzag) hallado para los procesos de desbaste y acabado, y finalmente también se muestra el resultado final del maquinado una vez se han realizado los dos procesos mencionados. Ver gráficas 101, 102 y 103.

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado del software MasterCam**

Gráfica 101. Proceso de Desbaste para la Flor de Lis



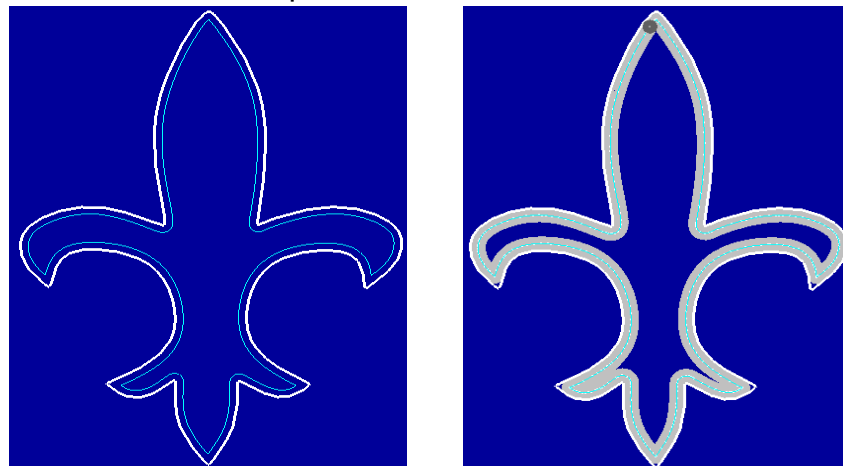
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software MasterCam**

Gráfica 102. Proceso de Acabado para la Flor de Lis



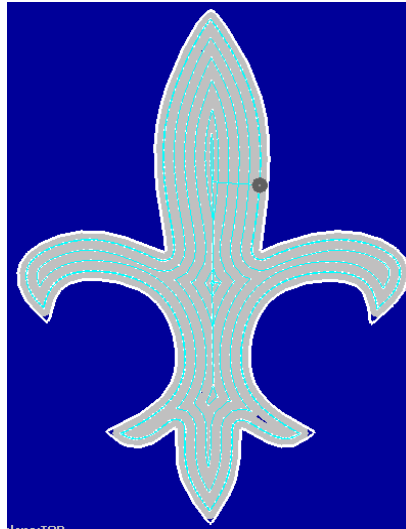
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

- **Cavidad terminada resultado del software MasterCam**

Gráfica 103. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para la Flor de Lis

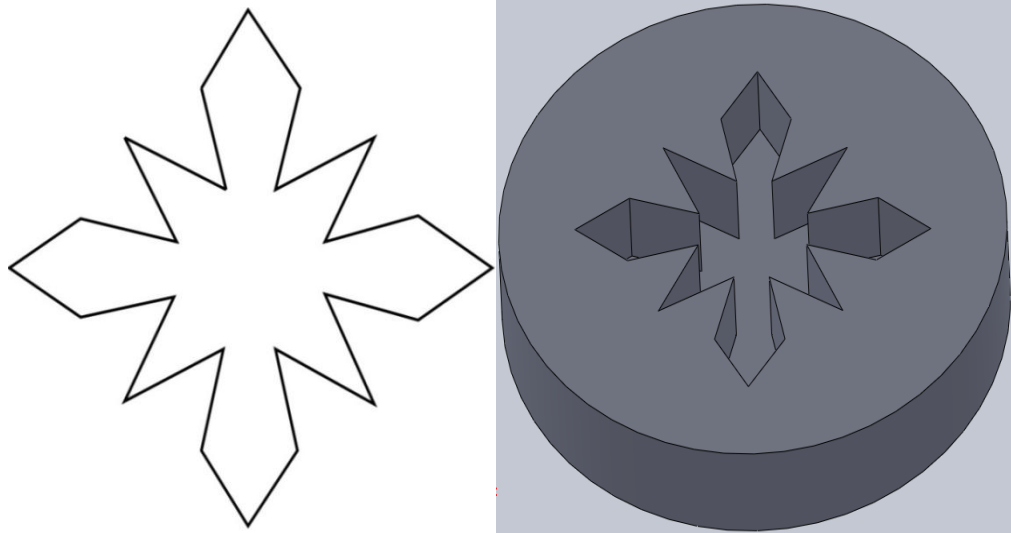


Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

### 7.1.6 Cavidad 6: Estrella

Gráfica 104. Geometría de la Estrella



Fuente: Autores. Dibujo CorelDraw y SolidWork

**7.1.6.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly.** En la tabla 43 se observa los parámetros de la cavidad con los que se obtiene un buen maquinado y los parámetros que fueron suministrados en el software EDCA Firefly para realizar la simulación y escoger la mejor trayectoria de mecanizado (resaltada en un color verde) dentro de las 5 pruebas realizadas.

Tabla 43. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para la Estrella

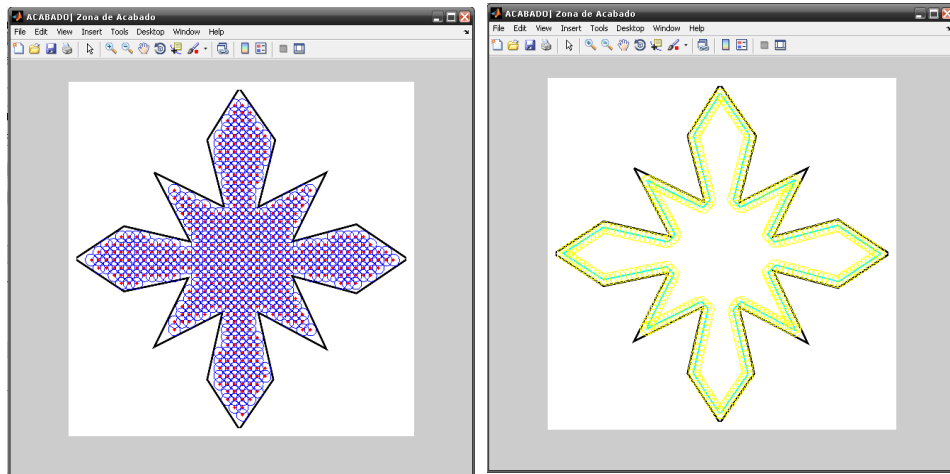
Estrella (Cavidad compleja)							
Algoritmo Luciérnaga							
Parámetros de la cavidad				Parámetros del Algoritmo			
Diámetro de la Fresa = 1/4" Distancia entre puntos = 0,16" Tipo de acabado = Rombo Dx = 7" Dy = 7"				Puntos de desbaste = 484 Puntos de acabado = 319 Número de Luciérnagas = 10 Número de Movimientos = 15 Número de Iteraciones = 6000			
Nº réplicas				Acabado (cavidad simple)			Distancia total (Desbaste + Acabado)
	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	
1	92,1736	5648	1229,44	30,7295	1664	319,547	122,903
2	93,0584	5823	1262,14	31,3062	1250	236,047	124,365
3	92,7694	3647	872,484	30,7295	1402	266,453	123,499
4	93,1386	5442	1222,97	31,0616	861	170,156	124,2
5	92,9515	4282	1004,55	30,7295	1320	201,203	123,681

Fuente: Autores.

- **Descripción gráfica de los puntos y trayectoria de maquinado.** A continuación se muestra las gráficas que se obtuvieron de los puntos de maquinado mediante el software EDCA Firefly en el módulo “Procesamiento de Imagen” tanto para los procesos de desbaste y acabado (ver gráfica 105), también se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software EDCA Firefly en el módulo “Algorithm Firefly” tanto para el procesos de desbaste como para el proceso de acabado y finalmente el resultado final del maquinado una vez se han realizado los dos procesos mencionados. Ver gráficas 106, 107 y 108.

- Puntos de desbaste de y acabado resultado del procesamiento de imagen del software EDCA Firefly

Gráfica 105. Puntos de Maquinado para la Estrella



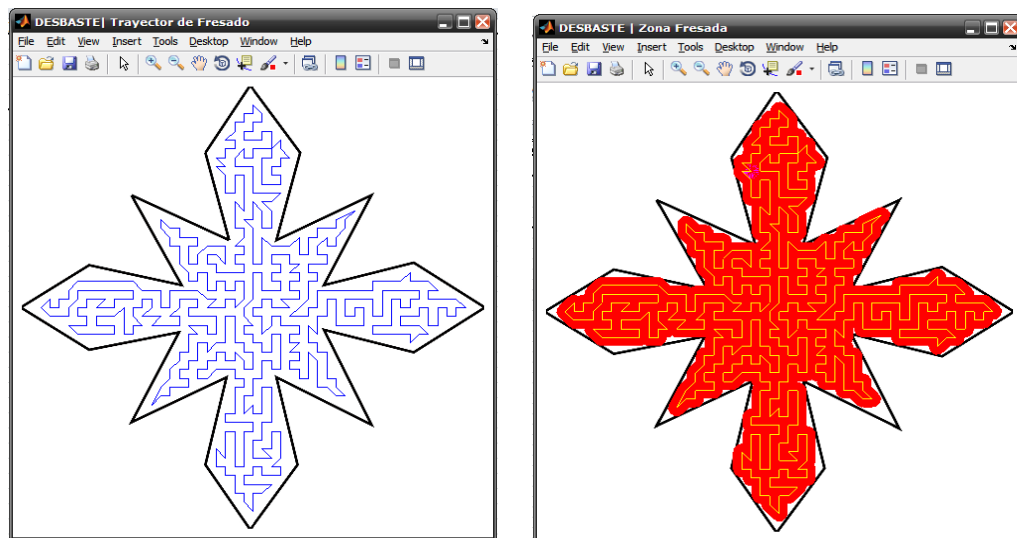
a. Puntos de Desbaste

b. Puntos de Acabado

Fuente: Autores

- Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado del software EDCA Firefly

Gráfica 106. Proceso de Desbaste para la Estrella



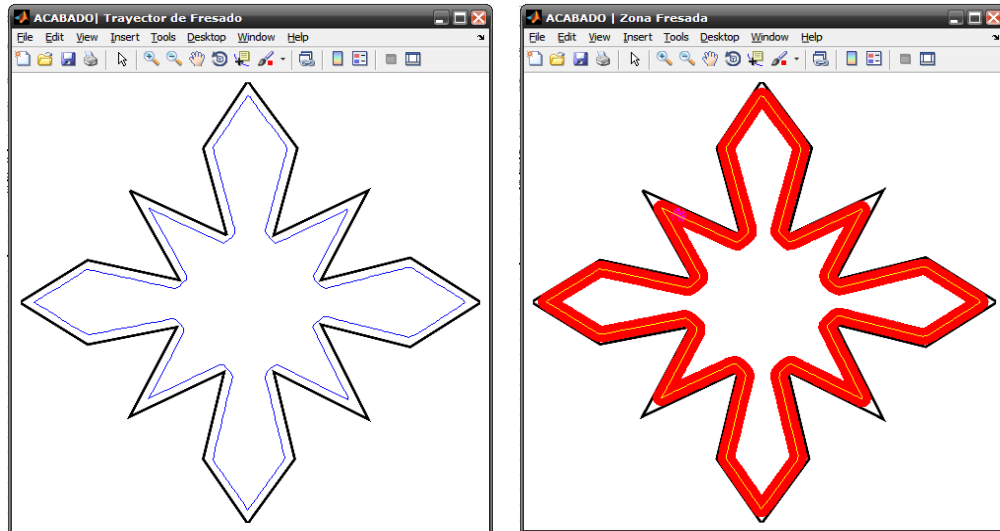
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Autores

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 107. Proceso de Acabado para la Estrella



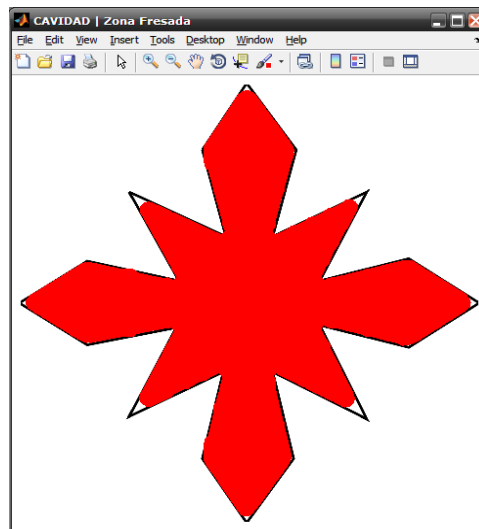
b. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Autores

- **Cavidad terminada resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 108. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para la Estrella



Zona Fresada

Fuente: Autores

**7.1.6.2 Trayectorias generadas por MasterCam.** El software MasterCam se pueden generar 8 métodos los cuales son Zigzag, Constant Overlap Spiral, Parallel Spiral, Parallel Spiral Clear Corners, Morph Spiral, High Speed, One Way y True Spiral; con cada uno de ellos se halla la longitud de la mejor trayectoria de mecanizado para observar cual es la más eficiente (resaltada en color Azul cielo); Ver tabla 44.

Tabla 44. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para la Estrella

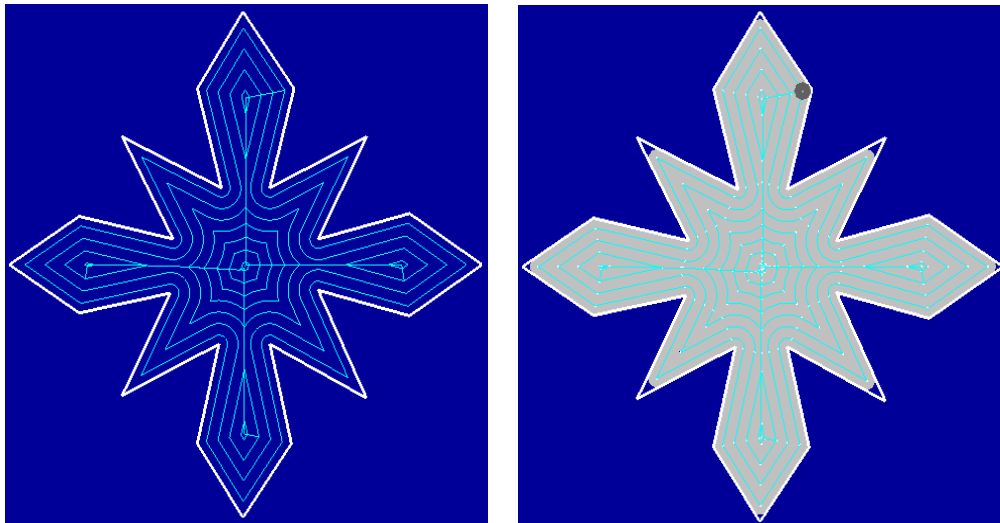
Distancias en MasterCam [in]			
Método de corte	Distancia desbaste	Distancia acabado	Distancia total
Zigzag	109,8683	31,5004	141,3687
Constant Overlap Spiral	108,3883	31,5004	139,8887
Parallel Spiral	105,0268	31,5004	136,5272
Parallel Spiral, Clean Corners	120,975	31,5004	152,4754
Morph Spiral	339,1979	31,5004	370,6983
High Speed	592,2325	31,5004	623,7329
One Way	113,618	31,5004	145,1184
True Spiral	352,2465	31,5004	383,7469

Fuente: Autores.

- **Descripción gráfica de la trayectoria de maquinado.** A continuación se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software MasterCam solo para el método de corte más eficiente (en éste caso Zigzag) hallado para los procesos de desbaste y acabado, y finalmente también se muestra el resultado final del maquinado una vez se han realizado los dos procesos mencionados. Ver gráficas 109, 110 y 111.

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado del software MasterCam**

Gráfica 109. Proceso de Desbaste para la Estrella



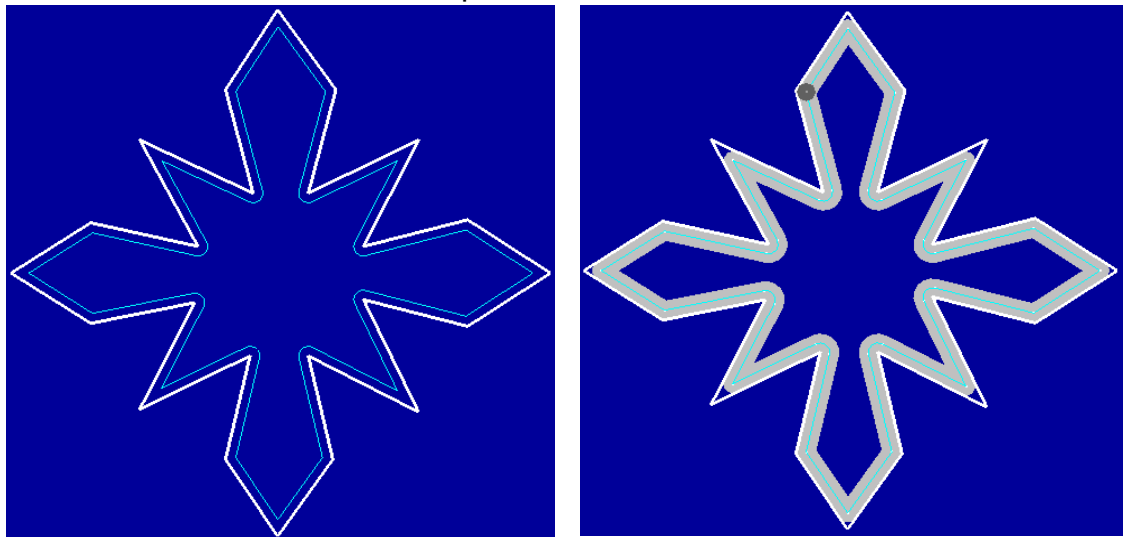
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software MasterCam**

Gráfica 110. Proceso de Acabado para la Estrella



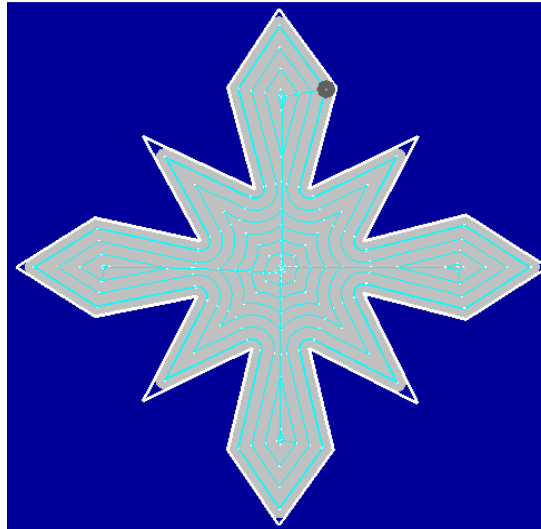
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

- **Cavidad terminada resultado del software MasterCam**

Gráfica 111. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para la Estrella

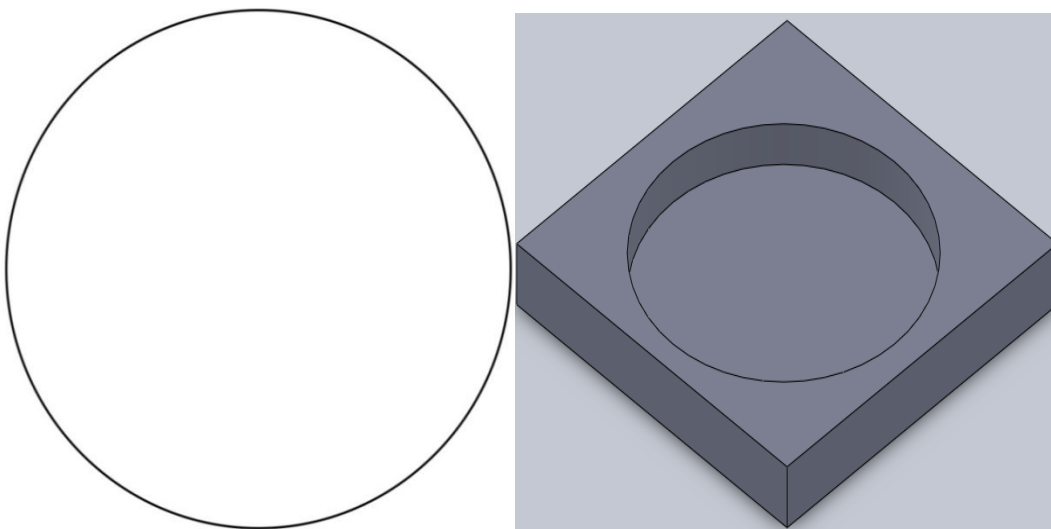


Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

### 7.1.7 Cavidad 7: Círculo

Gráfica 112. Geometría del Círculo



Fuente: Autores. Dibujo CorelDraw y SolidWork

**7.1.7.1 Trayectorias generadas por EDCA Firefly.** En la tabla 45 se observa los parámetros de la cavidad con los que se obtiene un buen maquinado y los parámetros que fueron suministrados en el software EDCA Firefly para realizar la simulación y escoger la mejor trayectoria de mecanizado (resaltada en un color verde) dentro de las 6 pruebas realizadas.

Tabla 45. Longitud de trayectorias generadas con EDCA Firefly para el círculo

CÍRCULO (Cavidad simple)							
Algoritmo Luciérnaga							
Parámetros de la cavidad				Parámetros del Algoritmo			
Diámetro de la Fresa = 3/4" distancia entre puntos = 0,495" tipo de acabado = Disco Dx = 9" Dy = 9"				Puntos de desbaste = 221 Puntos de acabado = 67 Número de Luciérnagas = 11 Número de Movimientos = 20 Número de Iteraciones = 2000			
Nº de réplicas	Desbaste			Acabado (cavidad simple)			Distancia total (Desbaste + Acabado)
	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	Distancia [in]	Iteraciones	Tiempo [Seg]	
1	110,4202	1308	227,062	26,1293	0	0	136,5495
2	111,6505	1983	312,641	26,1293	0	0	137,779
3	110,8302	1797	293,141	26,1293	0	0	136,959
4	111,6504	1162	197,641	26,1293	0	0	137,779
5	110,8302	1825	297,547	26,1293	0	0	136,959
6	110,8302	964	174,421	26,1293	0	0	136,959

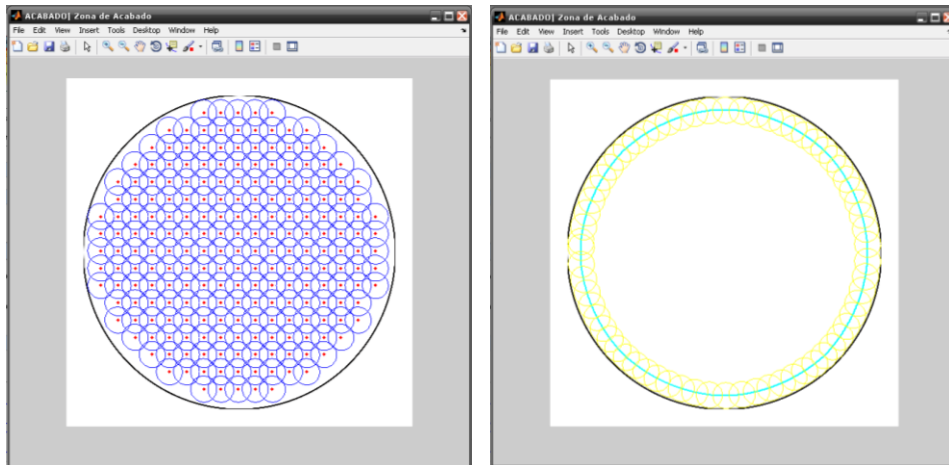
Fuente: Autores.

- **Descripción gráfica de los puntos y trayectoria de maquinado.** A continuación se muestra las gráficas que se obtuvieron de los puntos de maquinado mediante el software EDCA Firefly en el módulo “Procesamiento de Imagen” tanto para los procesos de desbaste y acabado (ver gráfica 113), también se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software EDCA Firefly en el módulo “Algorithm Firefly” tanto para el procesos de desbaste como para el proceso de acabado y finalmente el resultado final del maquinado

una vez se han realizado los dos procesos mencionados. Ver gráficas 114, 115 y 116.

- **Puntos de desbaste de y acabado resultado del procesamiento de imagen del software EDCA Firefly**

Gráfica 113. Puntos de Maquinado para el Círculo



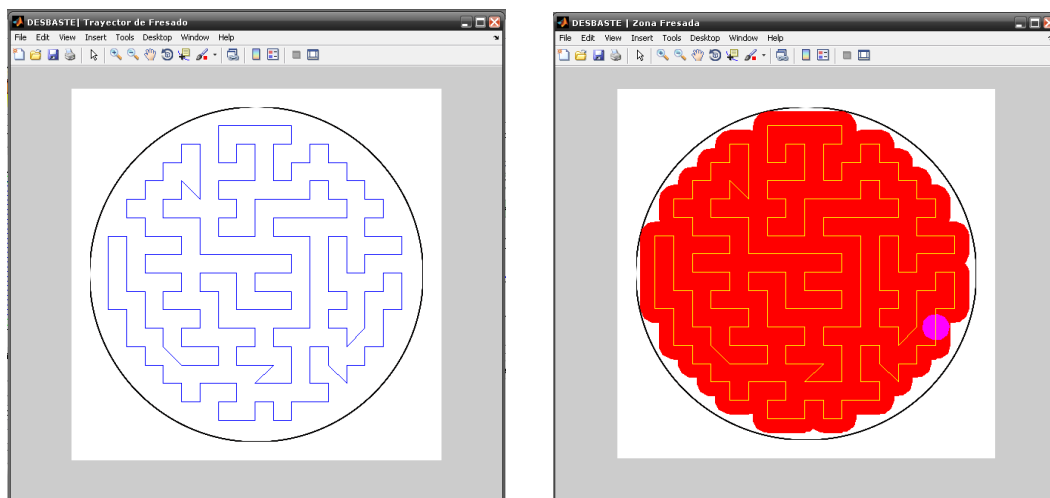
a. Puntos de Desbaste

b. Puntos de Acabado

Fuente: Autores

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 114. Proceso de Desbaste para el Círculo



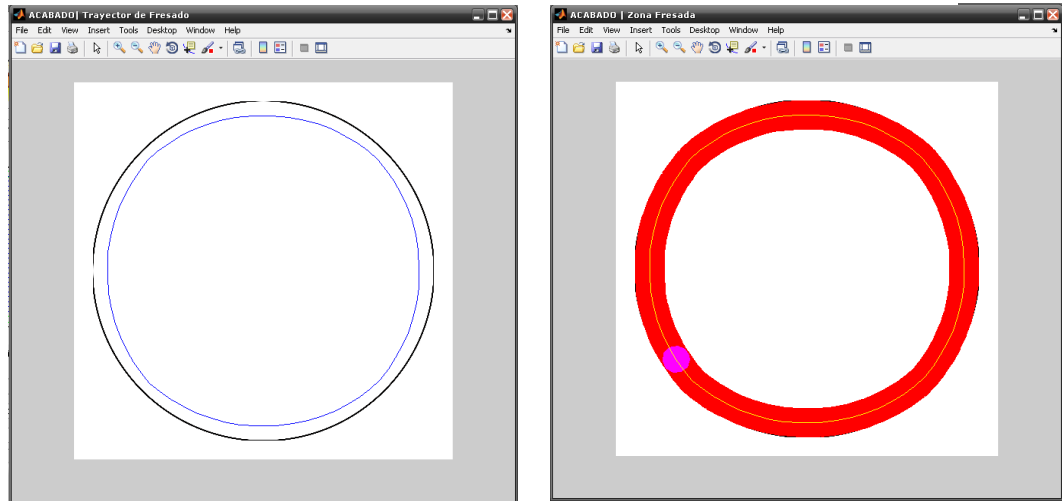
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Autores

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 115. Proceso de Acabado para el Círculo



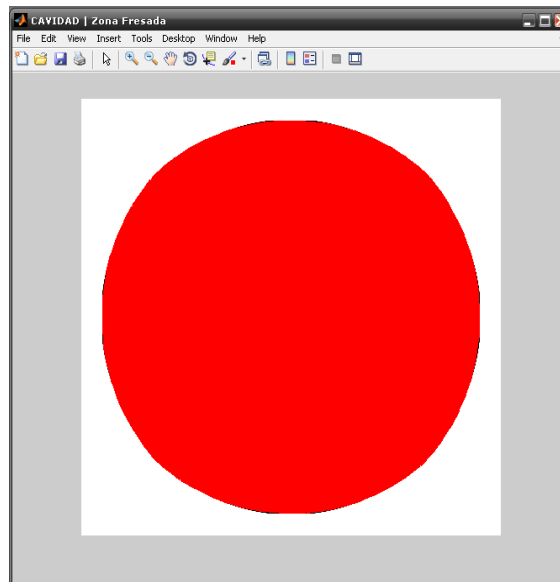
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Autores

- **Cavidad terminada resultado del software EDCA Firefly**

Gráfica 116. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Círculo



Zona Fresada

Fuente: Autores

**7.1.7.2 Trayectorias generadas por MasterCam.** El software MasterCam se pueden generar 8 métodos los cuales son Zigzag, Constant Overlap Spiral, Parallel Spiral, Parallel Spiral Clear Corners, Morph Spiral, High Speed, One Way y True Spiral; con cada uno de ellos se halla la longitud de la mejor trayectoria de mecanizado para observar cual es la más eficiente (resaltada en color Azul cielo); Ver tabla 46.

Tabla 46. Longitud de trayectorias generadas con MasterCam para el Círculo

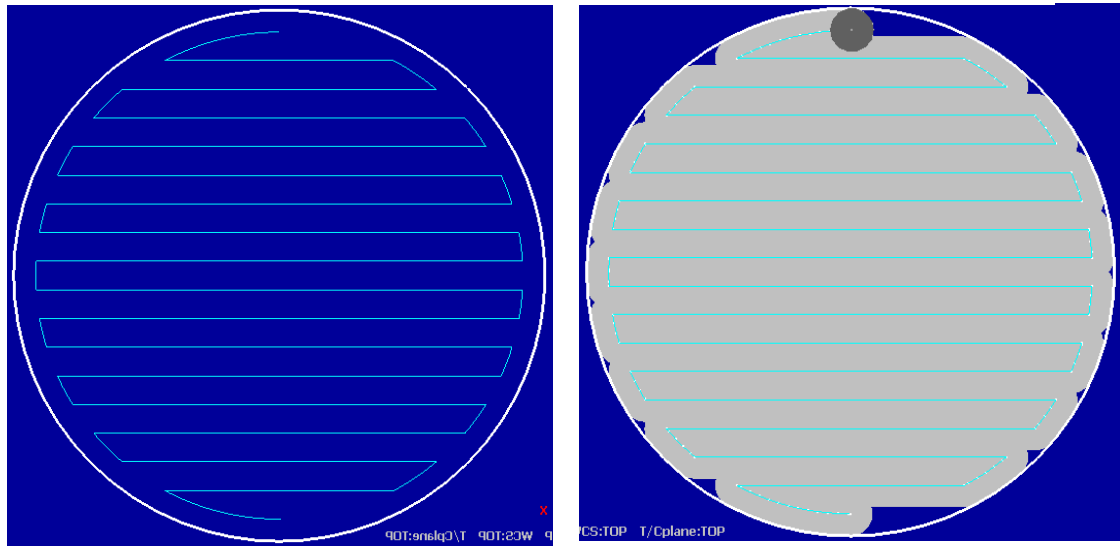
Distancias en MasterCam [in]			
Método de corte	Distancia desbaste	Distancia acabado	Distancia total
Zigzag	121,8488	26,3157	148,1645
Constant Overlap Spiral	148,7189	26,3157	175,0346
Parallel Spiral	125,6195	26,3157	151,9352
Parallel Spiral, Clean Corners	125,6195	26,3157	151,9352
Morph Spiral	135,421	26,3157	161,7367
High Speed	1332,3721	26,3157	1358,6878
One Way	128,6488	26,3157	154,9645
True Spiral	134,6757	26,3157	160,9914

Fuente: Autores.

- **Descripción gráfica de la trayectoria de maquinado.** A continuación se muestra la trayectoria de la herramienta fresadora hallado con el software MasterCam solo para el método de corte más eficiente (en éste caso Zigzag) hallado para los procesos de desbaste y acabado, y finalmente también se muestra el resultado final del maquinado una vez se han realizado los dos procesos mencionados. Ver gráficas 117, 118 y 119.

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de desbaste resultado del software MasterCam**

Gráfica 117. Proceso de Desbaste para el Círculo



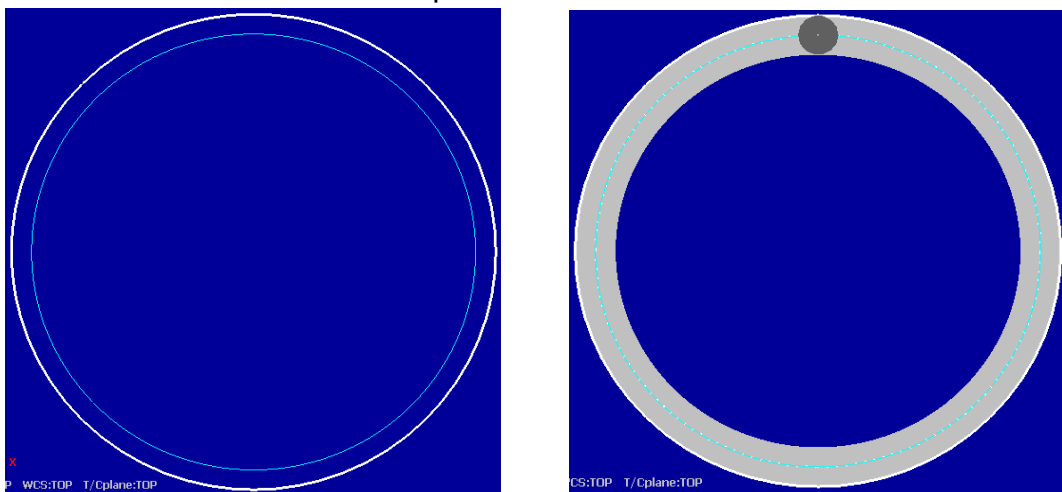
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

- **Recorrido de la herramienta fresadora en el proceso de acabado resultado del software MasterCam**

Gráfica 118. Proceso de Acabado para el Círculo



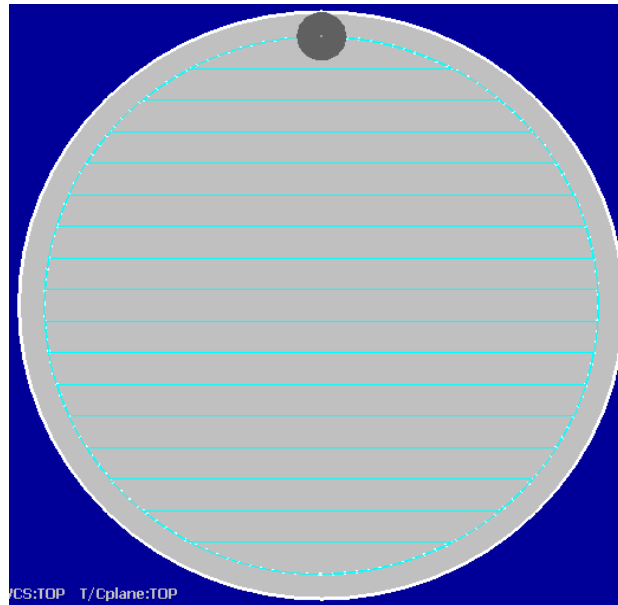
a. Trayectoria de Fresado

b. Zona Fresada

Fuente: Programa MasterCam

- **Cavidad terminada resultado del software MasterCam**

Gráfica 119. Cavidad Terminada: Acabado + Desbaste para el Círculo



Zona Fresada

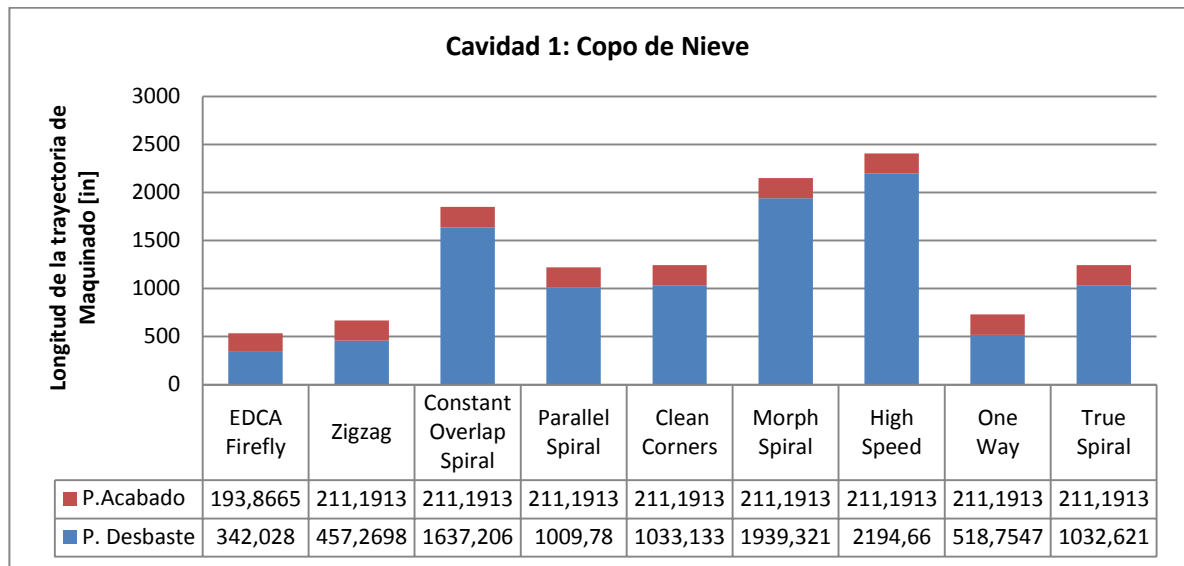
Fuente: Programa MasterCam

## 7.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE RESULTADOS

Análisis comparativo entre los valores de las ocho trayectorias de mecanizado que contiene la librería de MasterCam X5 (Zigzag, Constant Overlap Spiral, Parallel Spiral, Parallel Spiral Clear Corners, Morph Spiral, High Speed, One Way y True Spiral) y la longitud de la trayectoria obtenida con EDCA Firefly.

**7.2.1 Análisis de la Cavity 1: Copo de Nieve.** Esta prueba fue hecha con la geometría del Copo de Nieve, un diámetro de fresa de 3/8” y una distancia de puntos de 0.27 in obteniéndose las siguientes longitudes de las trayectorias.

Gráfica 120. Longitud de Trayectoria para el copo de Nieve



Fuente: Autores.

Comparando las longitudes de las trayectorias cuyo valor fue inferior mediante la utilización del software MasterCam X5 en este caso Zigzag, se denota que el software EDCA Firefly demostró mejor desempeño a tal punto de reducir la longitud de recorrido de la herramienta fresadora de la siguiente manera.

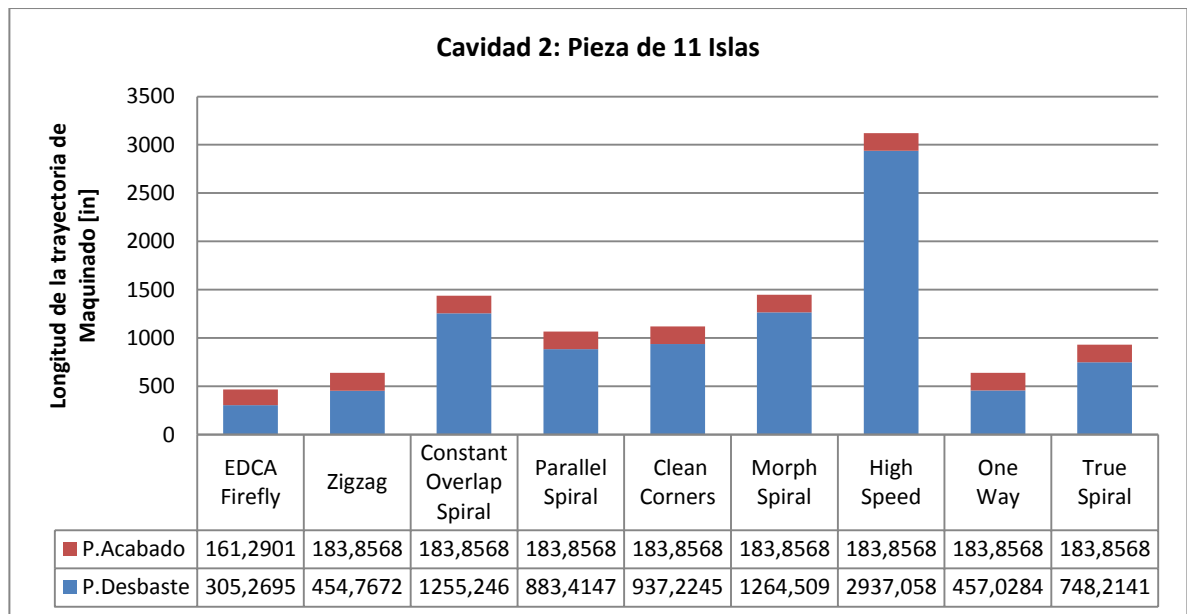
Tabla 47. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en el Copo de Nieve mediante el software EDCA Firefly

Longitud de recorrido de la herramienta fresadora [in] ahorrado mediante la simulación del software EDCA Firefly		
P. Desbaste	P. Acabado	Distancia Total
115,2418	17,3248	132,5666

Fuente: Autores.

**7.2.2 Análisis de la Cavidad 2: Pieza de 11 Islas.** Esta prueba fue hecha con la geometría de la pieza de 11 islas, un diámetro de fresa de 3/8” y una distancia entre puntos de 0.24 in obteniéndose las siguientes longitudes de las trayectorias.

Gráfica 121. Longitud de Trayectoria para la Pieza de 11 Islas



Fuente: Autores.

Comparando las longitudes de las trayectorias cuyo valor fue inferior mediante la utilización del software MasterCam X5 en este caso Zigzag, se denota que el software EDCA Firefly demostró mejor desempeño a tal punto de reducir la longitud de recorrido de la herramienta fresadora de la siguiente manera.

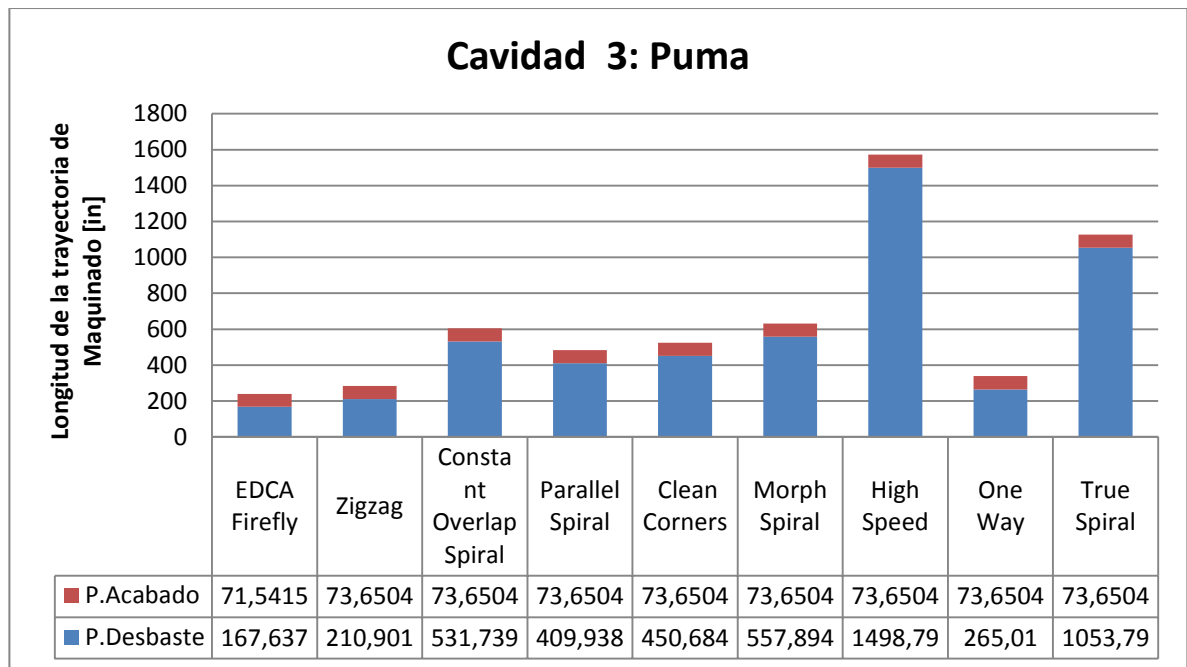
Tabla 48. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en la Pieza de 11 Islas mediante el software EDCA Firefly

Longitud de recorrido de la herramienta fresadora [in] ahorrado mediante la simulación del software EDCA Firefly		
P. Desbaste	P. Acabado	Distancia Total
149,4977	22,5667	172,0644

Fuente: Autores.

**7.2.3 Análisis de la Cavity 3: Puma.** Esta prueba fue hecha con la geometría del Puma, un diámetro de fresa de 1/4" y una distancia entre puntos de 0.16 in obteniéndose las siguientes longitudes de las trayectorias.

Gráfica 122. Longitud de Trayectoria para la Puma



Fuente: Autores.

Comparando las longitudes de las trayectorias cuyo valor fue inferior mediante la utilización del software MasterCam X5 en este caso Zigzag, se denota que el software EDCA Firefly demostró mejor desempeño a tal punto de reducir la longitud de recorrido de la herramienta fresadora de la siguiente manera

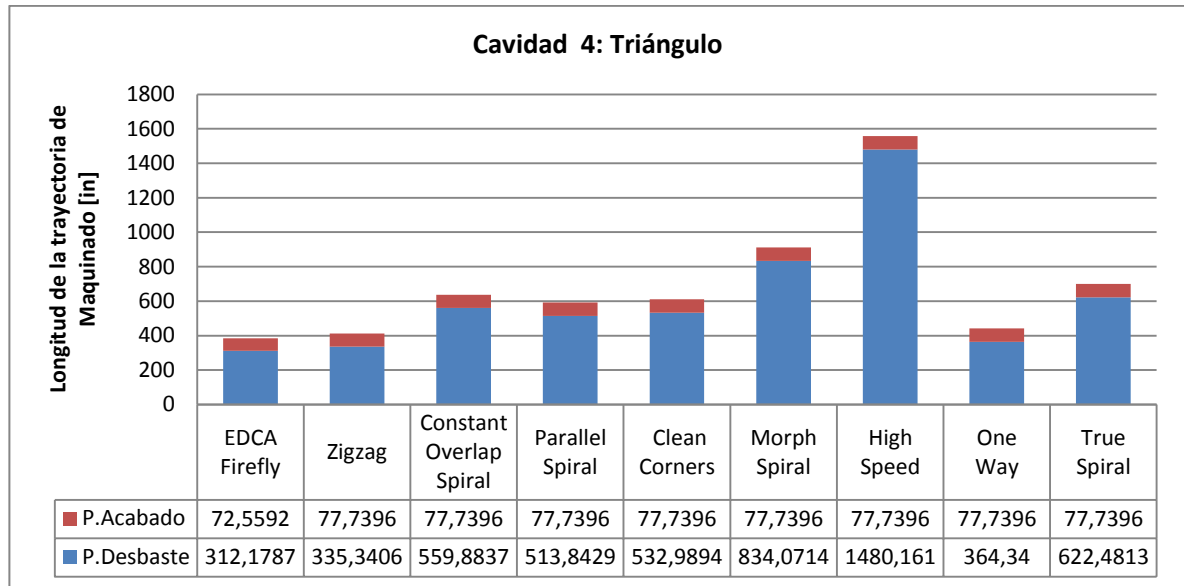
Tabla 49. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en el Puma mediante el software EDCA Firefly

Longitud de recorrido de la herramienta fresadora [in] ahorrado mediante la simulación del software EDCA Firefly		
P. Desbaste	P. Acabado	Distancia Total
43,264	2,1089	45,3729

Fuente: Autores.

**7.2.4 Análisis de la Cavidad 4: Triángulo.** Esta prueba fue hecha con la geometría del Triángulo, un diámetro de fresa de 3/8” y una distancia entre puntos de 0.24 in obteniéndose las siguientes longitudes de las trayectorias.

Gráfica 123. Longitud de Trayectoria para el Triángulo



Fuente: Autores.

Comparando las longitudes de las trayectorias cuyo valor fue inferior mediante la utilización del software MasterCam X5 en este caso Zigzag, se denota que el software EDCA Firefly demostró mejor desempeño a tal punto de reducir la longitud de recorrido de la herramienta fresadora de la siguiente manera.

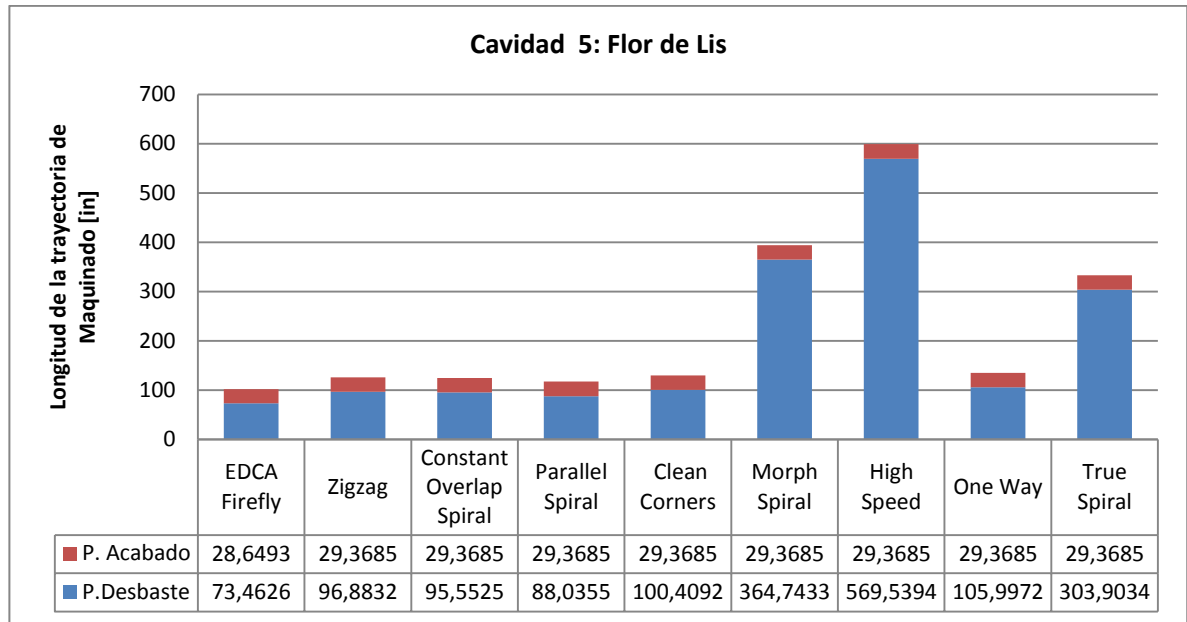
Tabla 50. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en el Triángulo mediante el software EDCA Firefly

Longitud de recorrido de la herramienta fresadora [in] ahorrado mediante la simulación del software EDCA Firefly		
P. Desbaste	P. Acabado	Distancia Total
23,1619	5,1804	28,3422

Fuente: Autores.

**7.2.5 Análisis de la Cavity 5: Flor de Lis.** Esta prueba fue hecha con la geometría la Flor de Lis, un diámetro de fresa de 1/4” y una distancia entre puntos de 0.16 in obteniéndose las siguientes longitudes de las trayectorias.

Gráfica 124. Longitud de Trayectoria para la Flor de Lis



Fuente: Autores.

Comparando las longitudes de las trayectorias cuyo valor fue inferior mediante la utilización del software MasterCam X5 en este caso Parallel Spiral, se denota que el software EDCA Firefly demostró mejor desempeño a tal punto de reducir la longitud de recorrido de la herramienta fresadora de la siguiente manera.

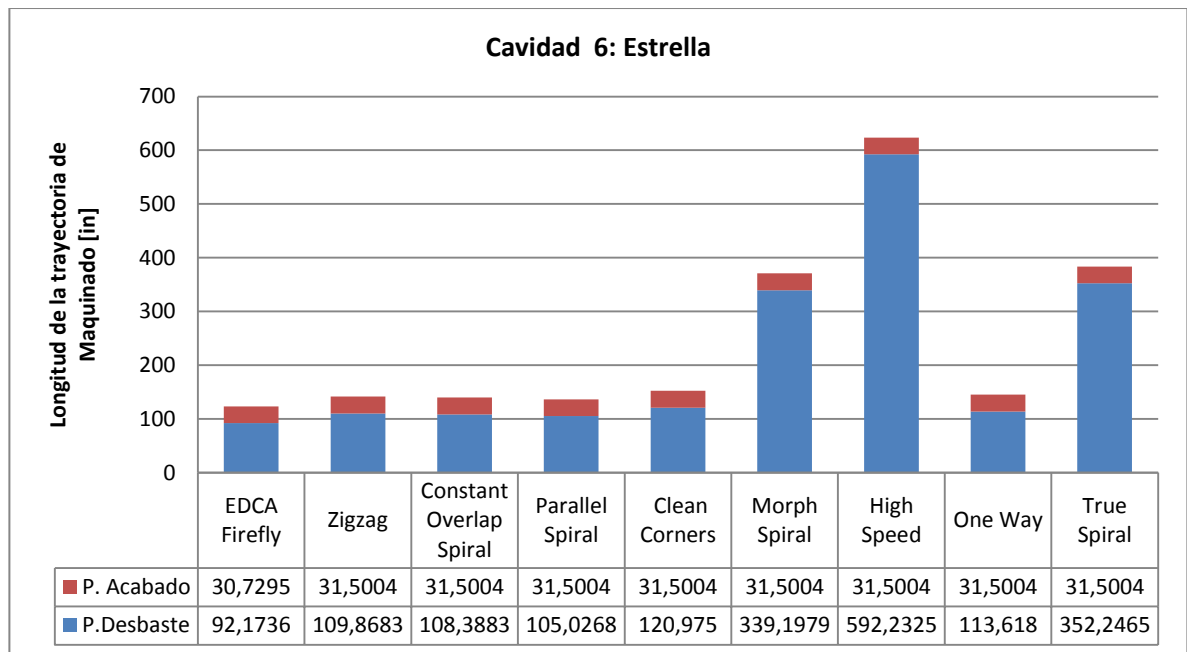
Tabla 51. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en la Flor de Lis mediante el software EDCA Firefly

Longitud de recorrido de la herramienta fresadora [in] ahorrado mediante la simulación del software EDCA Firefly		
P. Desbaste	P. Acabado	Distancia Total
14,5729	0,7192	15,2921

Fuente: Autores.

**7.2.6 Análisis de la Cavity 6: Estrella.** Esta prueba fue hecha con la geometría la Estrella, un diámetro de fresa de 1/4” y una distancia entre puntos de 0.16 in obteniéndose las siguientes longitudes de las trayectorias.

Gráfica 125. Longitud de Trayectoria para la Estrella



Fuente: Autores.

Comparando las longitudes de las trayectorias cuyo valor fue inferior mediante la utilización del software MasterCam X5 en este caso Parallel Spiral, se denota que el software EDCA Firefly demostró mejor desempeño a tal punto de reducir la longitud de recorrido de la herramienta fresadora de la siguiente manera.

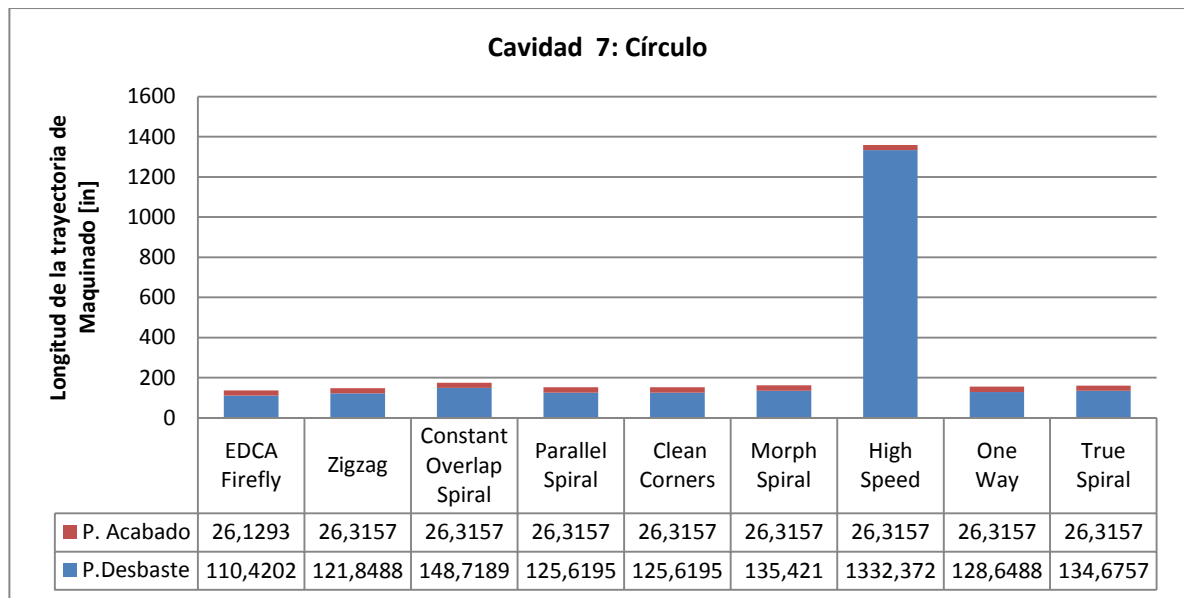
Tabla 52. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en la Estrella mediante el software EDCA Firefly

Longitud de recorrido de la herramienta fresadora [in] ahorrado mediante la simulación del software EDCA Firefly		
P. Desbaste	P. Acabado	Distancia Total
12,8532	0,7709	13,6242

Fuente: Autores.

**7.2.7 Análisis de la Cavidad 7: Círculo.** Esta prueba fue hecha con la geometría la Círculo, un diámetro de fresa de 3/4” y una distancia entre puntos de 0.495in obteniéndose las siguientes longitudes de las trayectorias.

Gráfica 126. Longitud de Trayectoria para la Círculo



Fuente: Autores.

Comparando las longitudes de las trayectorias cuyo valor fue inferior mediante la utilización del software MasterCam X5 en este caso Zigzag, se denota que el software EDCA Firefly demostró mejor desempeño a tal punto de reducir la longitud de recorrido de la herramienta fresadora de la siguiente manera.

Tabla 53. Longitud de trayectoria de mecanizado ahorrado en la Círculo mediante el software EDCA Firefly

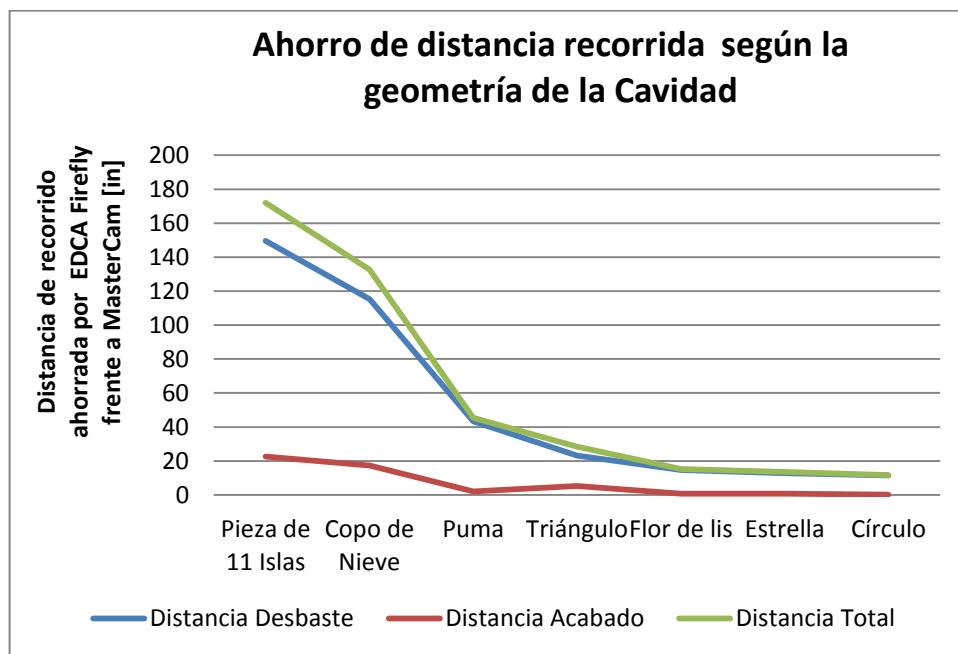
Longitud de recorrido de la herramienta fresadora [in] ahorrado mediante la simulación del software EDCA Firefly		
P. Desbaste	P. Acabado	Distancia Total
11,4286	0,1864	11,615

Fuente: Autores.

### 7.3 RENDIMIENTO DEL SOFTWARE EDCA Firefly SEGÚN LA GEOMETRÍA DE LA CAVIDAD

En la gráfica 127, se muestra la distancia de recorrido que la herramienta fresadora ahorra mediante la utilización del software EDCA Firefly frente a MasterCam teniendo en cuenta la configuración geométrica de las cavidades estudiadas.

Gráfica 127. Rendimiento de EDCA Firefly según la geometría de la Cavity



Fuente: Autores.

El software EDCA Firefly demuestra que realiza una longitud de la trayectoria para la herramienta de fresado muy inferior a la realizada por MasterCam X5 sobretodo en cavidades de configuración compleja (con muchas islas, contornos irregulares y estrechos), como sucede en las cavidades estudiadas llamadas Pieza de 11 Islas, Copo de Nieve, Puma y Triangulo, donde la contribución a la mejora del desempeño de EDCA Firefly se logra gracias a la reducción de la distancia recorrida en los procesos de Desbaste y Acabado, mientras que en piezas simples y sin islas la contribución de mejora de trayectoria en su totalidad

es debida al recorrido de Desbaste como sucede en las cavidades llamadas Flor de Lis, Estrella y Circulo. (Ver gráfica 127).

#### **7.4 CONTRIBUCIONES DEL SOFTWARE EDCA Firefly A LOS TIEMPOS DE PRODUCCIÓN EN EL MECANIZADO**

De los Tiempo de conmutación (Switch time), Tiempo de vuelo (Travel time) y Tiempo de corte (Cutting time) descritos ...en el capítulo 2..., e incluyendo tiempo de simulación de la trayectoria de mecanizado; el software EDCA Firefly tiene una especial injerencia en los tres últimos tiempos mencionados de la siguiente manera.

**Tiempo de vuelo (Travel time):** De las pruebas realizadas a las 7 cavidades estudiadas, solo en la cavidad llamada Puma fue necesario realizar retracción de la herramienta fresadora en un tramo corto, en el resto de simulaciones realizadas para los procesos de acabado y desbaste el maquinado fue continuo.

Otra de las ventajas que colaboran a que el tiempo de vuelo no se presente es que la trayectoria que el software EDCA Firefly es cerrada, por lo tanto en el punto que empieza el proceso de mecanizado es el mismo punto donde termina, lo cual evita desplazamiento innecesarios de posicionamiento de la herramienta cuando se realizan varias pasadas para realizar la profundidad de una cavidad, una desventaja que tiene MasterCam ya que su trayectoria es de contorno abierto.

**Tiempo de corte (Cutting time):** Ya que la longitud de recorrido de la herramienta fresadora en los proceso de acabado y desbaste obtenida mediante el software EDCA Firefly es de longitud inferior a la obtenida mediante MasterCam por tal razón el tiempo requerido para remoción de material de una cavidad es inferior.

**Tiempo de Simulación:** El máximo tiempo que se puede demorar el software EDCA Firefly en arrojar la trayectoria optima si se trabaja en el caso extremo de cavidades complejas con 1200 puntos de procesamiento, se puede encontrar dentro de un rango de 50 a 60 min, como se observó en las pruebas hechas a las 7 cavidades estudiadas, mientras que el software MasterCam el máximo tiempo que demora en encontrar la trayectoria es de 2 min.

A pesar de que el software MasterCam encuentra la trayectoria de mecanizado supremamente rápido en comparación al software EDCA Firefly, este tiempo en materia de producción pasa a un segundo plano si la cavidad que se desea maquinar se produce en grandes cantidades, ya que la simulación se realiza solo una vez y no representa costos para el usuario o empresa productora, mientras que los resultados de esa simulación en materia de longitud de la trayectoria son determinantes en el costo de producción de cavidades y en las ganancias del usuario o empresa.

Si se quiere disminuir el Tiempo de Simulación del software EDCA Firefly se puede realizar, si se utiliza un PC con un mejor procesador y memoria Ram con las cuales los autores realizaron las pruebas (Procesador Pentium Dual-Core 1.6Hz y memoria Ram de 1GB).

## 8. CONCLUSIONES

Se desarrolló una plataforma de software en el entorno de Matlab que tiene como aplicación final la optimización de trayectorias de mecanizado de cavidades mediante el proceso del fresado utilizando el algoritmo metaheurístico Firefly, contribuyendo en la misión de la Universidad Industrial de Santander de ser base de investigación y avance de la Industria Manufacturera en la mejora de sus procesos de producción.

La plataforma de software EDCA Firefly integra una serie de interfaces gráficas sencillas, intuitivas y fáciles de utilizar para el usuario que le permiten principalmente:

- ✓ Seleccionar el diámetro de la fresa con la que se quiere mecanizar con sus respectivas unidades.
- ✓ Modificar el porcentaje de sobre posición de los radios o distancia entre pasadas de la herramienta fresadora con el cual se quiere hacer el mecanizado de la cavidad para obtener una buena remoción de material sin que se presente cúmulos o valles que afecten la calidad de la pieza.
- ✓ Permite el reconocimiento y exportación de imágenes de cavidades, para su respectivo procesamiento e identificación de las áreas que se desean mecanizar.
- ✓ Obtener y visualizar en 2D y tiempo real las trayectorias óptimas para el fresado de cavidades de formas irregulares con islas (zonas no maquinables) o sin islas tanto para los proceso de acabado y desbaste.
- ✓ Da un informe de resultados en un documento de formato .txt que contiene, el diámetro de la fresa y la longitud de la trayectoria generada en la simulación del

software EDCA Firefly además de presentar las coordenadas en forma ordenada de los puntos que describen la trayectoria de mecanizado en los procesos de acabado y desbaste.

Al software se incorporó la documentación necesaria contenida en el Manual del Usuario en el que se explica en forma detallada las principales características, funciones y modo de uso del software el cual puede ser consultado por el usuario en cualquier momento.

El software desarrollado EDCA Firefly ha logrado la optimización de trayectorias de mecanizado por medio del algoritmo luciérnaga, lo cual ha hecho posible la reducción de las longitudes de recorrido que la herramienta fresadora realiza en los procesos de acabado y desbaste superando el desempeño del software comercial MasterCam.

El software EDCA Firefly ha logrado reducir los tiempos de producción (tiempo de vuelo y tiempo de corte) en un tiempo de simulación razonable, para el mecanizado de cavidades lo cual representa un menor costo de fabricación de piezas en las líneas manufactureras haciéndolas más competitivas a nivel industrial.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda estudiar previamente el manual del usuario antes de ejecutar cualquier módulo del software.

Se aconseja utilizar un PC con un mejor procesador y memoria Ram a la utilizada por los autores de este proyecto (Procesador Pentium Dual-Core 1.6Hz y memoria Ram de 1GB) o implementar tecnologías multinúcleo las cuales permite reducir tiempos de ejecución del software y reducir la complejidad computacional.

A futuro se recomienda la implementación a la plataforma software desarrollada, un código numérico conocido como código G que interactúe directamente con la máquina de Control Numérico por Computadora o CNC y permita desarrollar cavidades en forma física.

Fomentar el desarrollo de proyectos de grados orientados a la investigación que ayuden al avance de la Industria Manufacturera en la mejora de sus procesos de producción.

## BIBLIOGRAFÍA

ADAPTIVE AND INTELLIGENT SYSTEMS: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ICAIS 2011. (6-8, september, 2011: Klagenfurt, Austria). Evolutionary Discrete Firefly Algorithm for Travelling Salesman Problem. Bandung: Telkom Institute of Technology, 2011. p. 393-403.

GALVIS PARRA, Edgar y GONZALEZ ALMEIDA, Fabio Leonel. Aplicación de Redes Neuronales para la Optimización de la Trayectoria de la Herramienta en el Fresado de Cavidades Complejas. Trabajo de Grado Ingeniería Mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial del Santander. Facultad de Ciencias Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2012. 185 p.

GROOVER, MIKELL. P. Fundamentos de Manufactura Moderna. 3 ed. México: McGraw-Hill, 2007. 1022 p.

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y VARA SALAZAR, Román de la. Análisis y diseño de Experimentos. 2 ed. México: McGraw-Hill, 2008. 545 p.

JIMENO MORENILLA, Antonio Manuel. Modelo Topológico del proceso de fabricación: aplicado al compensado de herramienta. Tesis Doctoral. San Vicente del Raspeig: Universidad de Alicante. Departamentos de Tecnología Informática y de Computación, 2003. 289 p.

MEDINA RODRÍGUEZ, Nataly. Optimización de trayectorias para máquinas de control numérico mediante colonia de hormigas. Tesis de Maestría en Ciencias en Sistemas Digitales. Tijuana, B.C.: Instituto politécnico nacional. Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital, 2011. 163 p.

MIC2005: THE SIXTH METAHEURISTICS INTERNATIONAL CONFERENCE. (22-26, august, 2005: Vienna, Austria). Permutation distance measures for memetic algorithms with population management.

MINETTI, Gabriela F. Una Solución de Computación Evolutiva para el TSP, su posible aplicación en las organizaciones. Tesis de Magister en Automatización de Oficinas. La Plata: Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Informática. 2000. 104 p.

MUÑOZ, Mario A.; LÓPEZ, Jesús A. y CAICEDO, Eduardo F. Inteligencia de enjambres: sociedades para la solución de problemas (una revisión). En: Revista ingeniería e investigación. Agosto, 2008. vol. 28, no. 2, p. 119-130.

PLAZA LEIVA, Victoria. Implementación del algoritmo UEGO sobre el entorno Matlab como alternativa al toolbox de optimización. Trabajo Final de Máster de Informática y Automática Industrial. Almería: Universidad de Almería. Departamento de Arquitectura de Computadores y Electrónica, 2012, 30 p.

RODRÍGUEZ ORTIZ, Carlos. Algoritmos heurísticos y metaheurísticos para el problema de localización de Regeneradores. Proyecto fin de carrera en Ingeniería Informática Superior. Madrid: Universidad Rey Juna Carlos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática, 2010. 111 p.

SARABIA PÉREZ, Rubén. Modelo Morfológico Determinista: Aplicación para el diseño y la fabricación asistidos por ordenador. Tesis Doctoral. San Vicente del Raspeig: Universidad de Alicante. Departamentos de Tecnología Informática y de Computación, 2012. 229 p.

SERPELL, Martin and SMITH, James E. Self-Adaptation of Mutation Operator and Probability for Permutation Representations in Genetic Algorithms. In: Evolutionary Computation. August, 2010. vol. 18, no. 3, p. 491-514.

VIDAL ESMORÍS, Aitana. Algoritmos heurísticos en optimización. Trabajo fin de máster en Técnicas Estadísticas. Santiago de Copostela: Universidad de Santiago de Compostela. Facultad de Matemáticas, 2013. 94 p.

YANG, Xin-She. Nature-inspired metaheuristic algorithms. 2 ed. Cambridge: Luniver Press, 2010. 147 p.

ZANAKIS S. H. and EVANS. J. R. Heuristic "Optimization": Why, When, and How to use It. In: Interfaces, October, 1981. vol 11, no. 5, p. 84-91.

## **ANEXOS**

**ANEXO A**  
**MANUAL DE MASTERCAM**

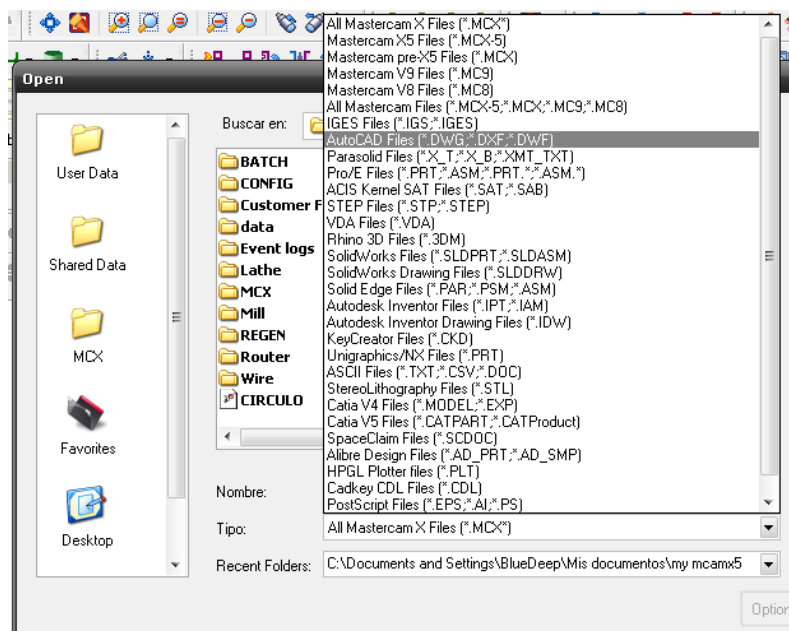
## MANUAL DE MASTERCAM

Este manual presenta una explicación breve del funcionamiento del software Mastecam, de la selección de la pieza a maquinar, diámetro de la fresa y su respectiva distancia entre puntos para la generación de la trayectoria de mecanizado tanto para desbaste como acabado.

Las piezas a maquinar se hicieron en CorelDraw en formato DWG para que Mastecam las detectara y pudiera generar las trayectorias de mecanizado.

Una vez abierto el programa de Mastecam, para seleccionar la imagen de la cavidad a mecanizar, hagan clic en la pestaña **file** y después en **open**; se abre un cuadro de dialogo en donde se selecciona la opción Tipo: **AutoCAD files (\*.DWG, \*.DXF, \*.DWF)** como se muestra en la gráfica 1, en donde el usuario puede localizar la pieza hecha en CorelDraw que desee mecanizar en cualquier lugar o Directorio de su PC.

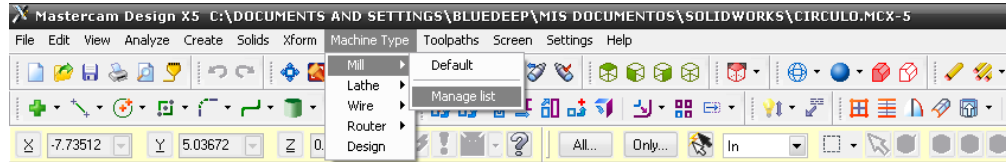
Gráfica 1. Ubicación y Selección de una Imagen



Fuente: Programa MasterCam

Una vez seleccionada la pieza a maquinar, se selecciona el tipo de maquina dando clic en la pestaña **Machine Type** y después en la opción **Mill** para el proceso de fresado en donde se escoge la opción **manage list** como se muestra en la gráfica 2.

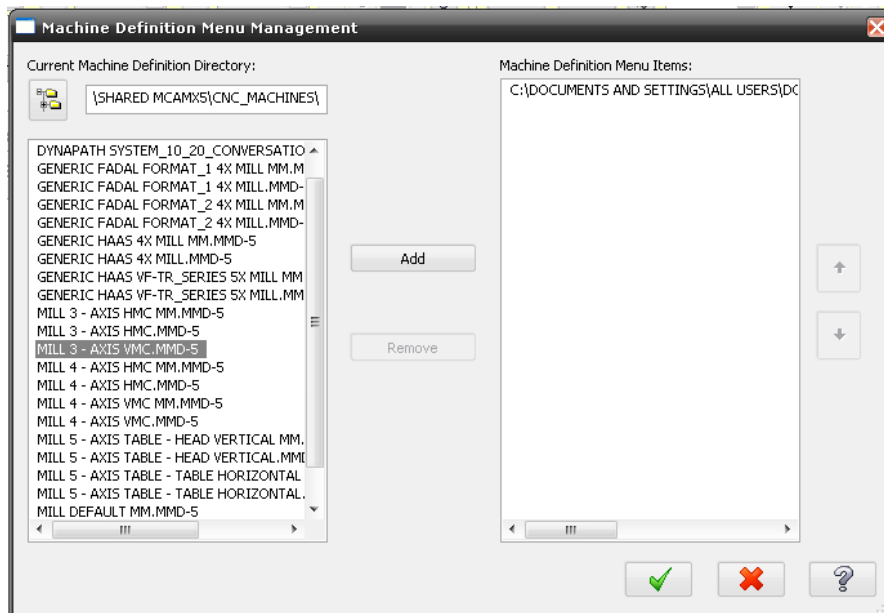
Gráfica 2. Ubicación e importación de la maquina fresadora



Fuente: Programa MasterCam

Después de dar clic en **Manage list**, se abre un cuadro de dialogo en donde se escoge el tipo de maquina fresadora, que en este caso es **Mill 3-AXIS VMC.MMD-5**. Como se muestra en la gráfica 3, que es una maquina fresadora con centro de mecanizado vertical (Vertical machining center: VMC) de 3 ejes. Después hagan clic en **Add** para importar la maquina en el menú de ítems y luego clic en el botón de aprobación (“chulito verde”).

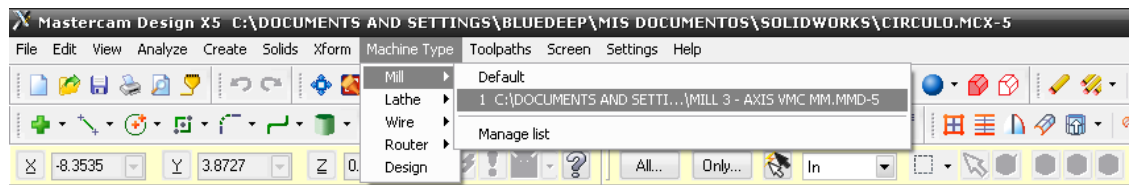
Gráfica 3. Importación de la maquina fresadora



Fuente: Programa MasterCam

Después de haber seleccionado el tipo de máquina, se vuelve a la pestaña **Machine Type** y después en la opción **Mill**, para seleccionar la maquina importada como se muestra en la gráfica 4.

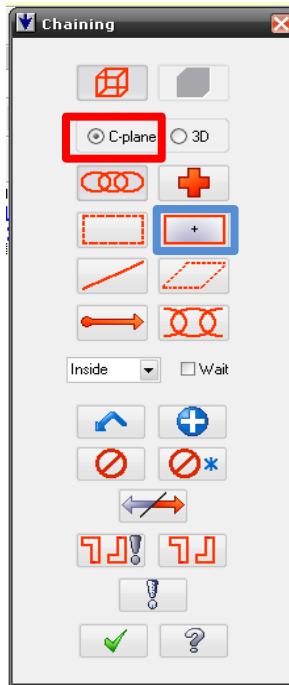
Gráfica 4. Selección de la maquina fresadora



Fuente: Programa MasterCam

Ya teniendo el tipo de maquina fresadora, se selecciona el tipo de proceso a mecanizar, que en este caso es fresado de cavidades, hacen clic en la pestaña **Toolpaths** y luego en **Poket...** en donde se abre un cuadro de dialogo, en donde se escribe el nombre del archivo a generar ej: fresado\_1 (generalmente aparece el nombre de la pieza), dan clic en el chulito y se abre un cuadro de dialogo llamado Chaining como se muestra en la gráfica 5.

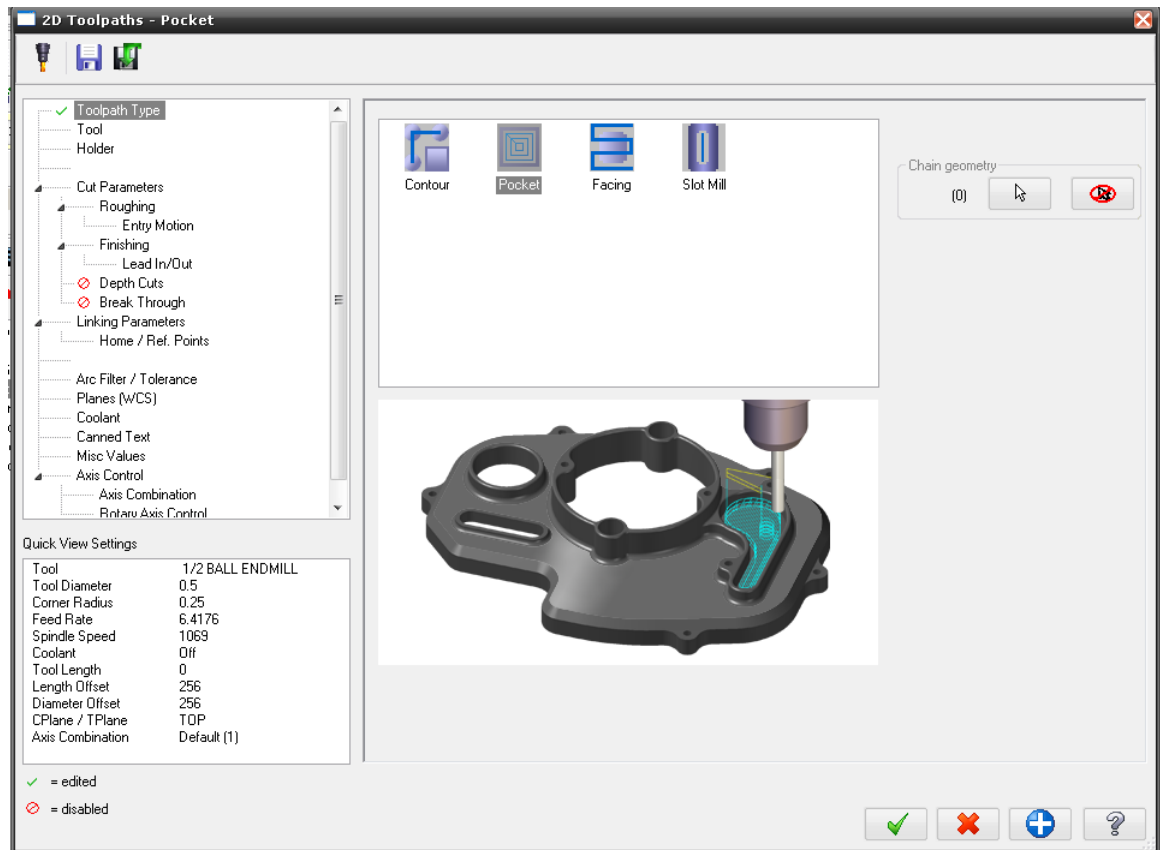
Gráfica 5. Selección del área a Mecanizar



Fuente: Programa MasterCam

En el cuadro de dialogo, haga clic en la opción C-plane (encerrada en el recuadro rojo) para figuras en 2D y luego dan clic segunda opción “Área” (encerrada en el recuadro Azul), y hagan clic en el área de la pieza donde se desea realizar el fresado de la pieza, después dan clic en el chulito y se abre una ventana con el nombre **2D Toolpaths-Pocket** como se muestra en la gráfica 6.

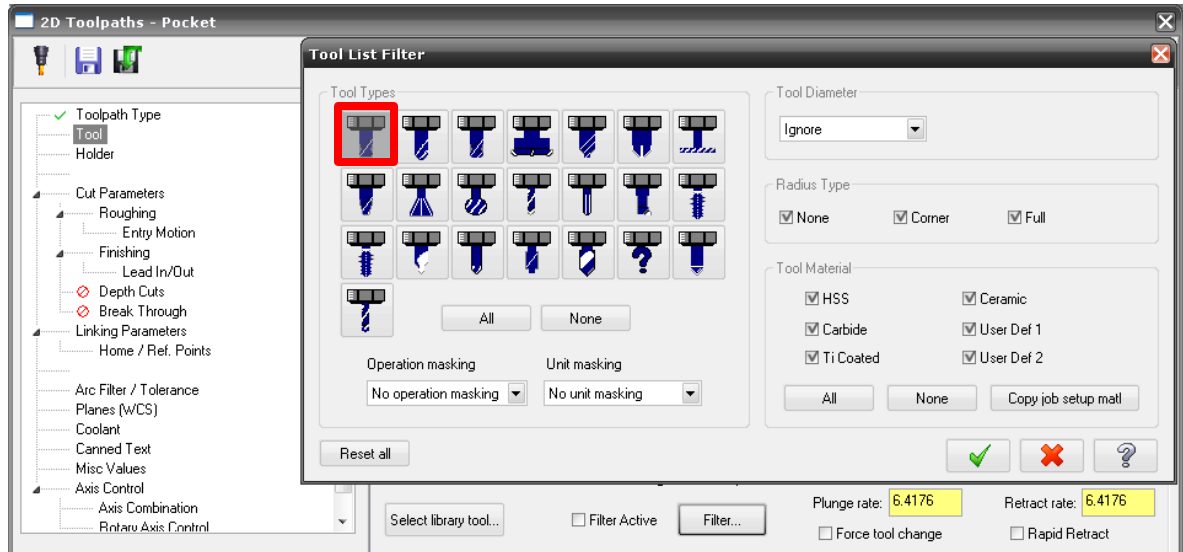
Gráfica 6. Ventana para selección de la fresa y la ruta de mecanizado



Fuente: Programa MasterCam

En esta ventana, hagan clic en la opción **Tool**, luego dan clic en el botón **Filter** y se abre una ventana como se muestra en la gráfica 7, hagan clic en el dibujo de la herramienta Flat (recuadro Rojo) que es el tipo de fresa para mecanizado de cavidades en superficies planas.

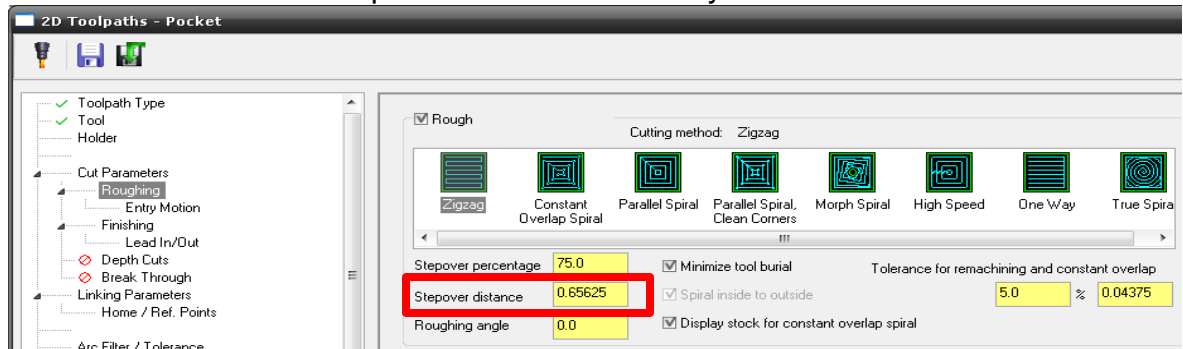
Gráfica 7. Selección del tipo de fresa para el mecanizado



Fuente: Programa MasterCam

Después de haber seleccionado el tipo de fresa para el mecanizado, hagan clic en el botón **Select library tool...** para escoger el diámetro de la fresa. Teniendo el tipo y diámetro de la fresa, hagan clic en la opción **Roughing**, se abre una ventana como se muestra en la gráfica 8, en donde se puede elegir 8 tipos de rutas de fresado de cavidades que son: Zigzag, Constant Overlap Spiral, Parallel Spiral, Parallel Spiral Clean Corners, Morph Spiral, High Speed, One Way y True Spiral; también se puede escribir la distancia entre centros de los diámetros de la fresa por la pasada de la herramienta (recuadro Rojo).

Gráfica 8. Selección del tipo de ruta a mecanizar y distancia entre centros

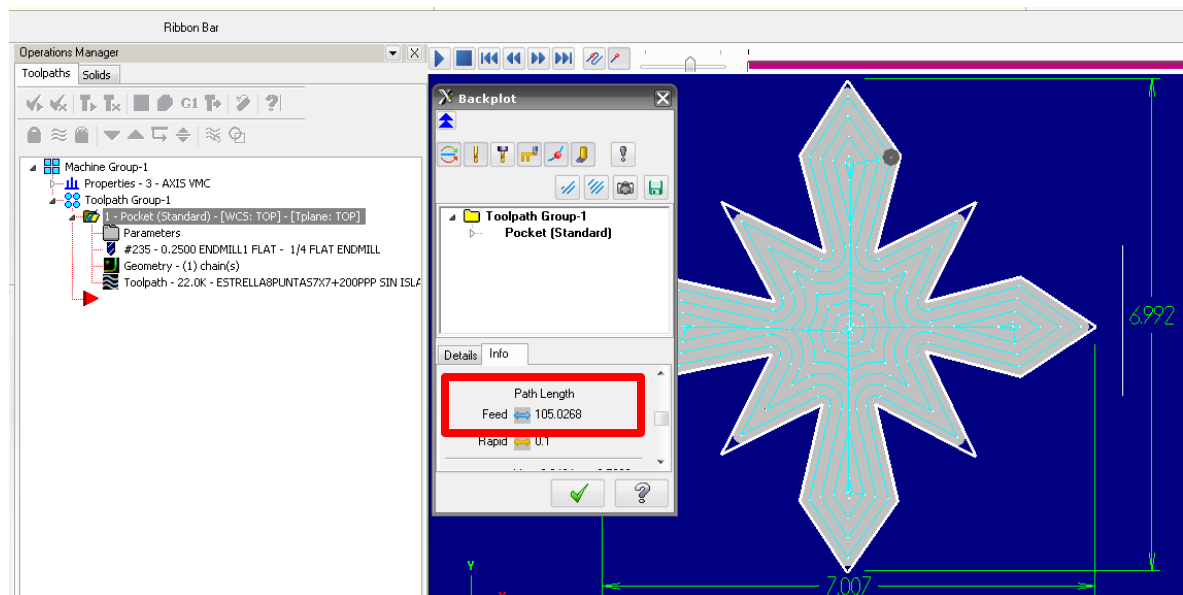


Fuente: Programa MasterCam

Teniendo el tipo de ruta y la distancia entre centros, para ver solo la ruta de desbaste de la pieza, van a la sección **Entry Motion** y hacen clic en la opción **off**, luego van a la sección **Finishing** y la desactivan, quitando el chulito en **Finishing** que está en la esquina superior izquierda, los mismo hacen con la sección **Lead In/Out**, por último, hacen clic en el chulito de la ventana **2D Toolpaths-Pocket**, para ver la trayectoria de desbaste de la pieza.

Para ver la distancia recorrida por la herramienta para el desbaste, van a la pestaña **View** y hacen clic en **Toggle Operations Manager** en donde aparece una ventana en la parte izquierda de Mastercam; hacen clic en **Toolpath** en donde se abre una ventana llamada **Backplot**, en la pestaña **Info** se muestra la distancia recorrida por la fresa como se observa en la gráfica 9 en donde se ve la distancia recorrida por una estrella (recuadro rojo) que tiene 7x7 pulgadas con un diámetro de fresa de 0,25 pulgadas, tipo de trayectoria Parallel Spiral y distancia entre centros de 0,16 pulgadas.

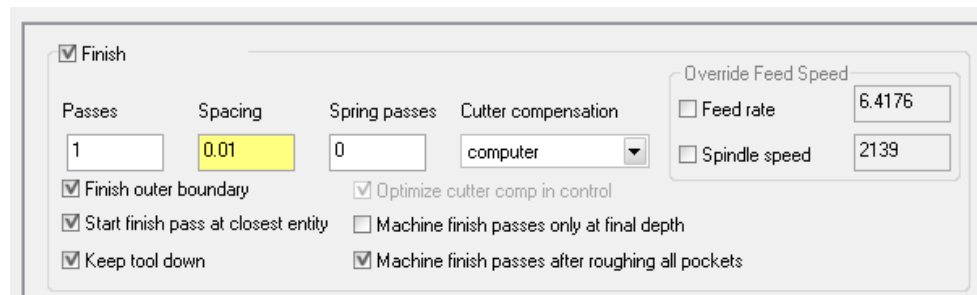
Gráfica 9. Distancia recorrida por la fresa para el desbaste



Fuente: Programa MasterCam

Para solo ver la ruta de acabado de la pieza, en la ventana abierta del lado izquierdo, hagan clic en **Parameters**, que abre la ventana **2D Toolpaths-Pocket** en donde se desactiva la opción **Roughing** quitando el chulito en **Roughing** que está en la esquina superior izquierda y habilitan la opción **Finishing**, habilitando las opciones como se muestra en la gráfica 10.

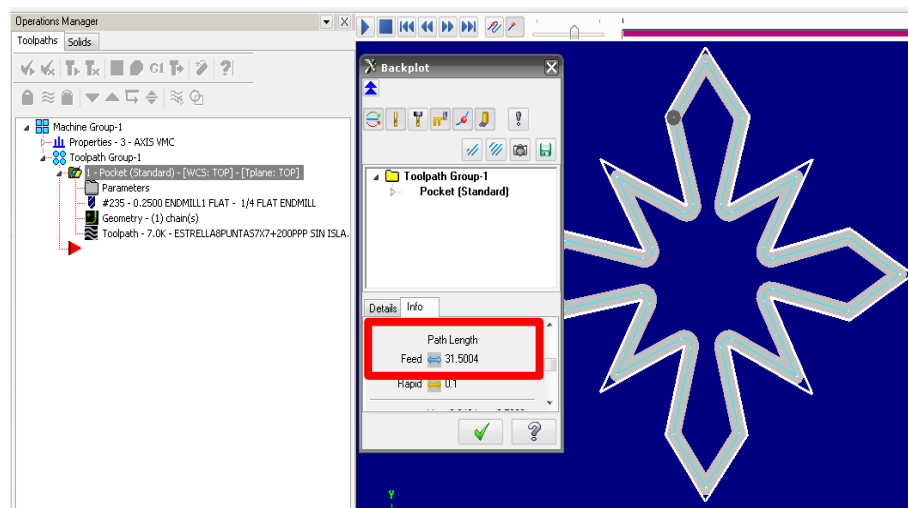
Gráfica 10. Opciones para el acabado de una pieza



Fuente: Programa MasterCam

Para ver la distancia recorrida por la fresa para el acabado, se sigue los mismos pasos que se hizo para ver la distancia recorrida por la herramienta para el desbaste, en la gráfica 11 se puede observar la distancia del acabado para el mismo ejemplo de la estrella.

Gráfica 11. Distancia recorrida por la fresa para el desbaste

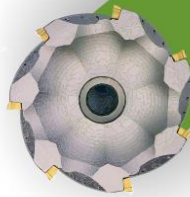
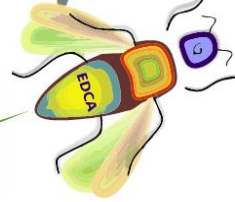


Fuente: Programa MasterCam

**ANEXO B**  
**MANUAL DE EDCA Firefly**

# “Firefly Algorithm”

para Optimización de Trayectorias de Mecanizado.



## Manual del Usuario

### EDCA

**Edwin Dario Cáceres Ramírez**  
**Carlos Andrés Padilla Cardenas**

## **MANUAL DE LA PLATAFORMA SOFTWARE PARA LA OPTIMIZACIÓN DE MECANIZADO DE CAVIDADES UTILIZANDO EL ALGORITMO LUCIÉRNAGAS “FIREFLY ALGORITHM”**



Este manual presenta una explicación del modo de uso del software para que el usuario cuente con una herramienta que facilite una interacción rápida y correcta con el programa cuando vaya a obtener la ruta óptima de mecanizado.

Se detalla el modo de ingreso al programa, el acceso y la utilización de cada uno de los módulos y la obtención de los resultados para el cual fue hecho este software. Aunque algunos de los módulos tienen la opción de ayuda donde se explica el uso del mismo, en el presente manual se muestra la utilización de todo el software por lo que se recomienda una lectura previa a la utilización del programa.

### **DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA SOFTWARE PARA LA OPTIMIZACIÓN DE MECANIZADO DE CAVIDADES UTILIZANDO EL ALGORITMO LUCIÉRNAGA “FIREFLY ALGORITHM”**

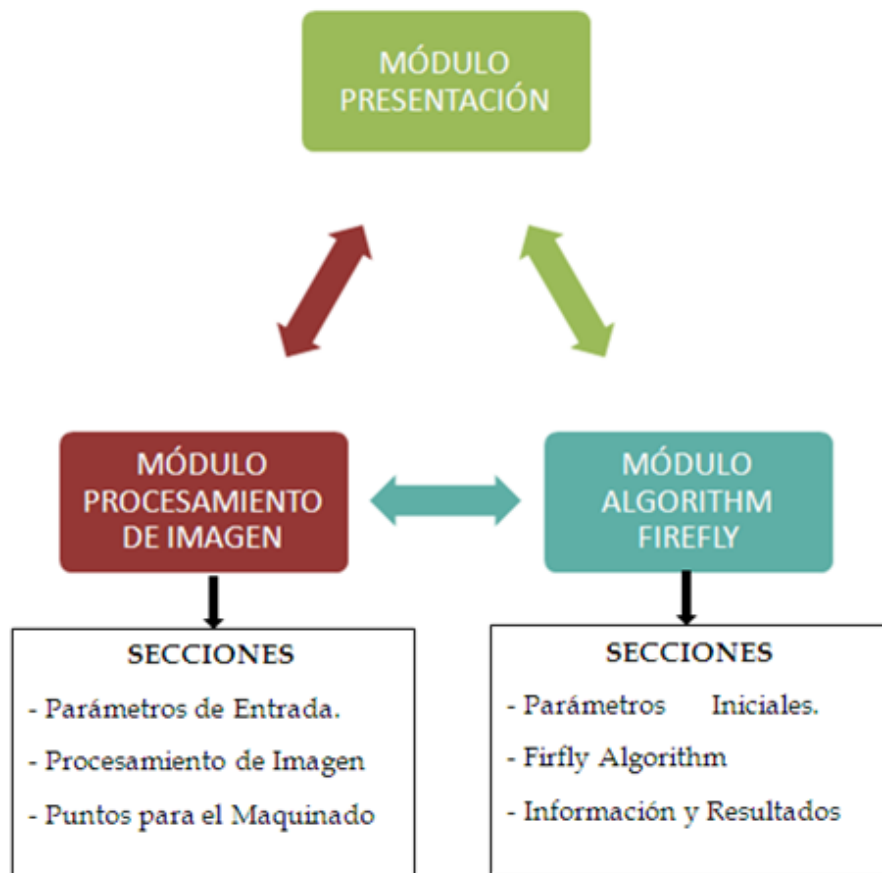
Esta plataforma computacional fue desarrollada con el fin de optimizar la ruta que debe realizar la herramienta fresadora para realizar los procesos de desbaste y acabado, con el objetivo de reducir los tiempos de operación de las máquinas convencionales o CNC, y por ende bajar costos; ya que el número de herramientas de corte utilizadas sería inferior, se podrían producir mayor cantidad de piezas en un lapso más corto, el producto se podría entregar justo a tiempo atendiendo la demanda del consumidor y además ayudaría a disminuir el consumo energético de las máquinas utilizadas para el mecanizado, lo cual conlleva a

mejorar la calidad del producto y hace competitiva y rentable la Industria Manufacturera de Cavidades por medio del proceso de Fresado.

## ESTRUCTURA DEL SOFTWARE

La plataforma software para la optimización de mecanizado de cavidades utilizando el algoritmo luciérnagas “firefly algorithm” consta de 3 módulos atractivos, intuitivos y fáciles de usar, interconectados unos con otros y 2 de ellos están divididos en 3 secciones cada uno (ver gráfica 1).

Gráfica 1. Estructura de la plataforma software para la optimización de mecanizado de cavidades utilizando el algoritmo luciérnagas “firefly algorithm”



Fuente: Autores

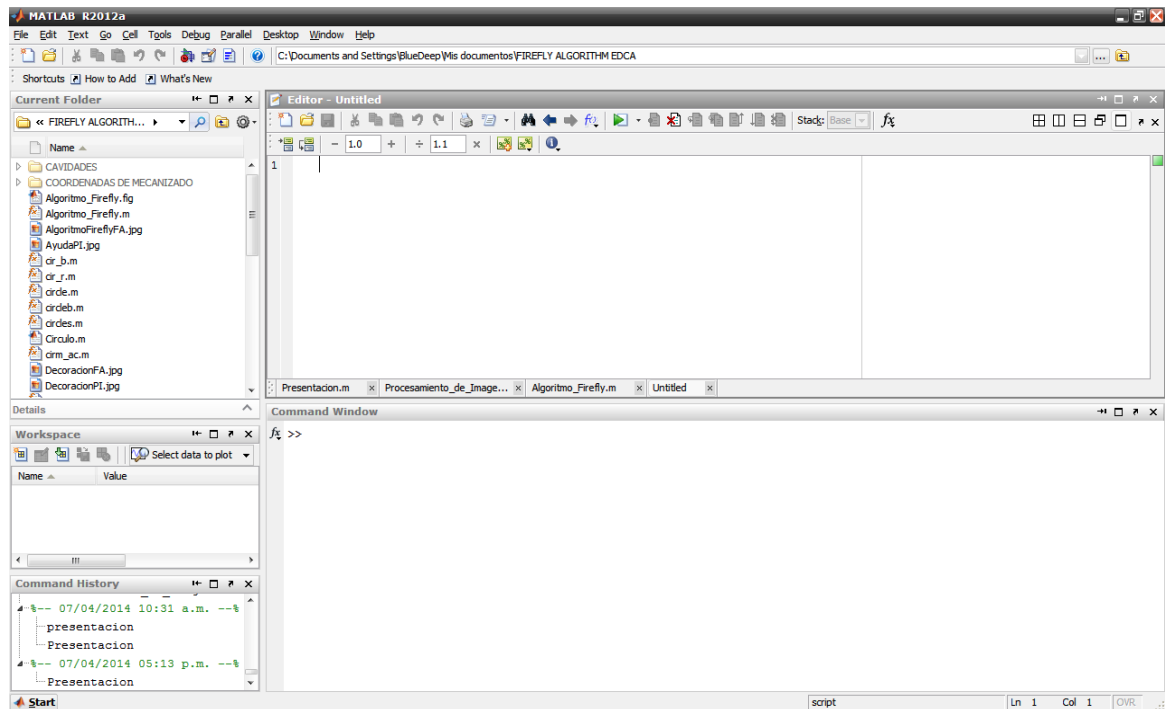
## FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE

La plataforma software para la optimización de mecanizado de cavidades utilizando el algoritmo luciérnagas “firefly algorithm” está desarrollada en Matlab mediante una serie de Interfaces gráficas (módulos) que guían al usuario de manera fácil e interactiva de manera que pueda obtener con éxito, el procesamiento de una cavidad para la obtención de una trayectoria optima de mecanizado de la misma.

### Presentación y Ejecución del software

- Para la ejecución del software es necesario abrir el entorno de Matlab (Ver gráfica 2).

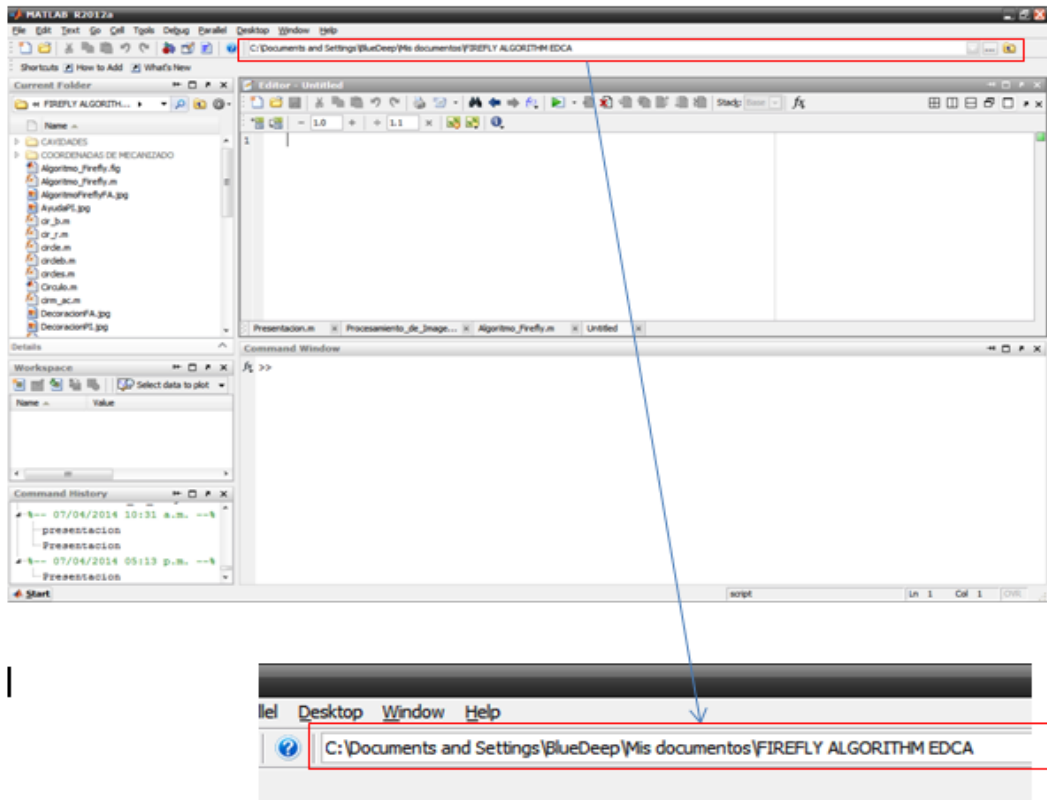
Gráfica 2. Plataforma de Matlab



Fuente: Autores

- Instalarse en el directorio donde se encuentra ubicada la carpeta FIREFLY ALGORITHM EDCA (Ver gráfica 3).

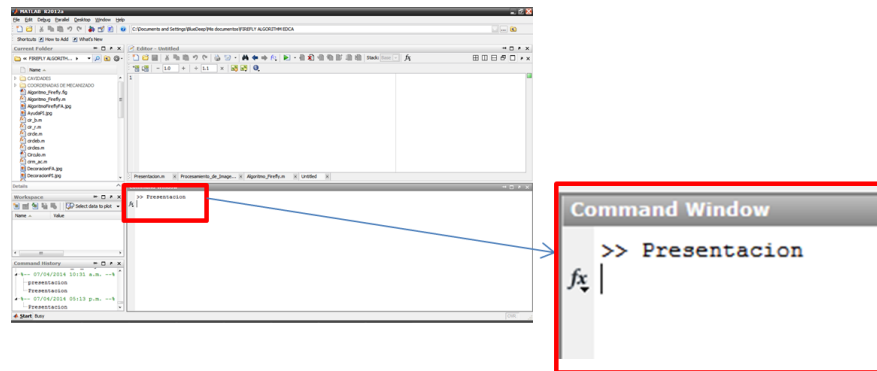
Gráfica 3. Ubicación del directorio “FIREFLY ALGORITHM EDCA”



Fuente: Autores

- Escribir en la línea de Comandos (Command Windows) “Presentacion” y esperar aproximadamente de 5 a 15 segundos mientras Matlab inicia la ejecución del programa y abre el Módulo Presentación el cual le da la bienvenida al usuario (Ver gráfica 4).

Gráfica 4. Comando de Inicio del Programa



Fuente: Autores

A continuación se explica por separado el contenido que tiene cada módulo de la y la forma como se debe utilizar.

## MÓDULO DE PRESENTACIÓN

La presentación del programa la cual se muestra en la gráfica 5, se observa una imagen donde se aprecia claramente el logo adoptado por los autores, que hace referencia al algoritmo luciérnaga y el objetivo para el cual se implementó el software.

La presentación del software cuenta con cuatro botones claramente visibles y de diferente color para facilitar su identificación, los cuales cumplen las siguientes funciones:

### Botón de Ayuda

Al oprimirlo suministra la información en formato PDF del funcionamiento y Uso del software o módulo en que se encuentre.

## Botón de Procesamiento de Imagen

Al oprimir este botón direcciona al usuario hacia el módulo llamado Procesamiento de Imagen, cuyo objetivo es obtener los puntos maquinables de acabado y desbaste resultado de un proceso de reconocimiento de la imagen de una cavidad teniendo en cuenta la geometría de la herramienta fresadora.

Gráfica 5. Módulo de Presentación



Fuente: Autores

## Botón de Algorithm Firefly

Al oprimir este botón direcciona al usuario hacia el módulo llamado Algorithm Firefly, cuyo objetivo es obtener el orden de los puntos coordenados para que la herramienta fresadora realice el maquinado en una ruta de menor distancia posible, pero cabe destacar que en este módulo no se podrá realizar ninguna operación sin antes haber completado el módulo de procesamiento de Imagen, por tal razón se le sugerirá al usuario en éste módulo mediante un mensaje que

primero se direcciona y completa la información referente al módulo de procesamiento de Imagen.

### Botón SALIR

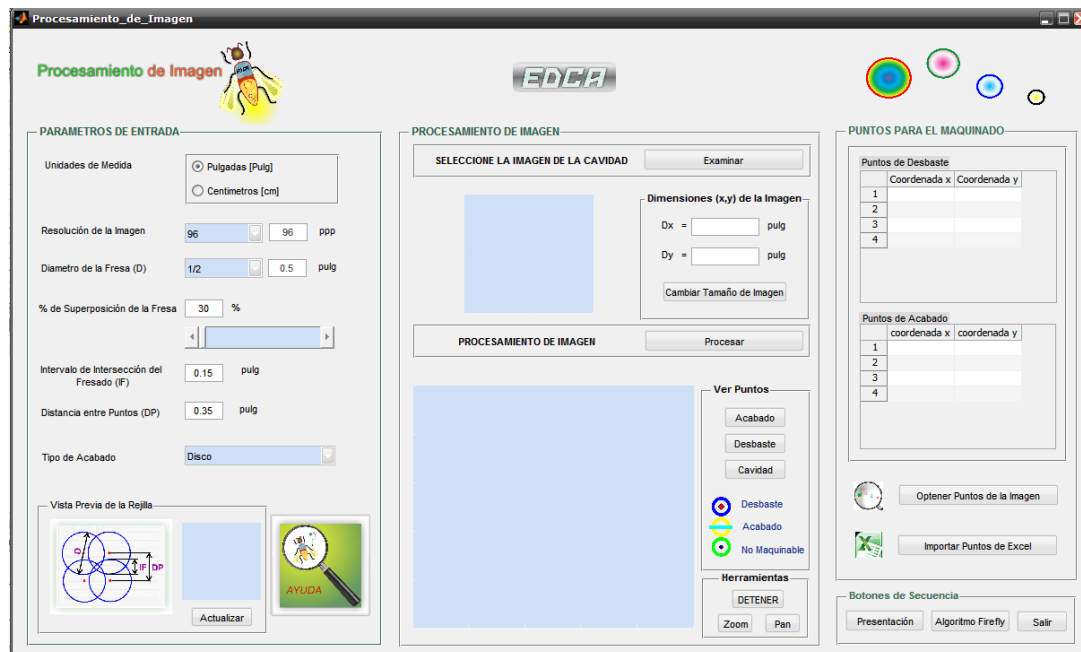
Al oprimir este botón el usuario cierra el módulo en el cual se encuentra y borrando todo tipo de información que se haya obtenido, por tal razón el programa pregunta si desea cerrar o continuar en el módulo.

Nota: Cabe aclarar que el módulo de presentación puede tardar aproximadamente de 5 a 15 segundos en aparecer visible para el usuario.

## MÓDULO PROCESAMIENTO DE IMAGEN

Esta interfaz se abre al usar el botón “*Procesamiento de Imagen*”. La apariencia de este Módulo se puede apreciar en la gráfica 6.

Gráfica 6. Módulo Procesamiento de Imagen

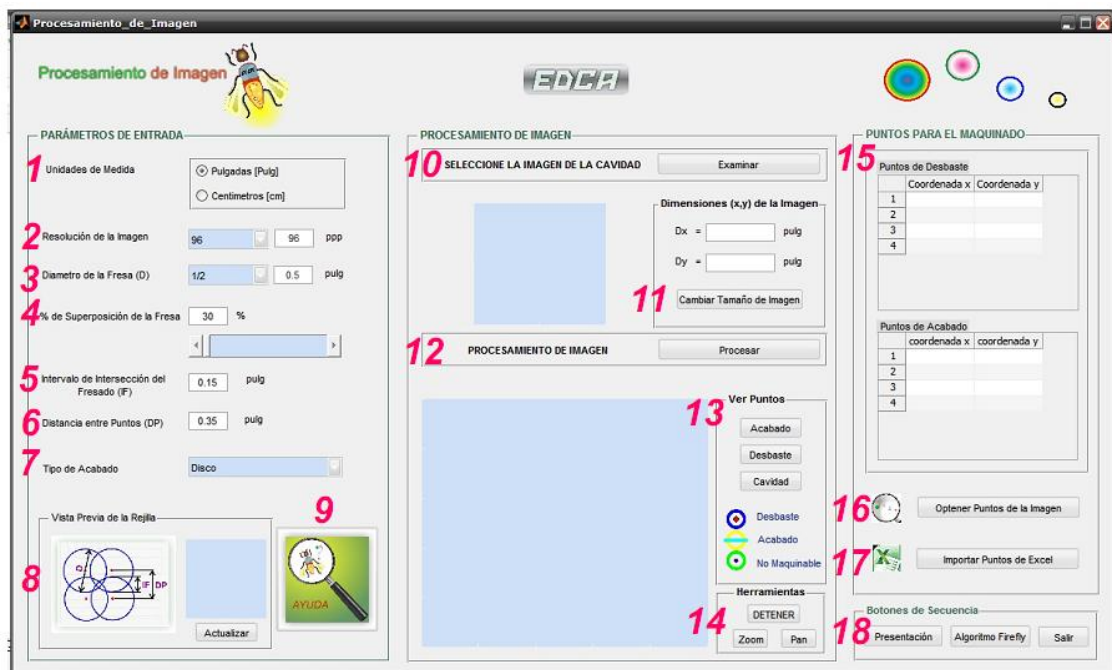


Fuente: Autores

Este módulo cuenta con 3 secciones importantes llamadas Parámetros de Entrada, Procesamiento de Imagen y Puntos para el Maquinado las cuales deben ser llenadas por el usuario en el orden con que fueron nombradas, preferiblemente de arriba hacia abajo o siguiendo la enumeración mostrada en la gráfica 7, cabe destacar que se debe dar toda la información que se le pida para que el software pueda realizar el procesamiento de imagen sin inconvenientes, pero si falta algún dato se le informara al usuario mediante un mensaje que lo referencie.

A continuación se explica cada una de las 3 secciones del presente módulo de acuerdo a la enumeración que se observa en la gráfica 7, de esta forma se facilita al usuario la búsqueda de la región en la que se encuentra la duda.

Gráfica 7. Regiones Enumeradas del Módulo Procesamiento de Imagen

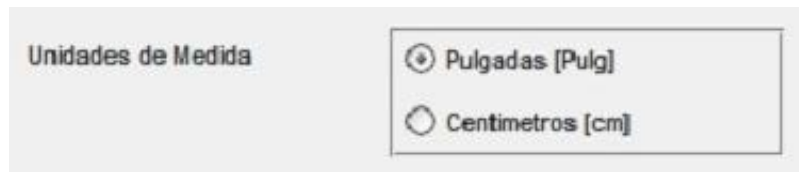


Fuente: Autores

## SECCIÓN 1: PARÁMETROS DE ENTRADA

1. **Unidades de Medida:** Aquí se selecciona si las dimensiones de la fresa de maquinado y la longitud de la ruta de maquinado se desea hacer en el sistema inglés (pulgadas) o en el sistema métrico (centímetros). (ver gráfica 8).

Gráfica 8. Unidades de Medida

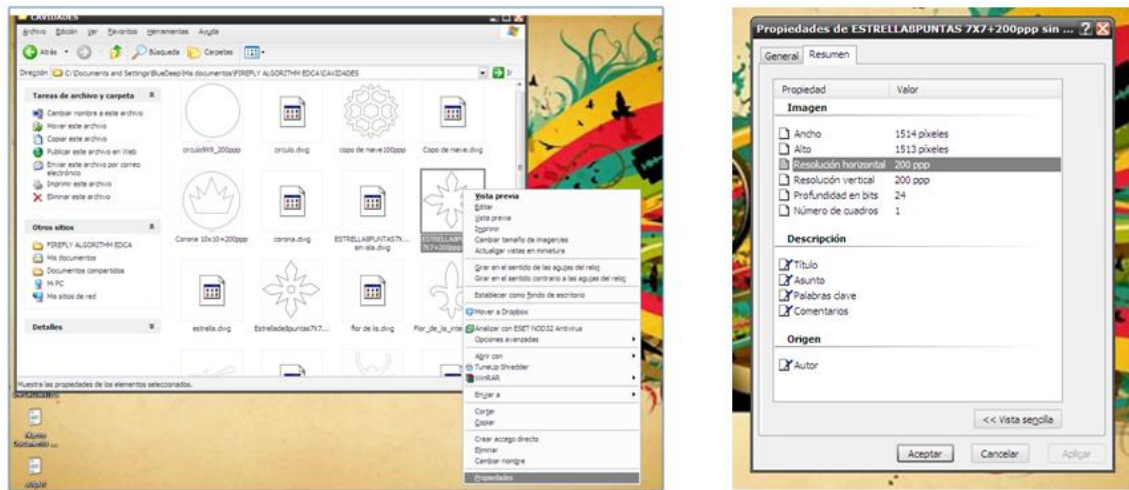


Fuente: Autores

2. **Resolución de la Imagen:** La resolución de la Imagen se refiere a cuantos pixeles por pulgada (ppp) tiene una imagen que no es igual para todos los casos y por tal razón se recomienda seguir los siguientes pasos para determinar su valor antes de continuar con el procesamiento de Imagen.

- Ubicar la dirección de la imagen.
- Dar clic derecho sobre la imagen y seleccionar la opción propiedades.
- Se despliega un cuadro con dos pestañas, dar clic en la pestaña “resumen” donde se podrá observar la resolución de la imagen como se observa en la gráfica 9, que en este caso es de 200ppp.

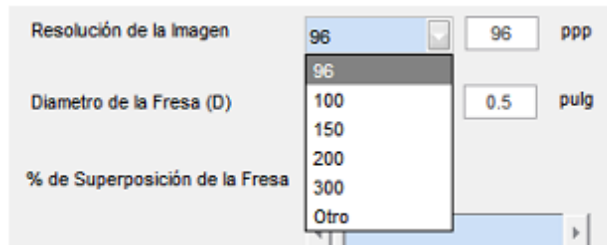
Gráfica 9. Pasos para determinar los pixeles de una Imagen



Fuente: Autores

Dependiendo del número de pixeles que tenga la imagen el usuario debe seleccionar los el número de pixeles que tiene la imagen a procesar por medio de los datos suministrados en la lista mostrada en la gráfica 10, pero si no se encuentra el valor en dicha lista, lo puede suministrar por medio de la opción “otro”.

Gráfica 10. Resolución de la Imagen



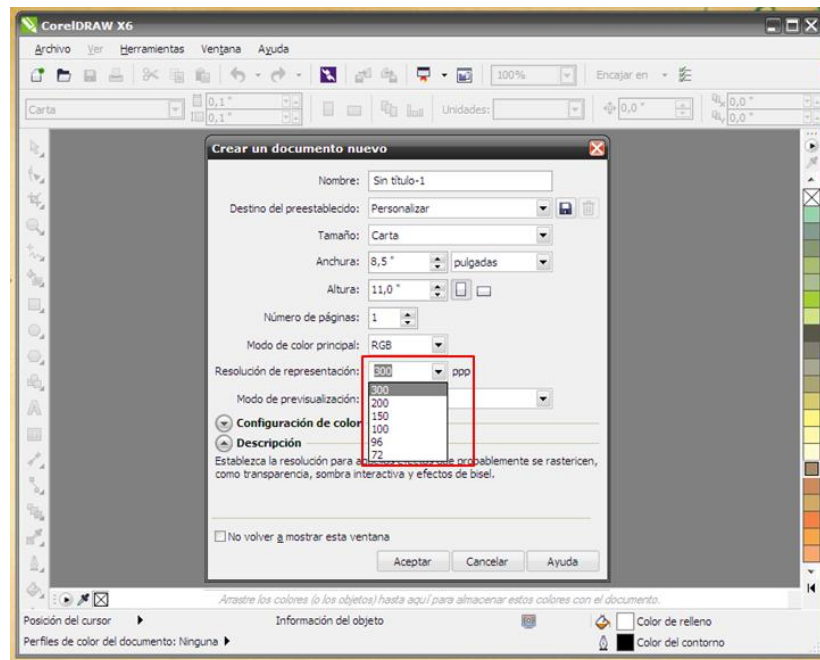
Fuente: Autores

La resolución de la imagen es un dato importante ya que esta determina la precisión del software por tal razón se recomienda valores superiores o iguales a 100, 200 o 300 ppp, cabe destacar que si utiliza una resolución superior a 200 ppp

la imagen debe ser pequeña (8x8 pulg) ya que si el PC cuenta con poca memoria RAM no será leída y procesada por el software por ser insuficiente.

Dependiendo el software que se escoja para realizar el diseño de la Imagen de la cavidad que pueden ser SolidWork o CorelDraw, los autores utilizaron este último ya que es una herramienta poderosa para realizar figuras con formas irregulares, y las dimensiones que se le son dadas en CorelDraw son las mismas que adquiere el software EDCA Firefly sin necesidad de realizar una redimensionamiento de Imagen<sup>35</sup> además de que se tiene la posibilidad de definir la resolución con la cual se desea realizar la imagen de la cavidad cuando se inicia un nuevo proyecto, como se señala en la gráfica 11, mientras con SolidWork tan solo se obtiene una resolución de imagen de 96 ppp que representa una mala calidad.

Gráfica 11. Definición de la Resolución de una Imagen en CorelDRAW

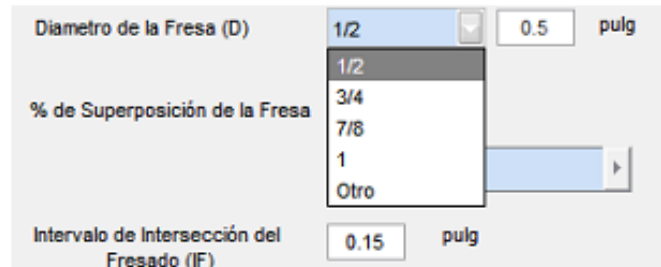


Fuente: Autores

<sup>35</sup> Ver Redimensionamiento de Imagen (Numeral 11 de este Manual)

**3. Diámetro de la Fresa de Maquinado:** Aquí el usuario tiene la posibilidad de seleccionar dentro de una lista algunos diámetros de fresa de ámbito comercial como se muestra en la gráfica 12, pero si no se encuentra el valor en dicha lista lo puede suministrar por medio de la opción “otro”.

Gráfica 12. Diámetros de Fresa



Fuente: Autores

En la tabla 1 se enlista una serie de diámetros de fresa comerciales, para que el usuario pueda escoger la fresa que desee.

Tabla 1. Diámetros de Fresa Estándar en Pulgadas y Centímetros

Diámetros de Fresa Estándar			
Pulgadas		Centímetros	
2	7/16	2,5	1,2
1-1/2	13/32	2,4	1,1
1-3/16	3/8	2,3	1
1	5/16	2,2	0,9
7/8	1/4	2,1	0,8
13/16	3/16	2	0,7
3/4	5/32	1,9	0,6
23/32	1/8	1,8	0,5
5/8	3/32	1,7	0,4
17/32	1/16	1,6	0,3
1/2	1/32	1,5	0,2
		1,4	0,1
		1,3	

Fuente: Programa MasterCam X5

**4. Porcentaje (%) de Superposición de la Fresa:** Como su nombre lo indica es el porcentaje de superposición entre dos radios de fresa; su valor puede variar desde un 30% hasta un 50% de superposición ya que es un intervalo que deja un buen desbaste y acabado sin imperfecciones o zonas sin maquinar (ver gráfica 13).

Gráfica 13. Porcentaje de Superposición de la Fresa



Fuente: Autores

**5. Intervalo de Intersección del Fresado (IF):** Es la distancia de intersección entre dos radios de fresa, este valor lo determina el software automáticamente y no puede ser modificado por el usuario.

**6. Distancia entre puntos (DP):** Es la distancia que se le asigna a dos puntos dentro de la rejilla de maquinado que se describe en el numeral 8 de este Manual y muestra en la gráfica 15, este valor lo determina el software automáticamente y no puede ser modificado por el usuario.

**7. Tipo de Acabado:** El software presenta una lista de acabados que son: Acabado Disco, Cuadrado, Rombo o Sin Acabado (ver gráfica 14). El usuario puede seleccionar a su conveniencia el acabado que desee, pero dependiendo de la forma que contenga la cavidad, un tipo de acabado llega a ser mejor que otro.

Se recomienda utilizar acabado Disco en Cavidades con muchas formas redondeadas, el acabado Rombo en cavidades que contengan esquinas o formas puntiagudas, el acabado cuadrado en cavidades de forma rectangular, la opción

sin acabado se puede utilizar en piezas que no se necesite gran calidad de mecanizado.

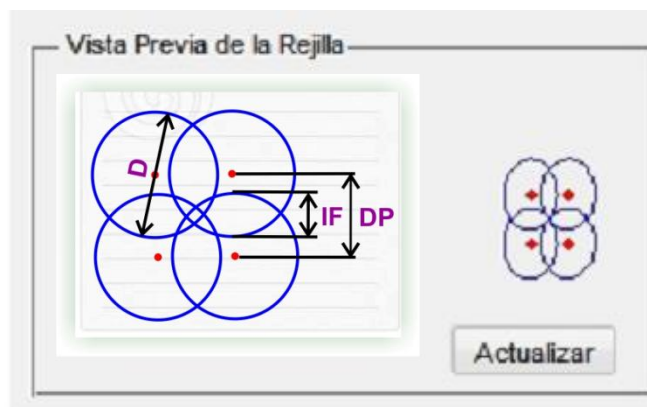
Gráfica 14. Tipos de Acabado



Fuente: Autores

**8. Rejilla:** La rejilla es una configuración en forma de cuadrícula que tiene una distancia entre puntos (DP) la cual está dada según el Diámetro de la fresa y el % de superposición entre las fresas (ver gráfica 15), a medida que se modifican los parámetros mencionados (D y DP) se puede observar cómo se actualiza en tiempo real la rejilla.

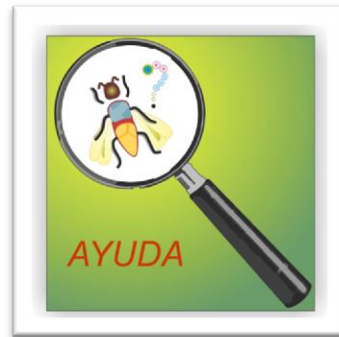
Gráfica 15. Rejilla de Puntos



Fuente: Autores

**9. Ayuda:** En esta opción se despliega un archivo de formato PDF con el Manual del usuario, este botón se puede identificar fácilmente porque es grande, de color verde con una lupa de imagen (ver gráfica 16).

Gráfica 16. Botón de Ayuda



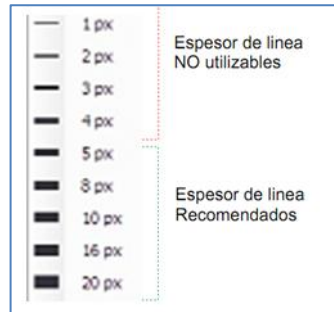
Fuente: Autores

## **SECCIÓN 2: PROCESAMIENTO DE IMAGEN**

**10. Seleccionar e Importar la Imagen de la Cavidad:** Para seleccionar la imagen de la cavidad cuyo formato puede ser JPEG o BMP, hagan clic en el botón "Examinar", abriéndose un recuadro como se muestra en la gráfica, donde el usuario puede localizar la Imagen que desee procesar en cualquier lugar o Directorio de su PC, una vez ubicada y seleccionada la imagen se da clic en el botón abrir empezando un proceso de Importación de la cavidad hacia el software EDCA Firefly que puede tardar unos segundos dependiendo del tamaño de la resolución de la imagen.



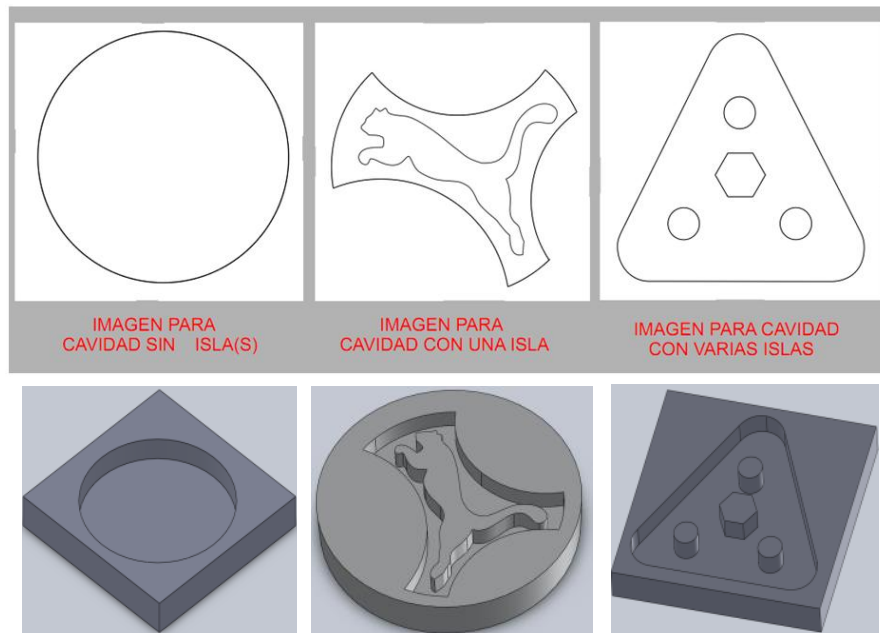
Gráfica 18. Espesores de línea para el contorno de una Cavidad



Fuente: Autores

- Existen dos tipos de cavidades para las cuales el usuario puede hacer su diseño de imágenes las cuales son: Cavidades sin Islas<sup>36</sup> y Cavidades Con Islas, las cuales se deben realizar en la forma como se observan en la gráfica 19, en un fondo blanco y con las líneas de contorno preferiblemente de espesor 8px y de color negro, solo dibujando el contorno interno de la cavidad que se va a fresar.

Gráfica 19. Imágenes de Cavidades sin Islas y con Islas para Matlab



Fuente: Autores

<sup>36</sup> Islas: Zonas interiores al contorno que no deben mecanizarse.

**11. Cambiar Tamaño de Imagen o Redimensionamiento:** Esta opción es útil para el usuario cuando quiere aumentar o disminuir el tamaño de una imagen o cuando las dimensiones longitudinales de alto (Dy) o de ancho (Dx) no son las mismas con las que se diseñó la Imagen.

Inicialmente al usuario se le muestra las dimensiones de alto y ancho con las cuales fue importada la imagen original inicialmente, pero si estas no son correctas pueden ser modificadas al cambiar los valores en las casillas nombradas con Dx (medida longitudinal desde el extremo izquierdo del contorno de la imagen al punto que se encuentre más a la derecha) y Dy (medida longitudinal desde el extremo más bajo del contorno de la imagen al más alto) y oprimiendo el botón “Cambiar tamaño de Imagen” la cual me proporciona la imagen a las medidas reales y originales como se observa en la gráfica 20.

Gráfica 20. Redimensionamiento de Imagen



Fuente: Autores

**12. Procesamiento de Imagen:** Es el que se efectúa al oprimir el botón “Procesar”. En este procesamiento se seleccionan los puntos que son maquinables o no, y se pueden ver en tiempo real la forma como se realiza en la imagen, además se indica cual es el progreso porcentual que lleva esta operación y el tiempo estimado que durara el procesamiento de imagen. Este proceso puede ser detenido en cualquier momento si se oprime el botón “Detener” y una vez

finalizado la operación el programa mostrara un mensaje indicándolo. (Ver Imagen 21).

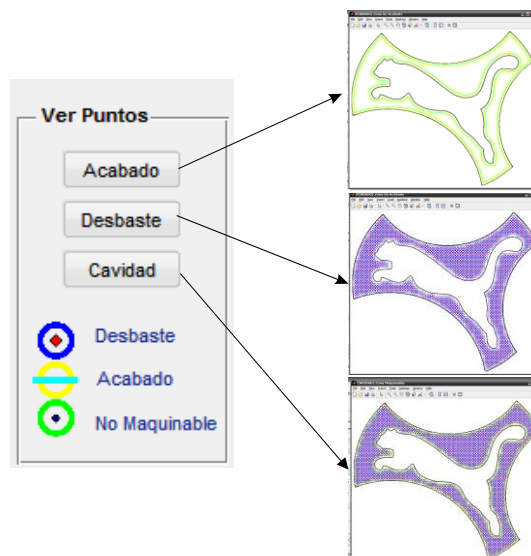
Gráfica 21. Procesamiento de Imagen terminado



Fuente: Autores

**13. Vista Previa de Puntos Maquinables:** Una vez terminado el procesamiento de imagen se activaran los botones que se encuentran en el panel “ Ver Puntos” donde se pueden observar los puntos de Acabado, Desbaste y la Cavidad y la simbología y color de los puntos como se muestra en la gráfica 22.

Gráfica 22. Puntos Maquinables de Acabado, Desbaste y Cavidad



Fuente: Autores

**14. Herramientas:** Esta consta de tres botones los cuales cumplen las siguientes funciones:

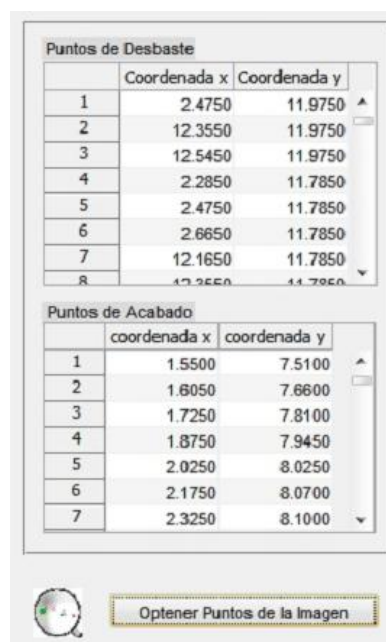
- Botón Detener: Sirve como su nombre lo indica para detener el procesamiento de imagen.
- Botón Zoom: Sirve para ampliar las imágenes
- Botón Pam: Sirve para trasladar las imagen en el plano.

### SECCIÓN 3: PUNTOS PARA EL MAQUINADO

**15. Tablas:** Aquí se visualiza las coordenadas de los puntos de Desbaste y Acabado.

**16. Obtener puntos de la Imagen:** La función de este botón es la de guardar y mostrar los puntos maquinables para el proceso de Desbaste y Acabado (Ver gráfica 23).

Gráfica 23. Tablas de las Coordenadas de los Puntos de Desbaste y Acabado



The screenshot displays a software window with two tables and a button. The top table, titled 'Puntos de Desbaste', lists 8 points with their x and y coordinates. The bottom table, titled 'Puntos de Acabado', lists 7 points with their x and y coordinates. Below the tables is a button labeled 'Optener Puntos de la Imagen'.

Puntos de Desbaste		
	Coordenada x	Coordenada y
1	2.4750	11.9750
2	12.3550	11.9750
3	12.5450	11.9750
4	2.2850	11.7850
5	2.4750	11.7850
6	2.6650	11.7850
7	12.1650	11.7850
8	12.3550	11.7850

Puntos de Acabado		
	coordenada x	coordenada y
1	1.5500	7.5100
2	1.6050	7.6600
3	1.7250	7.8100
4	1.8750	7.9450
5	2.0250	8.0250
6	2.1750	8.0700
7	2.3250	8.1000

Optener Puntos de la Imagen

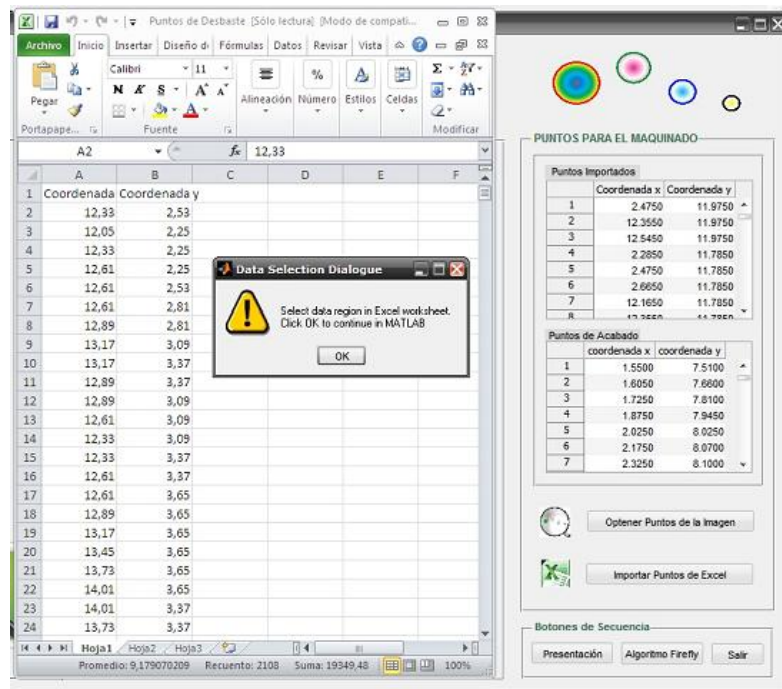
Fuente: Autores

**17. Importar Puntos de Excel:** Este botón sirve para importar puntos que son ajenos al procesamiento de Imagen del presente módulo.

- Una vez se da clic en el mencionado botón se abre la plataforma de Excel donde se encontraran las coordenadas de los puntos de Desbaste de la última ejecución hecha por el programa, en caso de que el usuario desee volver a procesarlos, pero el usuario es libre de suministrar las coordenadas que desee en caso de no querer depender del presente módulo llamado “Procesamiento de Imagen”.

- Para importar los puntos desde Excel basta con introducir las coordenadas de los puntos en las celdas del programa, seleccionar los puntos y dar clic en el OK del cuadro de mensajes llamado “Data Selection Dialogue” como se muestra en la gráfica 24.

Gráfica 24. Importar Puntos de Excel



Fuente: Autores

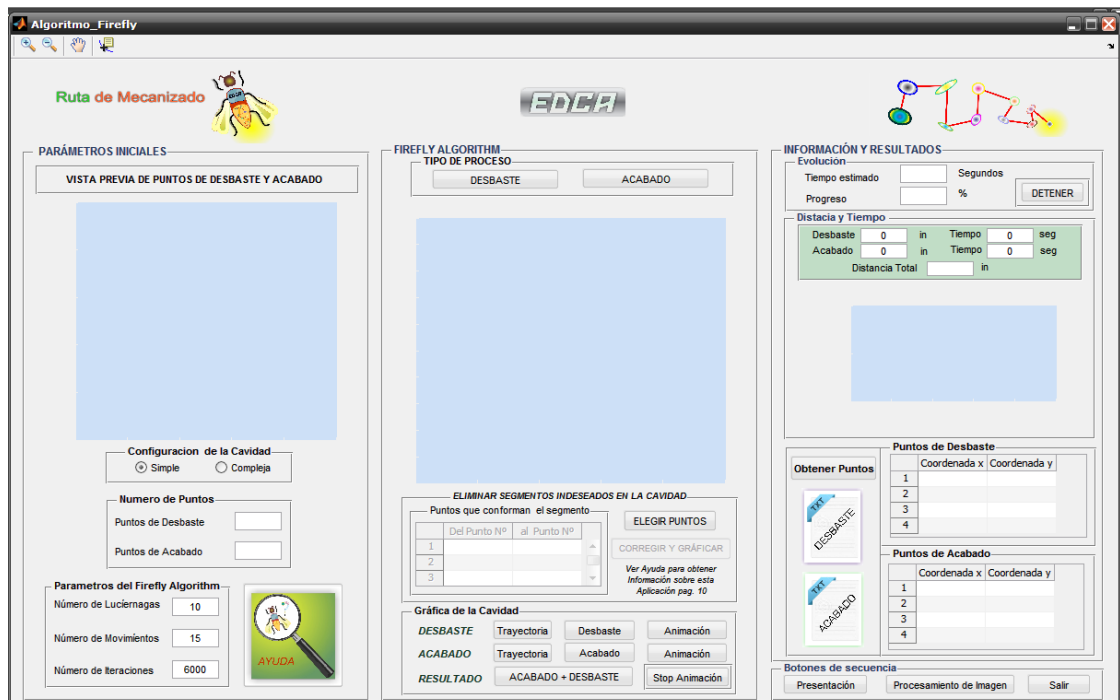
18. **Botones de Secuencia:** Al oprimir cada uno de los botones sucede lo siguiente:

- Botón Presentación: Dirige al usuario al Módulo Presentación.
- Botón Algorithm Firefly: Dirige al usuario al Módulo Algorithm Firefly
- Botón Salir: Cierra el Módulo en el cual me encuentre trabajando.

## MÓDULO ALGORITHM FIREFLY

Esta interfaz se abre al usar el botón “Algoritmo Firefly”. La apariencia de este Módulo se puede apreciar en la gráfica 25.

Gráfica 25. MÓDULO ALGORITHM FIREFLY

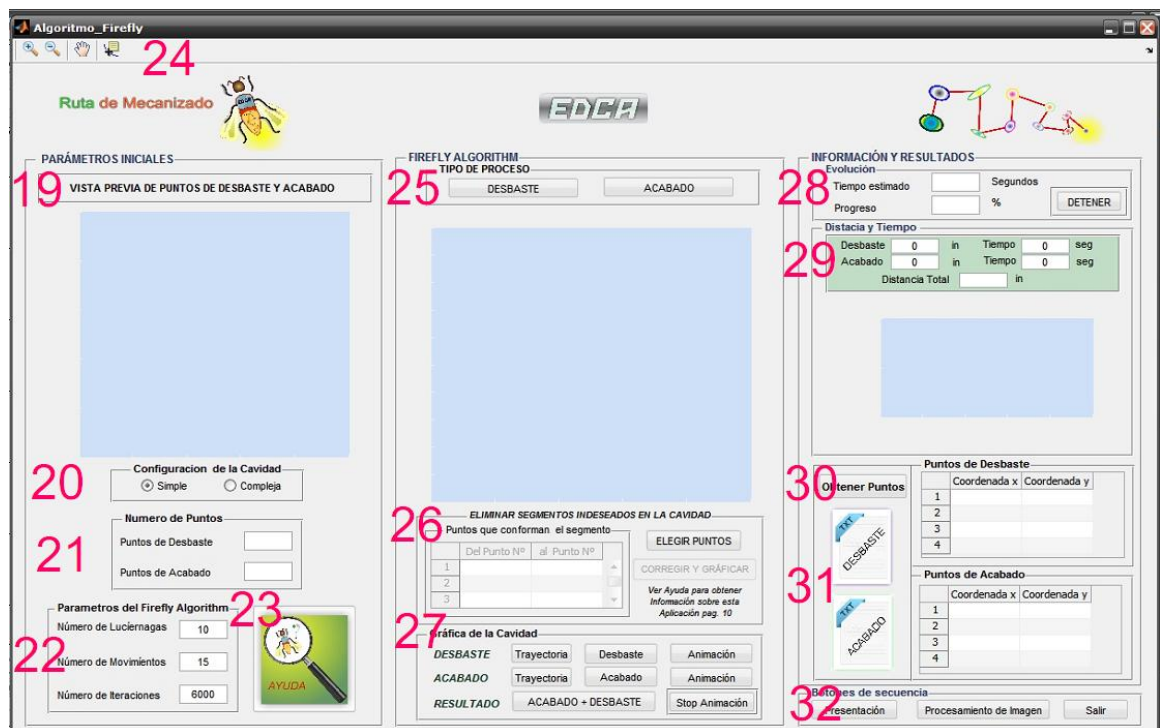


Fuente: Autores

Este módulo cuenta con 3 secciones importantes llamadas Parámetros Iniciales, Firefly Algorithm e Información y Resultados, las cuales deben ser llenadas por el usuario en el orden con que fueron nombradas, preferiblemente de arriba hacia abajo o siguiendo la enumeración mostrada en la gráfica 26, cabe destacar que se debe dar toda la información que se le pida para que el software pueda realizar la búsqueda de la ruta optima sin inconvenientes, pero si falta algún dato se le informara al usuario mediante un mensaje que lo referencie.

A continuación se explicaran cada una de las 3 secciones del presente módulo de acuerdo a la enumeración que se observa en la gráfica 26, de esta forma facilitaremos al usuario la búsqueda de la región en la que se encuentra la duda.

Gráfica 26. Regiones Enumeradas del Módulo Algorithm Firefly

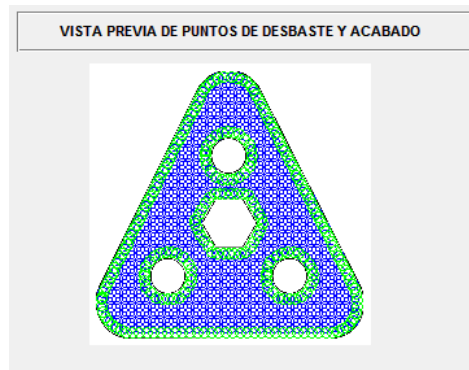


Fuente: Autores

## SECCIÓN 1: PARÁMETROS INICIALES

**19. Vista Previa de Puntos de Desbaste y Acabado:** En este apartado se puede apreciar una vista previa de los puntos de Desbaste (Color Azul) y los puntos de Acabado (Color Verde) como se ve en la gráfica 27.

Gráfica 27. Vista Previa de Puntos de Desbaste y Acabado



Fuente: Autores

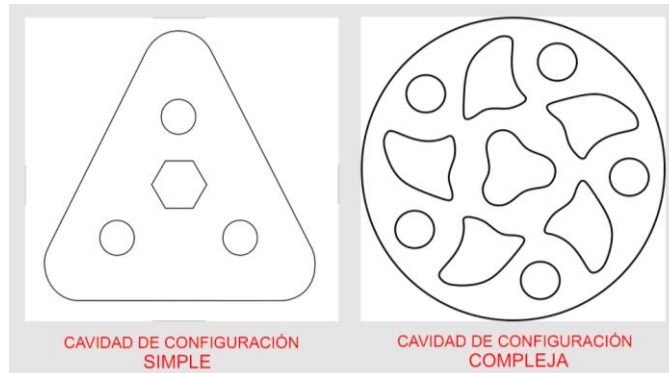
**20. Configuración de la Cavidad:** Hace referencia al nivel de dificultad que tiene el diseño de una cavidad para la solución en el software, el usuario puede considerar si una cavidad simple o compleja si cuenta con las siguientes características:

**CAVIDAD SIMPLE:** Contornos de la cavidad sin demasiadas curvas, con pocas islas (Zonas interiores al contorno que no deben mecanizarse), sin importar el número de puntos para la simulación.

**CAVIDAD COMPLEJA:** Contornos complicados y puntudos, con muchas islas y demasiados puntos para la simulación.

En la gráfica 28 se muestra la comparación entre una cavidad de configuración simple y compleja.

Gráfica 28. Cavidad de Configuración Simple y Compleja



Fuente: Autores

Información a tener en cuenta a la hora de seleccionar la opción de cavidad simple o compleja:

- Una cavidad simple se puede resolver seleccionando la opción compleja, pero una cavidad compleja no tendrá solución apropiada seleccionando la opción simple.
- Si selecciona la opción simple el tiempo de procesamiento del algoritmo firefly es menor, a diferencia de si selecciona la opción compleja que tarda más en obtener el resultado.
- Con la opción simple el algoritmo tiene más posibilidades de quedarse en un óptimo local<sup>37</sup> a diferencia de la opción compleja que se aproxima más al óptimo global<sup>38</sup>.
- Con la opción simple se pueden ver rutas óptimas de manera constante de principio a fin mientras que con la opción compleja se empiezan a ver resultados

<sup>37</sup> Óptimo Local: Son las soluciones óptimas (máximas o mínimas) de un segmento de soluciones factibles de una función objetivo.

<sup>38</sup> Óptimo Global: Es la mejor solución de las soluciones óptimas (máximas o mínimas) comprendidas en toda la función objetivo.

de mejora considerables después de haber pasado aproximadamente el 30% de progreso. (Ver gráfica 35)

- Con la opción simple se resuelven todas las rutas de mecanizados concernientes al proceso de Acabado, ya que estos puntos se presentan de forma casi ordenados y por lo tanto en este caso la mejora que se busca no es para distancia de recorrido sino para evitar que se corten islas con la herramienta.

**21. Número de Puntos:** Aquí se puede apreciar la cantidad de puntos con los cuales está conformado el proceso de Desbaste y el proceso de Acabado.

**22. Parámetros del Firefly Algorithm:** Este panel está conformado por tres variables importantes propias del algoritmo luciérnagas que determina su comportamiento en velocidad de convergencia y en la obtención del resultado óptimo.

Mediante un análisis de varianza (ANOVA) hecha por los autores en la tesis<sup>39</sup> se determinó de manera estadística el, Número de Luciérnagas, Número de Movimientos e iteraciones recomendado para que el algoritmo luciérnaga funcione de una manera adecuada tanto en tiempo y efectividad.

Los valores de los parámetros resultantes del análisis de Varianza (ANOVA) se aprecian en la siguiente tabla.

---

<sup>39</sup> PLATAFORMA SOFTWARE PARA LA OPTIMIZACIÓN DE MECANIZADO DE CAVIDADES UTILIZANDO EL ALGORITMO LUCIÉRNAGAS "FIREFLY ALGORITHM", Capítulo 4: Análisis de Varianza (ANOVA).

Tabla 2. Parámetros Algoritmo Luciérnaga

Parámetros para la utilización del algoritmo Luciérnaga	
Cavidad Simple	Cavidad Compleja
Número de Luciérnagas = 11	Número de Luciérnagas = 10
Número DE Movimientos = 20	Número DE Movimientos = 15
Número de Iteraciones = 2000	Número de Iteraciones = 6000

Fuente: Autores

**23. Botón de Ayuda:** En esta opción se despliega un archivo de formato PDF con el Manual del usuario.

**24. Herramientas:** Esta consta de cuatro botones los cuales cumplen la siguiente funciones:

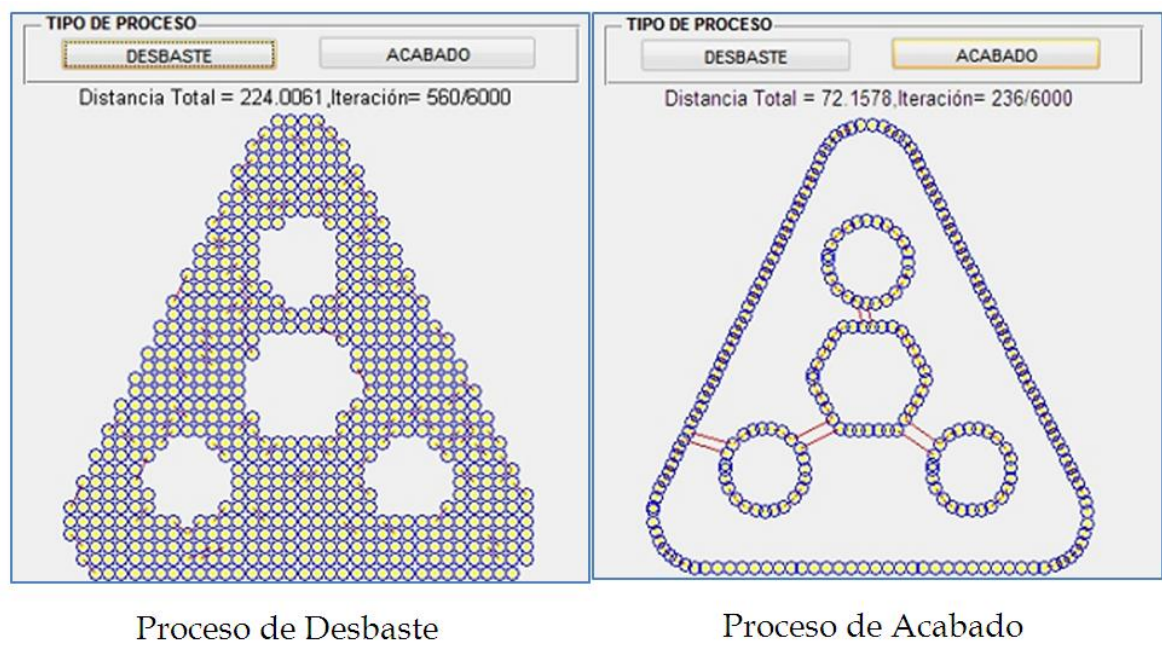
- Botón Zoom in : Sirve para ampliar el tamaño a las imágenes
- Botón Zoom out: Sirve para disminuir el tamaño a las imágenes
- Botón Pan: Sirve para trasladar las imagen en el plano.
- Botón Data Cursor: Sirve para detectar las coordenadas en las cuales se encuentra un punto y el número de punto al cual pertenece esa coordenada, este botón tiene especial utilidad en el numeral 26 de este Manual.

## SECCIÓN 2: FIREFLY ALGORITHM

**25. Tipos de Procesos:** Consta de los botones de Desbaste y Acabado, si uno de los botones está activado el otro se encuentra inactivo hasta que el algoritmo luciérnaga termine o hasta que se oprima el botón detener que se encuentra en la sección 3 en el numeral 28 mostrado en la gráfica 26 ya que no pueden estar en funcionamiento a la vez.

Cuando se oprime el botón de Desbaste el Algoritmo Luciérnaga hallara la ruta óptima para los puntos de desbaste y si se oprime el botón “Acabado” el algoritmo buscara la ruta óptima para el proceso de acabado, en cada uno de los casos se podrá ver en tiempo real como evoluciona el recorrido de ambos procesos además de la distancia alcanzada hasta el momento y las iteraciones en la cual lo encontró como se observa en la gráfica 29.

Gráfica 29. Procesos de Desbaste y Acabado



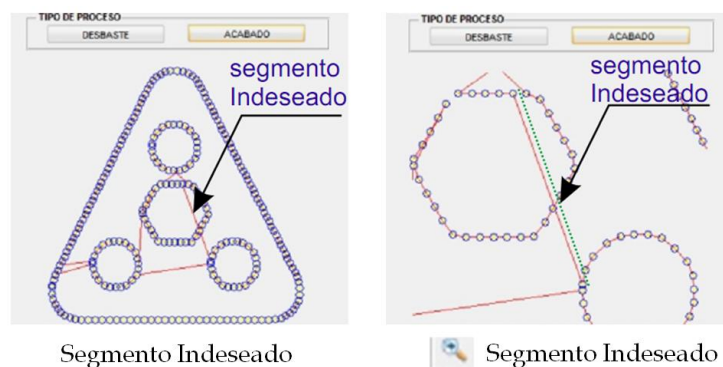
Fuente: Autores

**26. Eliminar segmentos Indeseados de la Cavidad:** Segmentos indeseados son aquellas líneas que se forman entre dos puntos y que cortan regiones que no son maquinables y por lo tanto la herramienta fresadora debe retraerse a lo largo del segmento y continuar con el proceso en segmentos que sean apropiados para maquinar.


El proceso de eliminar segmentos indeseados es bastante sencillo si se siguen los pasos del siguiente ejemplo:

- a. Una vez se ha terminado la búsqueda de trayectoria óptima se identifica que hay un segmento indeseado (Ver gráfica 30) el cual se puede apreciar con mayor claridad si se utiliza la herramienta de Zoon in.

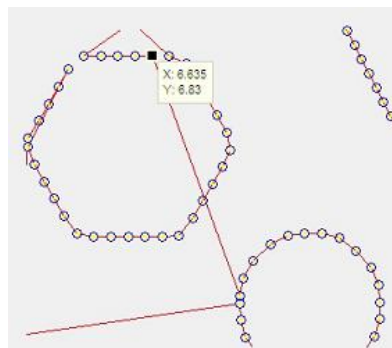
Gráfica 30. Segmento Indeseado



Fuente: Autores

- b. Para proceder con la eliminación del segmento indeseado se debe seleccionar el botón “Data Cursor”  que permite obtener las coordenadas (x, y) que sea seleccionado, como se muestra en la gráfica 31.

Gráfica 31. Función del botón Data Cursor



Fuente: Autores

c. Una vez es oprimido el botón “Data Cursor” se debe seguir los siguientes pasos con el objetivo de identificar el N° del punto al cual pertenece las coordenadas de dicho punto:

- Dar clic derecho sobre la gráfica a la cual se le quiere eliminar el segmento desplegándose un cuadro de dialogo.
- Sobre el cuadro de dialogo dar clic a la última opción que dice “Select Text Update Funtión. (ver gráfica 32(a)).
- Se abre el directorio de la carpeta “FIREFLY ALGORITHM EDCA”, en ella se debe seleccionar y abrir el archivo llamado “Identificar\_Puntos”. Ver gráfica 32(b).
- Una vez hecho los pasos anteriores, al seleccionar de nuevo un punto además de dar las coordenadas de dicho punto, suministra el número del punto (dato que realmente interesa) al cual pertenecen esas coordenadas como se observa en la gráfica 32(c).

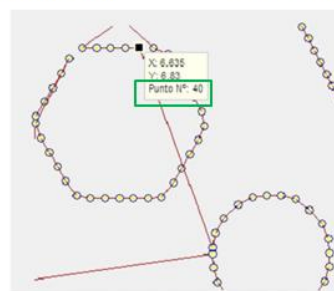
Gráfica 32. Pasos Para activar la función que Identificar el N° de Punto de una Coordenada



a. Select Text Update Funtión



b. Identificador\_de\_Puntos

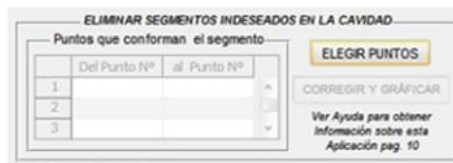


c. Punto N°

Fuente: Autores

d. Una vez identificados el valor de los puntos que pertenecen al segmento que se quiere eliminar se procede a dar clic en el botón “ ELEGIR PUNTOS” (Ver gráfica 33(a)), aparece un mensaje que pregunta si “ Deseo Eliminar Segmentos Indeseados”,(ver gráfica 33(b)), se da clic en opción si, en seguida aparecerá un recuadro que pide el número de segmentos (Ver gráfica 33(c)), donde se debe introducir el número de segmentos que deseo eliminar ( en este caso es 1 ),se da clic en Ok, acto seguido se activan la tabla y el botón “ CORREGIR Y GRAFICAR”, en la tabla se suministran los puntos que pertenecen al segmento que se quiere eliminar (Ver gráfica 33(d)) y por último se da doble clic sobre el botón “CORREGIR Y GRAFICAR” el cual elimina el segmento indeseado (Ver gráfica 33(e)), en la figura que se muestra en la gráfica 33(f) se observa el recorrido de una fresa en color rojo y puntos rosados que simboliza que la herramienta se retrae y el punto azul que simboliza que la herramienta vuelva a maquinarse.

Gráfica 33. Proceso para eliminar segmentos de línea(s) indeseados



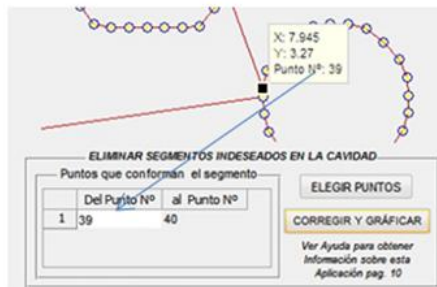
a. Botón ELEGIR PUNTOS



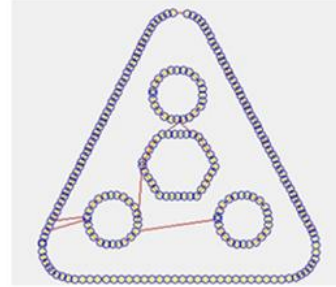
b. Mensaje



c. N° de segmentos a eliminar



d. Puntos que pertenecen al segmento que se desea eliminar



e. Grafica con segmento indeseado Eliminado

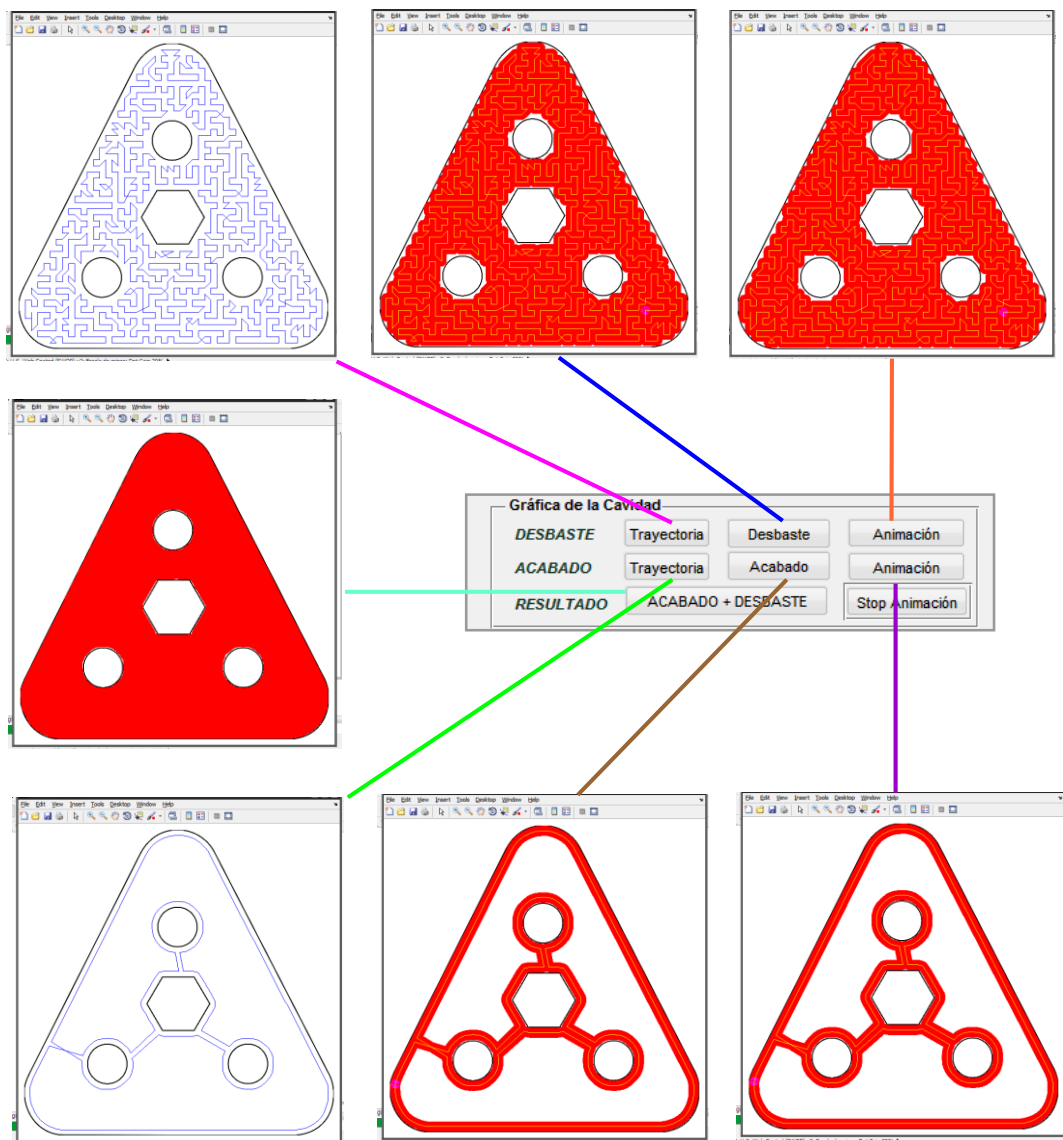


f. Maquinado final

Fuente: Autores

**27. Gráficas de la Cavity:** En este panel se encuentran plasmadas las trayectorias que sigue la herramienta fresadora en el proceso de Desbaste y el proceso de Acabado por separado y una gráfica que combina ambos procesos, además de incluir animación que muestra de forma interactiva el movimiento de la herramienta fresadora, cabe destacar que el usuario puede detener en cualquier momento las animaciones oprimiendo el botón “Stop Animación”. (Ver gráfica 34).

Gráfica 34. Gráficas de la Cavity



Fuente: Autores

### SECCIÓN 3: INFORMACIÓN Y RESULTADOS

**28. Evolución:** En este panel el usuario puede apreciar de manera aproximada el tiempo estimado en segundos que el algoritmo luciérnagas demora en terminar su proceso, el cual se va actualizando de manera continua.

El usuario también puede ver el progreso en forma porcentual, que representa la cantidad que ha avanzado el algoritmo luciérnagas dentro de su proceso, el cual se puede detener en cualquier momento oprimiendo el botón “DETENER”.

**29. Distancia y Tiempo:** En este panel el usuario podrá observar la distancia de la mejor Ruta que ha encontrado el algoritmo luciérnaga durante su proceso, el cual se actualiza a medida que la distancia de la ruta encontrada supere a la anterior, si se realizaron los procesos de Desbaste y Acabado también se suministra la distancia total de las dos trayectorias.

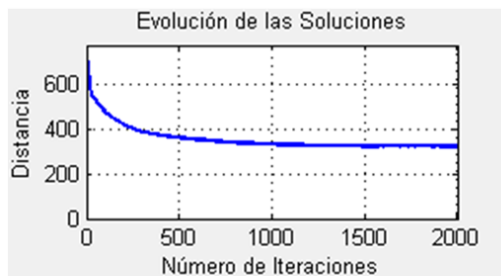
Las unidades en las que esta dada la distancia puede ser en pulgadas o centímetros dependiendo de lo que el usuario seleccione en el módulo Procesamiento de Imagen

- Además de la distancia se informa el tiempo que transcurrió en segundos para encontrar la mejor distancia, el cual se actualiza a medida que se encuentren mejores resultados.

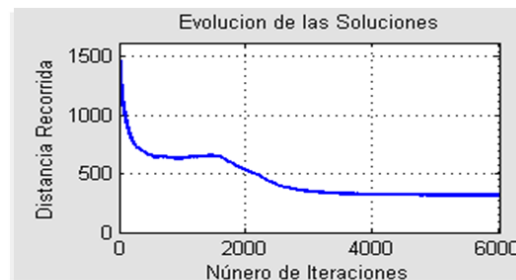
- Este panel muestra un gráfico una vez finalizado el proceso del algoritmo que indica la curva distancia vs número de iteraciones, que es diferente dependiendo si se selecciona la opción simple o compleja (ver gráfica 35) mostrada en el numeral 20 de la gráfica 26.

Las curvas indicadas en la gráfica 35, son útiles ya que le enseñan al usuario como evolucionaron las soluciones encontradas con los parámetros del algoritmo firefly que el usuario suministro, para que pueda corregirlos si la solución no fue satisfactoria o de pronto mejorarlos aún más teniendo en cuenta las indicaciones explicadas en el numeral 20 de este Manual.

Gráfica 35. Evolución de las Soluciones



Típica curva del algoritmo Firefly para figuras simples



Típica curva del algoritmo Firefly para figuras complejas

Fuente: Autores

**30. Tablas:** El usuario obtiene las coordenadas de los puntos de Desbaste y puntos de Acabado de manera ordenada de la mejor ruta encontrada por el algoritmo luciérnaga al oprimir el botón llamado “Obtener Puntos” y los muestra en sus respectivas tablas.

**31. Informe:** El usuario tiene la oportunidad de acceder a las coordenadas (ordenadas) de los puntos de Maquinado tanto para Desbaste como para Acabado hallados por el Algoritmo Luciérnaga mediante dos tipos de archivos que son: Excel **.xls** y un **Bloc de notas .txt**, los cuales puede ubicar dentro de las carpetas del software llamadas FIREFLY ALGORITHM EDCA\COORDENADAS DE MECANIZADO.

El usuario tiene la oportunidad de acceder al informe del documento bloc de notas.txt directamente oprimiendo los botones de “DESBASTE” y “ACABADO” respectivamente mostrado en la gráfica 36, cabe destacar que la información se actualiza cada vez que el usuario oprima el botón “Obtener Puntos”.

El documento .txt contiene la siguiente información:

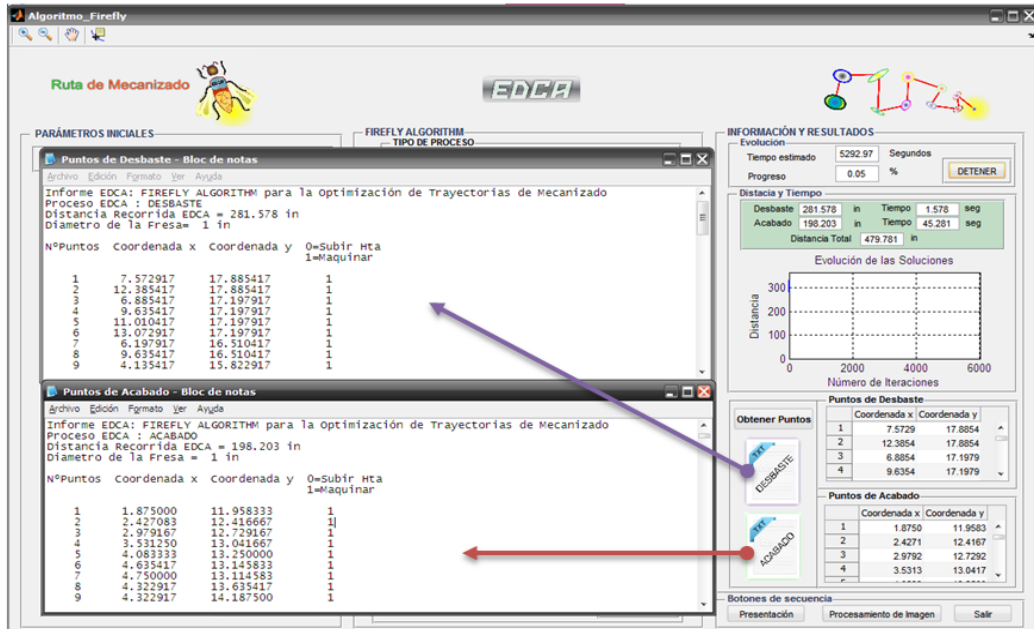
- El objetivo del software: Optimizar trayectorias de mecanizado
- El proceso de maquinado: Desbaste o Acabado
- La mejor distancia
- El diámetro de la fresa que se utilizó para el mecanizado.
- A manera de tabla se encuentra:

El número de puntos con los cuales se hizo la simulación.

Las coordenadas (x, y) de los puntos de la mejor ruta encontrada.

Una nomenclatura que indica en que puntos una herramienta se debe retraer (0) o maquinar (1).

Gráfica 36. Informe



Fuente: Autores

**32. Botones de secuencia**

- Botón Presentación: Direcciona al usuario al módulo llamado “Presentación”
- Botón Procesamiento de Imagen: Direcciona al usuario al módulo llamado “Procesamiento de Imagen”
- Botón Salir: Cierra el módulo en el cual se encuentra actualmente.

**GRACIAS POR UTILIZAR LA PLATAFORMA SOFTWARE PARA LA  
OPTIMIZACIÓN DE MECANIZADO DE CAVIDADES UTILIZANDO EL  
ALGORITMO LUCIÉRNAGAS “FIREFLY ALGORITHM”**

