



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

TÉCNICAS DE COMPUTACIÓN COGNOSCITIVAS APLICADAS EN LA OPTIMIZACIÓN
DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JUAN CARLOS BARBOSA TORRES

TUTOR PRINCIPAL
DR. SAÚL DANIEL SANTILLÁN GUTIÉRREZ, CAT FI UNAM
COMITÉ TUTOR
DR. MARCELO LÓPEZ PARRA, CAT FI UNAM
DR. JESÚS MANUEL DORADOR GONZÁLEZ FI UNAM
DR. ACHIM MAX LOSKE MEHLING, CFATA UNAM
DR. GABRIEL ASCANIO GASCA, CCADET UNAM

MÉXICO, D. F. Febrero 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

Portada	I
Agradecimientos	II
Índice	III
Lista de Figuras	VI
Lista de Tablas	X
1. Descripción Del Problema Propuesto	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	10
1.2.1 Diseño Aeronáutico	10
1.2.2 Técnicas Cognoscitivas	15
1.3 Hipótesis	19
1.4 Objetivos	21
2. Algoritmos Genéticos	22
2.1 Introducción	22
2.2 Codificación Genética	25
2.3 Operadores Básicos de los AG	27
2.4 Inicialización	29
2.4.1 Elitismo en Población Inicial	30
2.5 Selección	31
2.5.1 Selección por Ruleta	32
2.5.2 Selección Universal Estocástica	35
2.5.3 Selección Estadística (Sigma)	38
2.5.4 Selección por Torneo	39
2.5.5 Selección por Estado Estable	41
2.6 Reproducción	42
2.6.1 Punto de Cruce Único	42
2.6.2 Punto de Cruce Múltiple	45
2.6.3 Reproducción Uniforme	45
2.6.4 Reproducción Aritmética	46
2.7 Mutación	47

2.8	Nueva Generación	48
2.9	Criterios de Convergencia	49
2.9.1	Número de Generación.....	49
2.9.2	Tiempo de Cómputo.....	49
2.9.3	Evaluación Mínima.....	50
2.9.4	Convergencia en la Evaluación.....	50
2.9.5	Convergencia Estadística.....	51
2.9.6	Convergencia Genética.....	52
3.	Diseño de Juntas Atornilladas.....	53
3.1	Introducción	53
3.2	Juntas a Tensión	55
3.3	Rigideces y Deformaciones	57
3.3.1	Rigidez del Tornillo y Tuerca.....	58
3.3.2	Rigidez de la Arandela.....	61
3.3.3	Rigidez Total del Sistema Fijante.....	62
3.3.4	Rigidez del Sistema Fijo.....	62
3.3.5	Relación de Rigideces.....	64
3.4	Cargas en el Sistema	65
3.5	Precarga	66
3.6	Cargas en una Junta Excéntrica	67
3.6.1	Cargas Simétricas.....	68
3.6.1.1	Cargas Axiales.....	68
3.6.1.2	Cargas Radiales.....	69
3.6.1.3	Cargas de Torsión.....	70
3.6.1.4	Cargas por Momento Simétrico.....	71
3.6.2	Cargas Asimétricas.....	72
3.6.2.1	Cortantes Asimétricos.....	72
3.6.2.2	Momentos Asimétricos.....	73
3.6.3	Cálculo de Cargas Externas Aplicadas.....	74
3.6.4	Cálculo de Cargas y Momentos en Brida y Tornillo.....	76
3.7	Requerimientos de Junta Atornillada (Turbina de Gas) ..	78
3.7.1	Requisitos bajo Cargas Normales.....	78
3.7.2	Requisitos bajo Cargas Límite.....	80
3.7.3	Requisitos bajo Cargas Últimas.....	82
3.8	Ejemplo Resuelto	84
3.8.1	Detalles de la Junta.....	84

3.8.2	Cálculo de Cargas en la Junta.....	88
3.8.3	Cálculo de Márgenes de Seguridad.....	90
4.	Algoritmo Genético.....	94
4.1	Estructura General del Algoritmo.....	94
4.2	Módulo Creación de Individuos.....	96
4.2.1	Sub-Módulo Tipo de Tornillos.....	99
4.2.2	Sub-Módulo Material del Tornillo.....	103
4.2.3	Sub-Módulo Cantidad de Tornillos.....	105
4.2.4	Sub-Módulo Espesor de Ligamento Externo.....	108
4.2.5	Sub-Módulo Filete entre Carcasa y Brida.....	110
4.2.6	Sub-Módulo Espesor de Bridas.....	111
4.2.7	Sub-Módulo Espesor de Arandelas.....	112
4.2.8	Sub-Módulo Precarga en el Tornillo.....	114
4.2.9	Sub-Módulo Radio de Acción del Tornillo.....	116
4.3	Módulo Evaluación.....	118
4.4	Módulo Selección de Emparejamiento.....	122
4.5	Módulo Reproducción.....	123
4.5.1	Cruce Único Aleatorio.....	125
4.5.2	Cruce Variable Por Característica.....	126
4.6	Módulo Torneo.....	129
4.7	Módulo Mutación.....	130
5.	Resultados.....	132
5.1	Variables de Entrada.....	132
5.2	Variantes Propuestas a los AG Tradicionales.....	134
5.2.1	Dimensión de Población Inicial.....	135
5.2.2	Elitismo.....	136
5.2.3	Criterio de Convergencia.....	138
5.2.4	Reproducción Selectiva.....	141
5.2.5	Cruce Único Aleatorio como Método Reproductivo..	142
5.2.6	Cruce Variable Por Característica como Método Reproductivo.....	145
5.2.7	Mutación Selectiva.....	150
5.3	Evolución del Algoritmo.....	151
5.3.1	Evolución General del Diseño.....	151
5.3.2	Evolución del Tipo de Tornillo.....	153

5.3.3 Evolución del Cantidad de Tornillos	155
5.3.4 Espesores de las Bridas	156
5.3.5 Torque Aplicado	157
5.4 Comparación de Resultados del AG contra Método Tradicional	158
6. Conclusiones	160
7. Trabajo Futuro	165
8. Referencias	167

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 Elementos Estructurales Principales Típicos en una Turbina [PW308, Imagen Recuperada www.pwc.ca]	2
Figura 1-2 Prototipo N2A de Avión de Ala/Fuselaje Integrados [Imagen Recuperada de www.nasa.gov]	14
Figura 1-3 Junta Atornillada de Carcasa de Ventilador Principal [Imagen Recuperada de Patente US6,607,165]	20
Figura 2-1 Ejemplo de Sistema de Selección de Ruleta Rusa [Imagen Recuperada de www.acanomas.com]	35
Figura 2-2 Ejemplo de Sistema de Selección Universal Estocástica	37
Figura 2-3 Ejemplo de Sistema de Reproducción de Cruce Único	43
Figura 2-4 Ejemplo de Reproducción de Cruce Único	44
Figura 2-5 Ejemplo de Reproducción de Cruce Doble	45
Figura 2-6 Ejemplo de Reproducción Uniforme	46
Figura 3-1 Juntas a Cortante y a Tensión [Imagen Recuperada de Ref.24]	53
Figura 3-2 Junta Atornillada como Sistema de Resortes [Imagen Recuperada de Ref.24]	55
Figura 3-3 Modelo del Tornillo para Cálculo de Rigideces	56
Figura 3-4 Elementos Fijos y Fijantes en una Junta	58
Figura 3-5 Esfuerzos en el Árbol de un Tornillo	60
Figura 3-6 Modelo del Tornillo para Cálculo de Rigideces	61
Figura 3-7 Modelo del Tornillo para Cálculo de Rigideces	63
Figura 3-8 Modelo del Tornillo para Cálculo de Rigideces	64
Figura 3-9 Diagrama del Comportamiento de la Junta	65

Figura 3-10 Cargas externas Alineadas al Eje del Tornillo.....	68
Figura 3-11 Cargas Axiales Axisimétricas.....	69
Figura 3-12 Cargas Radiales Axisimétricas.....	70
Figura 3-13 Cargas de Torsión Axisimétricas.....	71
Figura 3-14 Cargas de Momento Axisimétrico.....	71
Figura 3-15 Cargas de Cortante Asimétrico.....	72
Figura 3-16 Cargas de Momento Asimétrico.....	74
Figura 3-17 Cargas Aplicadas a la Brida.....	75
Figura 3-18 Cargas y Momentos en Tornillo y Brida.....	76
Figura 3-19 Ejemplos de Requerimientos.....	83
Figura 3-20 Dimensiones de Junta-Ejemplo (pulgadas).....	85
Figura 3-21 Diámetro Equivalente de la Brida (pulgadas).....	86
Figura 4-1 Estructura General de Algoritmo.....	95
Figura 4-2 Genoma del Individuo.....	97
Figura 4-3 Estructura Módulo Creación de Individuos.....	97
Figura 4-4 Diseño Geométricamente Inválido.....	98
Figura 4-5 Variables de Entrada y Salida del Algoritmo.....	98
Figura 4-6 Dimensiones de Tornillos Hexagonales.....	99
Figura 4-7 Dimensiones de Tuercas Hexagonales.....	100
Figura 4-8 Dimensiones de Herramental de 12 puntos de Agarre..	101
Figura 4-9 Estructura Módulo de Tipo de Tornillos.....	102
Figura 4-10 Estructura Módulo de Material del Tornillo.....	104

Figura 4-11 Dimensiones de Herramental de 12 puntos de Agarre.....	106
Figura 4-12 Estructura Módulo de Cantidad de Tornillos.....	107
Figura 4-13 Ligamento Externo.....	108
Figura 4-14 Estructura Módulo de Espesor de Ligamento.....	109
Figura 4-15 Radio de Filete.....	110
Figura 4-16 Estructura Módulo de Radio de Filete.....	111
Figura 4-17 Estructura Módulo de Espesor de Bridas.....	112
Figura 4-18 Dimensiones de las Arandelas.....	113
Figura 4-19 Estructura Módulo de Espesor de Arandelas.....	114
Figura 4-20 Estructura Módulo de Precarga en el Tornillo.....	116
Figura 4-21 Radio de Acción del Tornillo.....	117
Figura 4-22 Estructura Módulo de Radio de Acción del Tornillo.....	118
Figura 4-23 Estructura Módulo de Evaluación.....	119
Figura 4-24 Dimensiones para Cálculo de Peso Añadido.....	120
Figura 4-25 Estructura Módulo de Radio de Acción del Tornillo.....	123
Figura 4-26 Estructura Módulo Reproducción con Punto de Cruce Fijo.....	126
Figura 4-27 Reproducción con Cruce Variable por Característica.....	127
Figura 4-28 Estructura Módulo Reproducción Cruce Variable por Característica.....	128
Figura 4-29 Estructura Módulo Torneo.....	129
Figura 4-30 Estructura Módulo Mutación.....	131
Figura 5-1 Variables Geométricas de Entrada.....	132

Figura 5-2 Iteraciones para lograr un Individuo Válido.....	137
Figura 5-3 Convergencia de la Población.....	140
Figura 5-4 Convergencia del Individuo Mejor Evaluado.....	140
Figura 5-5 Puntos de Cruce en Genoma de Caso de Estudio.....	143
Figura 5-6 Resultados de Punto Único de Cruce.....	145
Figura 5-7 Puntos de Cruce en Característica de Caso de Estudio	146
Figura 5-8 Resultados de Punto Variable de Cruce por Característica.....	148
Figura 5-9 Diferencia en Tiempo de Cómputo.....	149
Figura 5-10 Comparación de Métodos - Volumen Añadido por Población.....	150
Figura 5-11 Evolución Geométrica de la Población.....	152
Figura 5-12 Evolución Geométrica del Mejor Individuo.....	153
Figura 5-13 Evolución del Tipo de Tornillos.....	154
Figura 5-14 Evolución del Número de Tornillos.....	155
Figura 5-15 Evolución del Espesor de las Bridas.....	156
Figura 5-16 Evolución del Torque Aplicado.....	157

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Ejemplo Selección de Emparejamiento.....	34
Tabla 4-1 Tornillos Hexagonales [Ref. 29].....	99
Tabla 4-2 Tuercas Hexagonales [Ref. 30].....	100
Tabla 4-3 Herramental para Tuercas Hexagonales [Ref. 31].....	101
Tabla 4-4 Genoma de Conjunto Tuerca/Tornillo.....	102
Tabla 4-5 Propiedades Mecánicas de Materiales de Tornillería..	103
Tabla 4-6 Genoma del Material del Tornillo.....	104
Tabla 4-7 Genoma de la Cantidad de Tornillos.....	107
Tabla 4-8 Genoma del Ligamento Externo.....	109
Tabla 4-9 Genoma del Radio de Filete.....	110
Tabla 4-10 Genoma del Espesor de la Brida.....	111
Tabla 4-11 Espesor de la Arandela.....	112
Tabla 4-12 Genoma de la Precarga en el Tornillo.....	115
Tabla 5-1 Cargas para Caso de Estudio.....	133
Tabla 5-2 Materiales Caso de Estudio.....	134
Tabla 5-3 Ejemplo de Cruce Variable por Característica.....	146

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA PROPUESTO

1.1 Introducción

Los requerimientos a los que están sujetos los elementos estructurales para aplicaciones aeronáuticas son considerablemente más estrictos que en el resto de la industria de transportes, ya que las fallas tienen un porcentaje mayor de devenir en pérdidas humanas.

Para partes que no tienen un sistema redundante de reacción de cargas o no tienen un sistema paralelo que se active en caso de una falla, estos requerimientos son aún más estrictos, ya que cualquier falla puede resultar en un evento catastrófico. A este tipo de estructuras se les denomina Elemento Estructural Principal (PSE por sus siglas en inglés). Ejemplo de estos elementos son el sistema de montaje de la turbina, las juntas atornilladas entre las distintas carcasas y la junta del tren de aterrizaje con el fuselaje. En la Figura 1-1 se muestran estos componentes en un motor de avión de turboventilación.

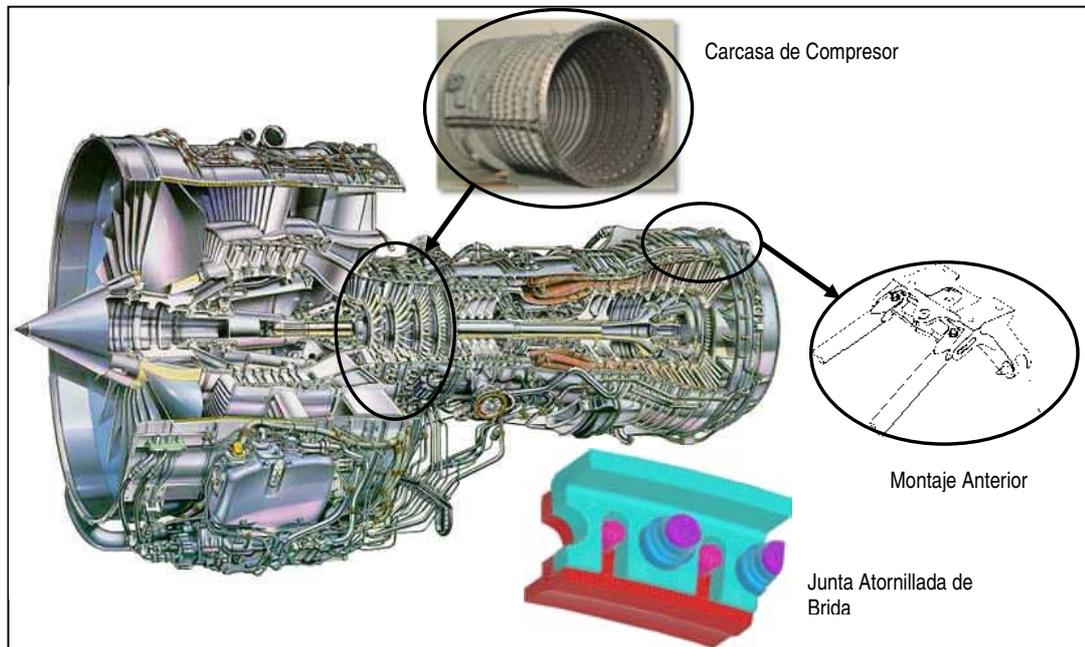


Figura 1-1 Elementos Estructurales Principales Típicos en una Turbina
[PW308, Imagen Recuperada www.pwc.ca]

Dependiendo de la compañía que fabrica los elementos estructurales y la ubicación en que la aeronave operará, alguna o varias agencias aeronáuticas deben otorgar la certificación de aeronavegabilidad. Generalmente los requerimientos son similares, por lo que una vez que una agencia otorga la certificación, se puede obtener la aprobación de alguna otra sólo cubriendo las lagunas que pudieran existir entre los requerimientos de ambas. Entre las agencias más importantes a nivel mundial se pueden citar la Administración Federal de Aviación estadounidense (FAA Ref. 1), la Agencia de Seguridad de Aviación Europea (EASA Ref. 2), Transportes Canadá (TC Ref. 3) y la Agencia Nacional de Aviación Civil brasileña (ANAC Ref. 4). Estas agencias regulan entre otras a las 4 compañías más importantes de aviación actual: la estadounidense Boeing,

la europea Airbus, la canadiense Bombardier y la brasileña Embraer.

Aunque estas agencias tienen pequeñas diferencias en sus requerimientos estructurales, el contenido central es compartido, y todas incluyen requerimientos de:

- La vida útil de las partes bajo fatiga cíclica, medida generalmente como número de horas de vuelo o número de vuelos.
- El soporte de la carga límite que se pueda presentar en la vida útil sin deformaciones permanentes ni grandes desplazamientos.
- La tolerancia al daño que puede resultar en un crecimiento de grietas inherentes del material, el proceso de manufactura o daños accidentales.
- El soporte de cargas últimas como pudieran ser el aterrizaje forzoso o la pérdida de un álabe del ventilador principal en una turbina.
- La seguridad estructural al presentarse cargas cíclicas de alta frecuencia que generen problemas de vibraciones o de resonancia.

El procedimiento usual para el diseño de elementos estructurales que cumplan con los requerimientos anteriores se divide en 5 fases con distintos objetivos intermedios:

Fase 1: Diseño Conceptual. En esta etapa se recopila información de productos existentes con sus aspectos positivos y negativos. También se lleva a cabo un análisis de mercado sobre los parámetros que debe cumplir el producto para hacerlo rentable y competitivo. Ejemplo de estos parámetros pueden ser el empuje de la turbina, la eficiencia energética, la sustentación de la aeronave, el peso, el alcance de la aeronave, la velocidad, etc. Cabe destacar que los parámetros inicialmente definidos no siempre se cumplen al final del desarrollo del producto.

Fase 2: Diseño Preliminar. En esta etapa se da atención primordial a aquellos criterios de diseño que históricamente han resultado ser los críticos para definir las dimensiones del producto, dejando en segundo plano aquellos en los que se tiene confianza de poderlos analizar durante el diseño detallado. Además, se prioriza el desarrollo del sistema primario sobre los secundarios, por ejemplo, el diseño de la estructura de una turbina sobre el diseño de las compuertas de sangrado de presión.

Fase 3: Definición de Interfaces. En esta fase se refina el diseño teniendo especial cuidado en mantener las fronteras

entre los distintos sistemas fijos, ya que de esta forma se minimiza el impacto que pudiera tener un cambio de diseño en los distintos grupos de trabajo.

Fase 4: Diseño Detallado. Actualización del diseño cuidando que los parámetros definidos sean cumplidos. En caso de ser necesario, se utilizan técnicas de optimización (generalmente por diseño de experimentos) para cumplir los parámetros de diseño.

Fase 5: Certificación. Se crean los prototipos y se llevan a cabo las pruebas experimentales que corroboran los resultados analíticos de la Fase 2. Finalmente se obtiene la certificación por parte de la agencia aeronáutica responsable y se libera el producto.

Fase 6: Mejora Continua. Una vez que el producto está en uso, se recopila información de campo para corregir errores en el diseño o para optimizarlo con el fin de mejorar los parámetros definidos.

Como se puede observar, el diseño del producto no puede considerarse terminado en el momento en que entra a servicio, sino que continúa a lo largo de la vida del programa que lo diseña. A continuación se presenta un ejemplo de diagrama de flujo de los requerimientos que se necesitan cumplir en el proceso de diseño.

Aunado a las distintas fases de diseño, el desarrollo de un producto totalmente nuevo en la industria aeronáutica es particularmente difícil en parte por:

- Existir una gran cantidad de requerimientos como los mencionados anteriormente, los cuales tienen que ser cumplidos en todo momento.
- Existe una gran cantidad de sistemas con íntima interacción.
- Puesto que el peso es una variable crítica, generalmente existe muy poco espacio para acomodar el diseño. Esto genera que las geometrías optimizadas puedan tener formas que conlleven costos de maquinado excesivos.
- Existe un limitado número de materiales con una relación de resistencia/densidad aplicable en la industria. Otra restricción son los altos costos de estos materiales, que reduce aún más el espectro de opciones. Hay que agregar que el uso de materiales novedosos, como los compuestos y algunas aleaciones recientemente utilizadas en la industria como el Aluminio-Litio, conllevan distintos métodos de diseño comparados con los materiales tradicionales.
- Mientras que los primeros productos aeronáuticos debían solamente cubrir requerimientos estáticos, ahora se diseña también bajo criterios de fatiga, tolerancia al daño, pandeo, resistencia a la corrosión, mantenimiento, inspección, producción etc.

Al existir estas dificultades y aunado a los tiempos tan cortos para poner en servicio los nuevos productos, algunas técnicas de optimización son utilizadas en las fases de diseño conceptual y detallado solamente si alguno de los parámetros no se cumple. Por ejemplo, si el peso de un motor excede el requerimiento para obtener la eficiencia con la que se promueve el producto en el mercado, la compañía diseñadora del producto pudiera tener penalizaciones económicas. Sin embargo en estos casos, aun cuando se utilizan técnicas de optimización, realmente no se tiene como fin el lograr un diseño óptimo que busque estar en las fronteras de su potencial, sino simplemente cumplir los requerimientos de mercadotecnia originales.

En una gran cantidad de casos, en los cuales se logran cumplir los parámetros definidos para el diseño, el producto llega al servicio con el potencial desperdiciado a pesar de existir margen para la optimización. Prueba de ello son los programas de reducciones de peso, costo, mantenimiento etc. que continúan a lo largo de la vida del programa, tanto del motor como del avión. Esto puede ocasionar ahorros considerables en las finanzas de la compañía diseñadora, tanto para la venta de nuevos productos, como para el servicio al campo y venta de refacciones.

En cuanto a las técnicas de optimización más ampliamente utilizadas en la industria aeronáutica, la más común se basa en Diseños de Experimentos (DOE por sus siglas en

inglés) en donde se aíslan parámetros que se consideran importantes en el diseño final como los espesores de carcasas y bridas y disminución de concentradores de esfuerzo en los radios de filetes. Además, se mide el impacto a la variable a optimizar utilizando valores máximos y mínimos de cada variable. No obstante esta técnica presenta el problema de que las regresiones obtenidas se basan fundamentalmente en la capacidad y experiencia del diseñador al eliminar parámetros que podrían ser o no ser cruciales para el diseño final. Otro gran inconveniente es que al trabajar solamente con máximos y mínimos de cada variable, todo comportamiento intermedio no lineal no puede ser capturado y, como se explicará en los siguientes capítulos, las técnicas de diseño son generalmente no lineales.

Ya en etapas posteriores a la liberación del producto se llegan a optimizar algunos componentes, sin embargo, a pesar de tener la ventaja de un calendario menos agresivo para llevar a cabo la optimización y contar con información de campo, estas optimizaciones se llevan a cabo en una etapa en la que el diseño está congelado en todas sus interfaces, por lo que cualquier cambio debe garantizar su nula influencia negativa en otros sistemas. Por lo tanto, el alcance es limitado.

Una técnica de optimización utilizada normalmente cuando las partes están en uso, es la técnica de optimización topológica que es incluida en la mayoría de los programas

de análisis por elementos finitos. Esta técnica es poco utilizada durante el desarrollo del producto por el gran tiempo requerido para su análisis, lo que impacta negativamente en las fechas programadas para poner en servicio un producto nuevo. Un inconveniente de este método es que al necesitar grandes recursos computacionales, se trabaja con unos cuantos escenarios de cargas en donde subsecuentemente se elimina material que no influye en la rigidez de la parte, por lo que el impacto de parámetros, como los concentradores de esfuerzos y la vida de fatiga, no es tomado en cuenta. Como se mencionó anteriormente, al utilizarse esta técnica sobre todo cuando el producto está en servicio, los componentes adyacentes ya han sido fijados y cualquier interfaz, contribuya o no a la rigidez del sistema, no es factible a ser optimizada.

En este contexto de procesos de diseño complejos, mercados volátiles, competencia cada vez más agresiva y tiempos y recursos de diseño limitados, el uso de herramientas económicas y eficientes de optimización, que puedan ser utilizadas en etapas tempranas del diseño, otorgarían una ventaja competitiva que se trasformaría en mayores ingresos a las compañías diseñadoras y menores costos por parte de los usuarios.

Sin embargo, a pesar de los avances tecnológicos como el uso de computadoras y métodos de análisis sofisticados como los elementos finitos, la opción de aplicar técnicas

avanzadas de optimización en la industria aeronáutica está aún poco explorada.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Diseño Aeronáutico

Un gran avance en la forma en que se diseñan los productos aeronáuticos se dio en la década de los 70s y 80s con el uso de herramientas computacionales de tipo CAD (Computer Aided Design). En su forma más básica, estas herramientas relativamente económicas permitían simplemente modelar los componentes de forma digital, eliminando las complejas actualizaciones en los planos cada vez que existía un cambio en el diseño. Esto permitió que los esfuerzos de las compañías se volcaran al proceso de diseño mientras que el proceso de dibujo se daba de forma paralela y automatizada.

Actualmente estas herramientas funcionan como verdaderas bases de datos, en donde cada equipo de diseño puede trabajar en sus componentes y observar en tiempo real la interacción de estos con los componentes de otros equipos, no sólo en forma de planos, sino generalmente a nivel de ensamblajes tridimensionales.

Por el lado de análisis, antes de la aplicación de herramientas computacionales CAD, el diseño generalmente se

basaba en cálculos generales teóricos con la aplicación de factores de corrección provenientes de pruebas experimentales, por lo que la optimización era prácticamente nula. De la misma forma, la certificación se lograba exclusivamente por medio de pruebas experimentales. Con el arribo de las computadoras, varios cálculos se pudieron realizar de forma automatizada, sin embargo, la dificultad para utilizar estas herramientas minimizaba las aplicaciones computacionales.

Las compañías proveedoras de software detectaron esta laguna entre los sistemas de cómputo, cálculos analíticos y modelado de partes, por lo que las herramientas CAD evolucionaron durante los últimos 20 años para, no sólo enfocarse al dibujo técnico, sino al cálculo gracias a aplicaciones de análisis por elementos finitos y a la manufactura con control numérico. De esta forma, el proceso de diseño/análisis/manufactura que anteriormente era escalonado, se puede dar de forma paralela, permitiendo la creación de partes más eficientes, complejas y maquinables.

Otro parte-aguas en la forma en que se diseñan los componentes aeronáuticos se ha dado en los últimos 15 años con el aumento de restricciones ambientales y el alto costo de los hidrocarburos. Contrario a lo que sucedía a finales del siglo pasado cuando la mayor parte de los aeropuertos con alto tráfico se ubicaban en zonas alejadas de las manchas urbanas, en la actualidad estos se encuentran totalmente rodeados de zonas habitacionales, como es el

caso del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, Heathrow en Londres, John F. Kennedy en Nueva York, etc. Basándose en estudios que muestran que la exposición a niveles de ruido tiene un efecto no sólo desagradable, sino dañino para la salud, las agencias reguladoras y los gobiernos nacionales, regionales y locales han impuesto cada vez más restricciones en este rubro.

Con el aumento en la temperatura global que ha desatado incuestionables efectos adversos al planeta y el impacto que el uso de hidrocarburos tiene sobre la calidad del aire, los países cada vez más exigen a las industrias regular la cantidad de emisiones de efecto invernadero (CO₂) y contaminantes (NO_x, CO, SO_x).

Tanto el análisis sónico como de emisiones requieren soluciones cada vez más complejas que serían imposibles de alcanzar sin la tecnología computacional y técnicas de diseño actuales.

Durante los últimos años se han introducido las técnicas de Optimización de Diseño Multidisciplinario (MDO por sus siglas en inglés). Más que ser una técnica, esta es una filosofía del diseño que involucra varios métodos de optimización que trata de encontrar soluciones englobando todas o la mayor parte de las disciplinas a la vez.

Mientras que en el diseño tradicional cada departamento es responsable de una parte del diseño total y generalmente en forma secuencial, como por ejemplo "Estructuras" del esqueleto, "Aerodinámica" de la forma de un avión, "Diseño" de la apariencia etc., la técnica MDO estimula que el proceso de diseño se lleve a cabo de forma multidisciplinaria y a la vez ya que de esta forma se tomen en cuenta las oportunidades y riesgos que presenta el diseño bajo todo el producto como conjunto.

El gran inconveniente es, como podrá intuirse, la gran complejidad que conlleva que todos los sistemas se trabajen, no sólo al mismo tiempo, sino tomando en cuenta en tiempo real el impacto que cualquier cambio tiene en cada sistema.

Esta forma de trabajar elimina varios pasos en el proceso de diseño, como el congelar las interfaces, ya que estas no crean fronteras entre los grupos de trabajo, sino que simplemente actúan como punto de intercambio.

Entre los métodos de optimización utilizados, se pueden mencionar los basados en cálculo (Máximos y Mínimos), métodos numéricos (Newton) y cognoscitivos (Algoritmos Genéticos, Recocido Simulado).

Uno de los grandes problemas inherentes a esta filosofía de cómo diseñar un producto, es encontrar la función de

transferencia que defina la o las variables a optimizar en función de las entradas multidisciplinarias, además de todas las restricciones a la que debe estar impuesto el producto.

En los capítulos siguientes se mostrará, en parte, la dificultad de generar esta función de transferencia en el caso del estudio propuesto.

A pesar de tener sus dificultades, el MDO se ha aplicado de forma exitosa en varios productos aeronáuticos, como el caso del Lockheed F-117 con su tecnología invisible al radar, y últimamente con las investigaciones de aviones con fuselaje y ala integrada que aumenta la eficiencia de una aeronave al tener sustentación tanto en el ala como en el fuselaje (Blended Wing Body Aircraft en inglés).

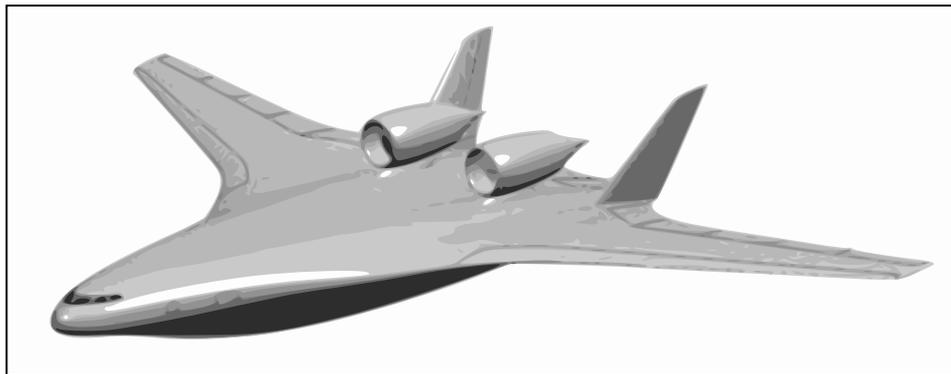


Figura 1-2 Prototipo N2A de Avión de Ala/Fuselaje Integrados [Imagen Recuperada de www.nasa.gov]

Como se puede deducir, el desarrollo de productos estructurales es tan complejo y tan costoso que puede ser el parte-aguas de una compañía entre el éxito y el fracaso. Resultado de esto es que un producto aeronáutico, llámese avión o motor, se lleva a cabo muy esporádicamente. Como ejemplo, se pueden citar los aviones más vendidos de todos los tiempos: El Boeing 737 y el Airbus A320 introducidos al mercado en 1968 y en 1988 y pertenecientes a uno de los segmentos de mercado más rentable de la aviación comercial como lo es el de fuselaje estrecho con un solo pasillo (fuselaje de entre 3 a 4 metros con capacidad de entre 100 y 200 pasajeros). Aunque existen distintas modificaciones y actualizaciones como el B737-600, B737-700, A318 y A319, estas modificaciones generalmente involucran cambios en el sistema de propulsión a motores de mayor potencia y más eficientes y la extensión del fuselaje manteniendo la misma sección transversal. Sin embargo, la estructura en general se conserva intacta. Como se puede observar, a pesar de su éxito en ventas, la diferencia de tiempo de introducción entre uno y otro fue de 20 años. No es hasta la actualidad, 25 años después del Airbus A320, que Bombardier toma el riesgo de un avión totalmente nuevo con su apuesta de la Serie C.

1.2.2 Técnicas Cognoscitivas

La aplicación de técnicas cognoscitivas en la optimización tiene su origen en los 50's con la creación de la computación evolutiva.

En los 60's surgió un desarrollo más exitoso, cuando se introdujo una técnica llamada estrategia evolutiva. En esta técnica no había población ni cruzamiento; un padre mutaba para producir un descendiente, y se conservaba el mejor de los dos, convirtiéndose en el padre de la siguiente ronda de mutación.

En los años 80's, el método de Recocido Simulado fue creado independientemente por S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt y M. P. Vecchi. Este método consiste en un algoritmo probabilístico de optimización, el cual ubica una buena aproximación del óptimo global de una función dada en un espectro amplio de búsqueda.

Otra técnica que se ha explorado últimamente es la de los algoritmos genéticos de población variable. Esta técnica se ha investigado para incrementar su eficiencia, ya que su evaluación tiene una lenta convergencia y es necesaria una cantidad considerable de recursos computacionales. Para aplicaciones complejas se han llegado a utilizar los algoritmos genéticos multiobjetivos, paralelos y métodos para prevenir una convergencia demasiado rápida a un óptimo local. [Ref. 7]

Otra técnica novedosa es la optimización topológica en la determinación de la longitud cromosómica del individuo en algoritmos genéticos adoptivos, basándose en filtros de energía de deformación, los cuales han demostrado su

utilidad en problemas simples de barras en voladizo o soportes planos, sin embargo, la técnica no se ha escalado a problemas más complejos. [Ref. 8]

Esta técnica ha sido utilizada, inclusive, para optimizar torres de turbinas eólicas reduciendo peso en su base e inercia en sus álabes que disminuyen su eficiencia energética [Ref. 9]

Adicionalmente, son pocas las aplicaciones de optimización cognoscitivas en la industria aeronáutica, como lo indica Anderson [Ref. 10], sin embargo, resaltan algunos trabajos aislados.

La mayor parte de las aplicaciones se han enfocado en la forma aerodinámica de componentes aeronáuticos. Como ejemplo se cita el trabajo de Viccini y Quagliarella, que muestra la utilización de los algoritmos genéticos para la optimización de una superficie sustentadora de un ala supersónica [Ref. 38]. Jones et al. presentan la aplicación de algoritmos genéticos para la optimización aerodinámica y aeroacústica de álabes rotatorios, en la cual 20 variables definen la superficie del componente por medio de splines [Ref. 40]. Lee et al. muestran un algoritmo multidisciplinario para la optimización de un álabe rotatorio, en la cual no se toma exclusivamente el aspecto aerodinámico, sino también dinámico, estructural y de eficiencia [Ref. 43].

Por el lado del diseño preliminar de una aeronave (más no su estructura), se puede resaltar el trabajo de Kroo et al. sobre el diseño multidisciplinario [Ref. 39]. Ali et al. muestran un interesante algoritmo sobre la optimización conceptual de un aeronave en la cual la forma del ala, fuselaje y estabilizador horizontal son definidos amplificando su aero-sustentabilidad [Ref. 12]. Un trabajo similar fue realizado por Marta, en el cual la distribución de los componentes primarios de un avión (ala, fuselaje, etc.) son optimizados para aumentar su eficiencia [Ref. 13].

Existen otras aplicaciones sobre las operaciones en la industria aeronáutica, como el desarrollado por Xiao-Bing et al. sobre los cuellos de botella que se generan por las llegadas y partidas de las pistas de aeropuertos [Ref. 41]. Biolat [Ref. 42] a su vez presenta una aplicación basada en algoritmos genéticos para la asignación de "gates" o puertas de partida para aeronaves en aeropuertos congestionados. Pesic et al. aplicaron los algoritmos genéticos para optimizar las rutas de tráfico sobre tierra de las aeronaves en aeropuertos caóticos por su alto número de operaciones [Ref. 44].

En el campo estructural, aunque se han publicado pocas aplicaciones, cabe destacar el trabajo de Xie y su grupo durante los últimos años al aplicar técnicas cognoscitivas al diseño estructural de las aeronaves. Como ejemplo, se cita su trabajo de optimización de espesores para vigas,

rigidizantes y paneles de un ala de avión, siendo esta una aplicación a un problema complejo y realista, como el que se busca en este trabajo de investigación [Ref. 11].

1.3 Hipótesis

Como ha sido descrito anteriormente, en la industria aeronáutica se requieren diseños optimizados para que sean competitivos en un mercado cada vez más agresivo.

Sin embargo, las técnicas utilizadas no son lo suficientemente adecuadas para ser utilizadas en las distintas etapas del diseño, sobre todo por la gran cantidad de requerimientos y variables de diseño.

Por otra parte, aunque existen una infinidad de trabajos de técnicas cognoscitivas de optimización, existen muy pocos de ellos aplicados a la industria aeronáutica. La gran mayoría de ellos son aplicados a la optimización aerodinámica y son prácticamente nulos aquellos enfocados en optimización estructural.

La hipótesis planteada de este trabajo es la que es posible aplicar técnicas de optimización cognoscitiva que sean adecuadas al alto nivel de restricciones y variables de diseño de los elementos estructurales de la industria aeronáutica y que a su vez estas técnicas sean lo

suficientemente rápidas y precisas para que sean utilizadas en las distintas etapas de diseño.

Se explorará la conveniencia de adoptar estos métodos en el caso de estudio de la junta atornillada de una carcasa bridada utilizada en una turbina aeronáutica. Se optará por incluir los requerimientos estructurales de la agencia federal de aviación y evaluar el diseño bajo cargas normales de operación, límite y últimas que correspondan a un caso de diseño realista. Esta junta se muestra en la figura siguiente.

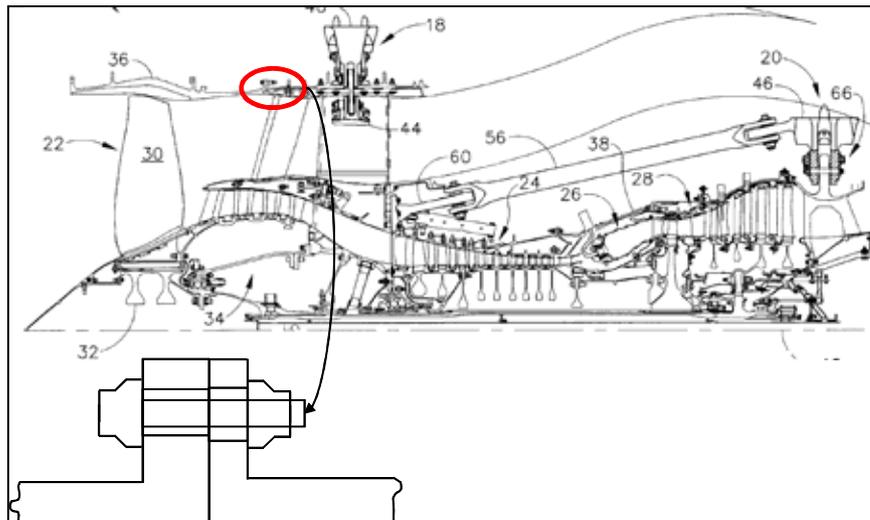


Figura 1-3 Junta Atornillada de Carcasa de Ventilador Principal
[Imagen Recuperada de Patente US6,607,165]

1.4 Objetivos

Evaluar la aplicación de técnicas de computación cognoscitivas en casos de diseño estructural aplicado a elementos aeronáuticos y compararlas en tiempo, procesamiento de cómputo e interacción con el diseñador, con el método de diseño actual.

2. ALGORITMOS GENÉTICOS

2.1 Introducción

En las décadas de 1950 y 1960, diferentes matemáticos y científicos computacionales estudiaron independientemente sistemas evolutivos para la resolución de problemas ingenieriles basándose en la forma en que la naturaleza se adapta y transforma en función del entorno que la rodea.

Las primeras bases, aún sin existir los algoritmos genéticos como tal, se dieron con los trabajos de "evolución estratégica" de Rechenberg (1965), quien utilizaba métodos para optimizar parámetros en diseños aerodinámicos [Ref. 14]. Más tarde, Fogel, Owens y Walsh (1966) desarrollan su "programación evolutiva", [Ref. 15] una técnica evolutiva rudimentaria en donde cada candidato evoluciona aleatoriamente, mutando su genética hasta lograr óptimos.

A pesar de que distintos científicos trabajaron en el tema, como Friedman (1959), Bremermann (1962), Fraser (1957), etc., se reconoce a John Holland, y su equipo de estudiantes y colegas en la universidad de Michigan, como el creador de los algoritmos genéticos.

Mientras que anteriormente, la investigación de técnicas evolutivas tenía como objetivo resolver problemas de ingeniería, Holland estudió las leyes de adaptación evolutiva como ocurren en la naturaleza y su modelización matemática, de tal forma que pudieran utilizarse en sistemas computacionales. El algoritmo propuesto por Holland incluía términos genéticos en el cual una población compuesta genéticamente por "cromosomas" o cadenas de bits binarios se modificaba generación tras generación, a través de "selección natural", a través de "reproducción" y "mutación" [Ref. 16].

Puesto que, al igual que lo que ocurre en la naturaleza en donde no hay "ser perfecto", Holland siempre puso énfasis en que los algoritmos genéticos son una herramienta de proceso de búsqueda que puede generar soluciones competitivas, sin embargo, los algoritmos genéticos no deberían catalogarse estrictamente como una herramienta de optimización.

A pesar que las bases de los algoritmos genéticos fueron desarrolladas en la década de 1960, no fue hasta la década de 1990 en que realmente se continuaron los trabajos investigación en este tema. Indudablemente este resurgimiento se dio en gran parte gracias a los avances computacionales que se dieron en ese tiempo.

Con la finalidad de facilitar la comprensión de los operadores y módulos de los algoritmos, se definen a continuación los términos genéticos utilizados:

Cromosomas: Todo ser viviente está compuesto de células, y cada una de ellas está compuesta de uno o más cromosomas, o cadenas de ADN, las cuales sirven como la huella digital del algoritmo. En el caso de los Algoritmos Genéticos, los cromosomas son aquellas cadenas de bits que engloban una o más características de la solución o diseño.

Gen: Se puede definir como el paquete genético que define una característica, como sería el color de los ojos o la complejión de un individuo. En los AG, estos estarían representados como la serie de bits que definen una característica. En la teoría de los algoritmos genéticos, a estas cadenas de bits se les denomina esquemas.

Alelos: Estos son las diferentes opciones que puede presentar un gen, por ejemplo, las diferentes tonalidades de color de ojos. En los AG, los alelos son representados con el valor 1 o 0 en una cadena de bits que representan un gen en particular.

Genoma: Es toda la información genética de un organismo, compuesta de todos sus cromosomas. En los AG, está representada por toda la cadena de bits que definen todas las características de un diseño o solución

Genotipo: Se refiere a un grupo particular de genes que forman el genoma del individuo. Por ejemplo, un individuo tendrá un genotipo físico, el cual engloba los genes que definen la forma del individuo, y un genotipo intelectual, que define su capacidad cognoscitiva. En el caso de los AG, estos genotipos son definidos como subconjuntos que permiten la mejor comprensión del algoritmo y son definidos totalmente por el usuario.

Fenotipo: Mientras que el genotipo se refiere a la información genética, el fenotipo representa la característica que es definida por el fenotipo.

La mayor parte de los algoritmos emplean individuos monocromosómicos en los cuales el genoma es igual a su información cromosómica.

2.2 Codificación Genética

La codificación genética consiste en el proceso de modelar características del individuo en forma genética. Este proceso puede utilizar bits, números, arreglos, listas, etc. y su elección depende del tipo de problema a solucionar. A continuación se presentan las opciones más comunes.

Codificación Binaria: Desde los orígenes de los algoritmos genéticos planteados por Holland se han utilizado números binarios para codificar la información genética. Este método resalta por su sencillez, ya que, al igual que en la naturaleza, la compleja información genética está representada por estructuras simples, como es el caso del ADN.

Tomando en cuenta el siguiente ejemplo, con una cadena cromosómica de 10 genes, se tendrían 1024 posibles combinaciones:

Cromosoma 1: 1 0 0 1 1 0 1 0 0 1

Cromosoma 2: 0 0 1 1 0 0 1 1 1 0

Codificación Hexadecimal: En este caso, en lugar de usar números binarios se utilizan números hexadecimales. Esto significa que cada gen puede tener 16 distintos tipos de valores, haciendo la cadena cromosómica más corta y enriqueciendo su espectro de valores potenciales como se muestra en el siguiente ejemplo:

Cromosoma 1: 9 C E 7

Cromosoma 2: 3 D B A

Las anteriores cadenas están formadas por 4 genes, que representan 65,536 posibles combinaciones.

Codificación Decimal: Similar a la codificación hexadecimal, pero utilizando números decimales para representar los genes.

Codificación por Valor: Existen casos en los cuales los genes no representan una característica numérica del individuo. En estas situaciones es conveniente modelar las opciones de los genes directamente con valores asociados al sistema analizado, por ejemplo:

Cromosoma 1: (Rojo) (Verde) (Negro) (Amarillo)

Cromosoma 2: (Aluminio) (Acero) (Titanio) (Inconel)

Cabe destacar que utilizar la codificación por valor requiere adaptar los operadores de los algoritmos, como la reproducción, mutación, etc. (que serán descritos más adelante), ya que estos se basan en la representación de las características de forma numérica.

2.3 Operadores Básicos de los AG

A pesar de que los algoritmos se han modificado a través de los años, estos aún conservan la estructura básica que se presenta en la evolución natural:

Inicialización: En ese paso, se forma una población inicial en el espacio de búsqueda de propuestas de soluciones.

Evaluación: Una vez que se forma la población, las potenciales soluciones son evaluadas en función de la variable a optimizar.

Selección: Consiste en asignar una probabilidad relativa a cada individuo de la generación de ser escogido para una subsiguiente reproducción. El objetivo es que, tal y como sucede en la naturaleza, los individuos que sean evaluados mejor, tengan más probabilidades de ser sujetos a reproducción.

Reproducción: En este paso, el algoritmo recombina partes de la información genética de dos o más potenciales soluciones para crear soluciones.

Mutación: Mientras que el cambio genético en la reproducción se da basado en el contenido cromosómico de las soluciones que funcionan como padres, la mutación modifica el paquete genético de una forma aleatoria sobre toda la población.

Nueva Generación: Una vez que se ha seleccionado, reproducido y mutado la generación original, es creada una

nueva generación con, en teoría, mejor contenido genético bajo el criterio de optimización.

Convergencia: Es el criterio seleccionado en el cual el promedio genético de la población, o del individuo mejor evaluado, cumple con los requisitos determinados al algoritmo.

Estos pasos son repetidos de forma iterativa hasta que se logre el criterio de convergencia.

2.4 Inicialización

La inicialización por medio de una población inicial es un concepto característico de los AG, ya que a diferencia de otros métodos de búsqueda, este depende de que exista una población diversa en la cual existan trazos de la solución buscada. El tamaño de la población, que es normalmente un parámetro definido por el usuario, resulta uno de los factores críticos para el buen funcionamiento del AG.

Por ejemplo, una población pequeña podría converger prematuramente a óptimos locales ya que los trazos genéticos del óptimo global podrían no estar presentes en la población, y aunque exista mutación en esta, no podría ser suficiente para dirigir la evolución de la población hacia óptimos globales.

Por el otro lado, una población extensa no necesariamente tiene una repercusión en la calidad de las soluciones y simplemente agregaría tiempo computacional innecesario.

Contrariamente a la naturaleza, en donde la evolución de individuos complejos multicelulares se dio a partir de seres unicelulares, la forma en que se define el genoma de los individuos de la primera generación es aleatoria y con una dimensión determinada. Es decir, si el genoma se define como una cadena de bits, los valores de 1 o 0 que estos tomarán serán de forma aleatoria.

Mientras que en la mayoría de los algoritmos, este módulo termina cuando la información genética ha sido aleatoriamente generada, algunos otros aplican restricciones a los individuos previamente generados. A estas restricciones se les denominan elitismo y pueden ser aplicadas en distintas fases del algoritmo.

2.4.1 Elitismo en Población Inicial

Existen ocasiones en las cuales es benéfico aplicar ciertas restricciones desde el mismo momento en que la población inicial es definida.

Tomemos como ejemplo el caso de un algoritmo en el cual el módulo de evaluación involucra una raíz cuadrada del valor

de un individuo. Mientras que aleatoriamente el valor de los individuos podría comprender números negativos, esto crearía números complejos no deseados, por lo que una posible restricción sería limitar el fenotipo de los individuos únicamente a valores positivos.

En caso de que un individuo no cumpla con la restricción elitista en este módulo, simplemente se desecha el individuo creado y se procede a la creación de uno nuevo, así sucesivamente hasta lograr el número de individuos requerido en la población definido por el usuario.

El ejemplo anterior es algo simplista. En muchos casos las funciones elitistas se definen de forma compleja dependiendo de la relación de varios parámetros y son definidas en función particular del sistema a optimizar.

2.5 Selección

De acuerdo con la teoría de la evolución de las especies de Darwin, sólo los individuos mejor adaptados a su entorno son aquellos que sobreviven al paso del tiempo. Para recrear el concepto básico de esta teoría, es necesario escoger a los individuos mejor evaluados de la población ya que estos crearán el genoma de futuras generaciones.

Es de extrema importancia aplicar una selección adecuada al sistema a analizar en conjunto con los métodos de reproducción y mutación que serán explicados más adelante. Un método de selección demasiado agresivo, en el cual solamente unos cuantos individuos altamente evaluados son identificados para las reproducciones, generará que estos pocos individuos que representan óptimos localizados guiarán el curso de las futuras reproducciones, reduciendo la diversidad necesitada para el cambio natural. Por el otro lado, un sistema demasiado débil resultará no solamente en un proceso de optimización extenso y tardado, sino que puede, al igual que un método de selección agresivo, llevar a óptimos localizados y no globales, ya que una vez que un individuo genera un genoma similar al óptimo global, este no tendrá las suficientes probabilidades de ser reproducido y el individuo podría desaparecer sin tener ningún impacto en el desarrollo del algoritmo.

Existen distintos tipos de métodos de selección, sin embargo, se presentan los dos más utilizados en los AG.

2.5.1 Selección por Ruleta

El método de emparejamiento utilizado es el denominado de ruleta, en el cual, siguiendo la analogía de una ruleta, se tira una bola en una ruleta en donde las casillas corresponden a individuos. Así, al tirar un número igual de

veces la bola que la cantidad de individuos en la población, se logra una matriz de posibles candidatos a aparearse.

Como es de suponer, si los individuos están igualmente representados en la ruleta, este método seleccionaría individuos de forma aleatoria y el candidato a aparearse tendrá las mismas probabilidades de ser escogido entre un individuo "bueno" que un individuo "malo".

La clave de este método es asignar el tamaño de cada casilla de una forma que privilegie las posibilidades de ser seleccionado a los individuos "buenos" donde esta cualidad se define como aquel que cumple con los requerimientos de diseño, pero minimiza la variable a optimizar que es el peso (o volumen si todos los materiales son iguales) añadido al sistema. Esto se logra al evaluar relativamente cada individuo comparado con el promedio de la población y a partir de ahí asignar un valor ponderado a su probabilidad de ser escogido utilizando las ecuaciones siguientes:

$$\bar{f} = \sum_1^{npop} \frac{f_i}{npop} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

$$Eval Rel_i = \frac{f_i}{\bar{f}} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

donde n representa el número de individuos, f_i la función evaluadora del miembro i -ésimo, \bar{f} es la evaluación promedio de la generación.

Para explicar mejor este concepto, considérese el ejemplo de la Tabla 2-1 en donde la población está conformada por 6 individuos y en donde cada uno añade un volumen determinado al diseño.

Tabla 2-1 Ejemplo Selección de Emparejamiento

Individuo	Volumen	1/Volumen	Eval. Relativa	Eval. Rel. Acumulada
1	19	0.0526	17.5%	17.5%
2	17	0.0588	19.5%	37.0%
3	24	0.0417	13.8%	50.8%
4	12	0.0833	27.7%	78.5%
5	33	0.0303	10.1%	88.6%
6	29	0.0345	11.4%	100.0%
Evaluación Absoluta		0.3012		

Como se deduce de la Tabla 2-1, el individuo #4 tiene más probabilidades de ser elegido para aparearse en función que es el individuo que menos volumen añade al diseño. Lo contrario se deduce del individuo #5. La Figura 2-1 muestra gráficamente como se verían estos resultados como si fueran una ruleta.

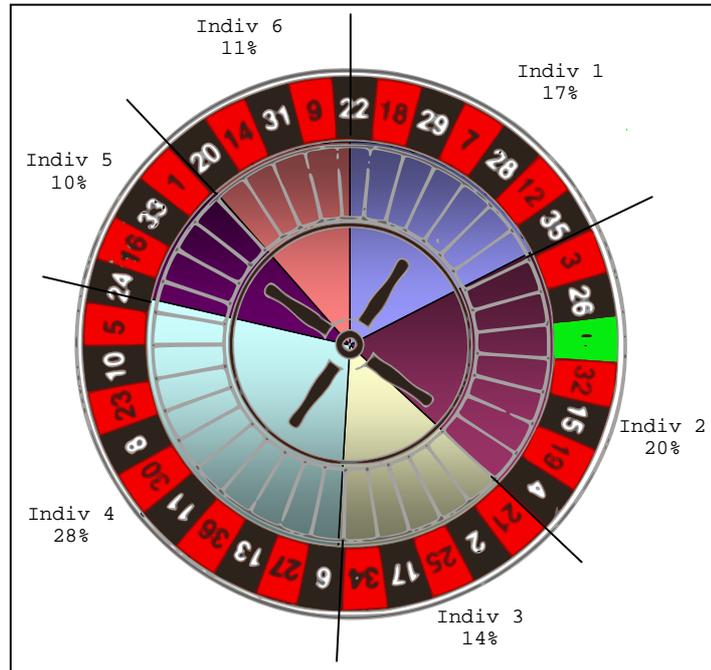


Figura 2-1 Ejemplo de Sistema de Selección de Ruleta Rusa [Imagen Recuperada de www.acanomas.com]

2.5.2 Selección Universal Estocástica

Como se explicó anteriormente, el método de ruleta deja totalmente aleatoria la selección de los individuos una vez que se han escogido los espacios en la ruleta. Esto permite, sobre todo en poblaciones compuestas por pocos individuos, que los individuos sean escogidos para las reproducciones de una forma muy diferente al valor esperado dado por su porcentaje de la ruleta. Incluso en teoría, aunque sea un caso extremo, se puede dar el caso de que sea escogido el peor individuo de la población de forma mayoritaria destruyendo el genoma de los mejores individuos en futuras generaciones.

Por esta razón, James Baker [Ref. 18] propuso un método denominado de Selección Universal Estocástica para minimizar la dispersión existente entre el número real y teórico de los individuos seleccionados.

Mientras que en el método de ruleta, la rueda giraría N veces para seleccionar N cantidad de individuos para reproducir, en el método estocástico universal giraría solamente una vez la rueda, pero esta tendría N espacios iguales para generar N cantidad de individuos. De esta forma miembros con una débil evaluación relativa a la generación serán escogidos al menos una vez, reduciendo la inequidad que les proporcionaría el método de la ruleta.

Tomando el ejemplo de la Tabla 2-1, y visualizándolo como una ruleta en donde es necesario generar 100 individuos, el Individuo 1 sería seleccionado forzosamente 17 veces, el No. 2 20 veces, el No 3 14 veces, y así sucesivamente.

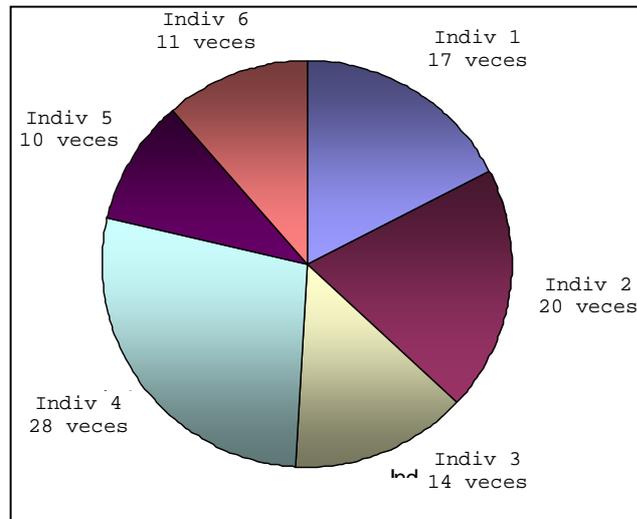


Figura 2-2 Ejemplo de Sistema de Selección Universal Estocástica

Tanto el método de selección de ruleta como la universal estocástica tienen puntos positivos y negativos: Típicamente, en las primeras generaciones hay un pequeño número de individuos que claramente sobresalen por su evaluación al resto de la población. Bajo un método que selecciona en porcentaje a su evaluación como el método de ruleta, estos individuos y sus descendientes serán reproducidos una y otra vez llevando a una convergencia temprana y limitando la capacidad del algoritmo a evaluar otras opciones. Por otro lado, el método de selección estocástica permitirá mantener una selección más equitativa y frenará al algoritmo de sobre-explotar los mismos individuos dando más diversidad a futuras generaciones.

2.5.3 Selección Estadística (Sigma)

En etapas tardías en donde el genoma de los individuos es cada vez más similar, el individuo cuyo genoma presenta ligeras variaciones al resto que le permita estar mejor evaluado tendrá ligeras probabilidades de ser mayoritariamente seleccionado por los métodos de selección por ruleta y universal estocástica, por lo que estas diferencias genéticas pueden ser fácilmente eliminadas del genoma de la población.

Para evitar este problema de convergencia prematura, el método estadístico asigna el valor esperado de ser elegido para una reproducción en función de su evaluación, la media de la población y su desviación estándar.

Un ejemplo del tipo de ecuaciones aplicadas en este método estadístico se muestra a continuación

$$EvalStat = \frac{1 + \frac{f_i - \bar{f}}{2\sigma}}{N}$$

Ecuación 2-3

Tabla 2.1 Ejemplo Selección Estadística

Individuo	Volumen	1/Volumen	Evaluación Estadística	Eval Ruleta
1	19	0.0526	17.70%	17.50%
2	17	0.0588	20.35%	19.50%
3	24	0.0417	13.02%	13.80%
4	12	0.0833	30.85%	27.70%
5	33	0.0303	8.14%	10.10%
6	29	0.0345	9.94%	11.40%
Media		0.0502		
Desv. Estándar		0.0194		

Una de las ventajas de este método es que en las primeras generaciones, cuando existe una desviación estándar grande, los individuos mejor evaluados no estarán alejados por demasiadas desviaciones estándar con respecto de la media, por lo que no guiarán al algoritmo a una pronta convergencia. Por el otro lado, en etapas tardías del algoritmo, cuando existe ya poca diversidad en el genoma de la generación, un individuo mejor evaluado con respecto al resto de la población, aunque sea ligeramente, resaltarán por su distancia en términos de desviaciones estándar con respecto a la media, liderando la convergencia del algoritmo.

2.5.4 Selección por Torneo

Los métodos explicados anteriormente requieren de dos pasos para funcionar, uno para calcular la evaluación absoluta de la población y otro para calcular la evaluación relativa del individuo con respecto al resto de la población. El método de selección por torneo, dependiendo del tipo de aplicación, puede brindar beneficios desde el punto de

vista de eficiencia computacional, ya que sólo requiere de un paso.

Este método inicialmente desarrollado por Holland [Ref. 16] y modificado por Goldberg [Ref. 17] consiste en seleccionar una cantidad determinada de individuos de forma aleatoria, después se procede con una serie de "torneos", en los cuales el ganador será aquel con la mejor evaluación. Este ganador se selecciona como individuo para una posterior reproducción y será cruzado con el ganador del siguiente torneo.

Comúnmente, el número de individuos seleccionados aleatoriamente para el torneo es dos, de esta forma habrá tantos torneos como individuos existan en la población.

Cabe destacar que una vez que dos padres son escogidos por este método para la reproducción, estos regresan al conjunto de potenciales candidatos, garantizando que puedan ser escogidos nuevamente si aleatoriamente así resulta.

Mientras que el método de torneo se utiliza en este caso como un criterio de selección de individuos para su posterior reproducción, se puede también aplicar en el caso en que se requiera un criterio de desempate. Un caso en donde se puede aplicar este método es en el cual se han elegido dos padres por cualquier método, y la reproducción genera individuos que no cumplen con los criterios de

elitismo impuestos al algoritmo. En este caso se puede proseguir a desechar ese par de individuos para la reproducción o poner a competir en torneo a ese par de padres, lo cual generará un nuevo individuo con el genoma del mejor padre.

2.5.5 Selección por Estado Estable

La mayor parte de los algoritmos genéticos utilizan criterios de selección "generacionales", lo que significa que una nueva generación está conformada por totalmente nuevos genes que son producto de la reproducción de la anterior generación.

La selección por estado estable consiste en crear generaciones traslapadas en donde existan individuos que puedan existir en distintas generaciones a la vez. Para lograrlo, se desechan de cada generación solamente N número de individuos, generalmente los peores evaluados de la población, y son reemplazados por nuevos individuos creados por la reproducción de los mejores individuos de la población utilizando cualquiera de los métodos explicados anteriormente.

Este tipo de selección es particularmente robusto en el caso de algoritmos de enseñanza previa, como cuando se combinan con redes neuronales. De esta forma, el

aprendizaje que ha logrado un individuo bien evaluado no será desechado de la población.

2.6 Reproducción

Una vez seleccionados los individuos en función de su evaluación, el genoma de estos es recombinado para crear nuevos y, teóricamente hablando, mejores individuos. A este proceso se le denomina de reproducción. Existen numerosos métodos de reproducción, entre estos se pueden mencionar los siguientes:

2.6.1 Punto de Cruce Único

El sistema de reproducción por cruce único es el más simple y antiguo de los métodos de reproducción en los algoritmos genéticos.

En este método, la o las cadenas cromosómicas de dos individuos son superpuestas. Después se define aleatoriamente un punto de cruce único que rompe la cadena de genes, generando cuatro cadenas, las cuales se recombinan generando dos nuevos individuos: el primer individuo con la primera cadena del primer padre y la segunda cadena del segundo padre, y el segundo individuo con la segunda cadena del primer padre y la primera cadena del segundo padre, como lo muestra la Figura 2-3.

Sin embargo, este método, aunque simple y eficiente en la mayoría de los casos, presenta algunos inconvenientes. Uno de ellos es que, al haber un solo punto de cruce, no existirá combinación genética salvo en un solo gen que produzca una característica del diseño. Por ejemplo, este método no podría combinar cromosomas como 11*****1 y ****11** para formar un nuevo cromosoma 11**11*1. De la misma forma, genes creados por esquemas extensos (una larga cadena de bits) tienen mayor probabilidad de ser divididos que aquellos genes formados por esquemas más pequeños.

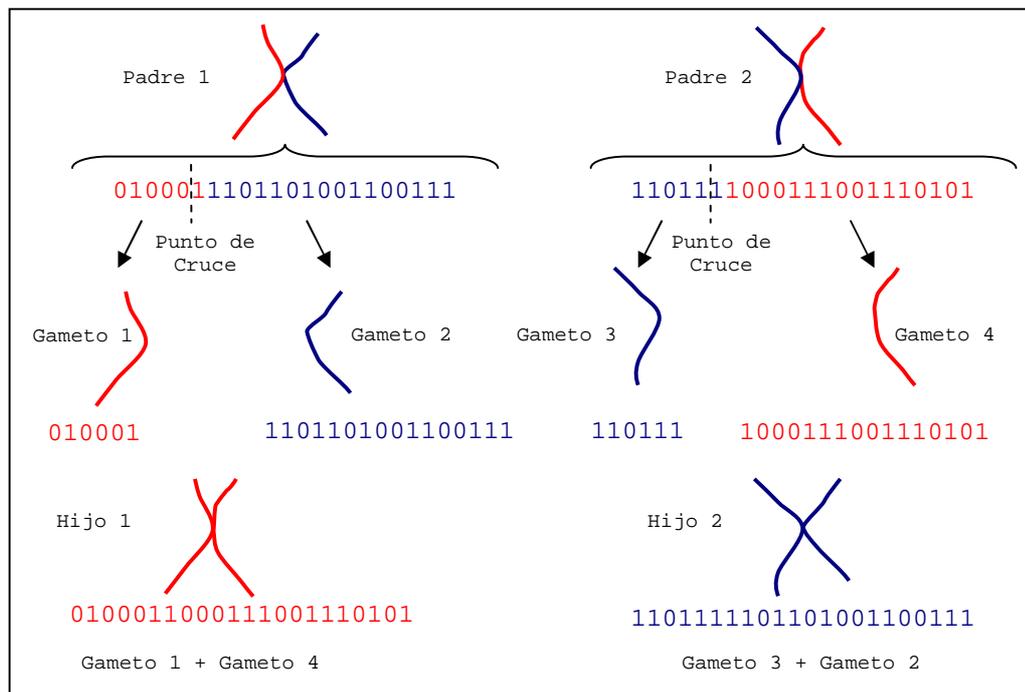


Figura 2-3 Ejemplo de Sistema de Reproducción de Cruce Único

Al contrario de lo ocurre en la selección natural, en donde la combinación genética se da en cada gen que rige el

genoma de los seres, este método sólo permite crear combinación del genoma, en el mejor de los casos, en un solo esquema pues el punto de cruce podría caer entre dos esquemas, evitando la combinación de información genética.

Poniendo de ejemplo el caso de la Figura 2-4, con este método de cruce, los nuevos individuos tendrían los ojos, pelo, nariz, mentón y cuerpo de alguno de los padres, y sólo en la altura podría haber una combinación de la información genética de los padres.

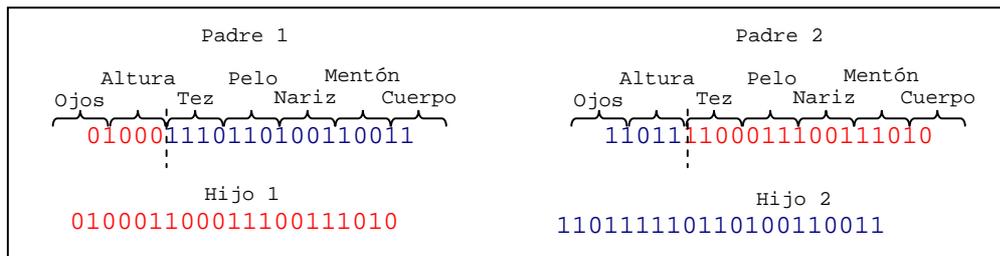


Figura 2-4 Ejemplo de Reproducción de Cruce Único

Adicionalmente, el método de reproducción de cruce único presenta el inconveniente de que la posición del esquema en el cromosoma tiene un efecto en el resultado genético de los nuevos individuos. Tomando nuevamente el ejemplo de la Figura 2-4, los individuos tendrán más probabilidades de tener el mentón y cuerpo de uno de los padres que los ojos y cuerpo, ya que el esquema de los ojos y cuerpos se encuentran a los extremos en el cromosoma.

2.6.2 Punto de Cruce Múltiple

El método de reproducción de cruce doble trata de reducir el problema de sólo intercambiar información genética de un esquema y minimizar el problema de posicionamiento de los esquemas en la cadena cromosómica al incrementar los puntos de cruce. La Figura 2-5 muestra este método con dos puntos de cruce.

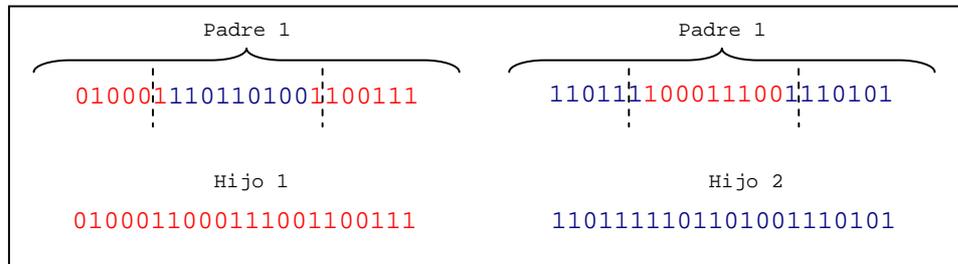


Figura 2-5 Ejemplo de Reproducción de Cruce Doble

2.6.3 Reproducción Uniforme

Este método consiste en mezclar bit por bit el contenido genético de los padres, ya sea por el usuario o de forma aleatoria. Al porcentaje de genes que corresponderá a cada padre se le denomina relación de mezcla. En caso de una relación de mezcla del 50%, cada gen de los nuevos individuos tendrá la misma probabilidad de provenir tanto del padre 1 como del padre 2, como lo muestra la Figura 2-6.

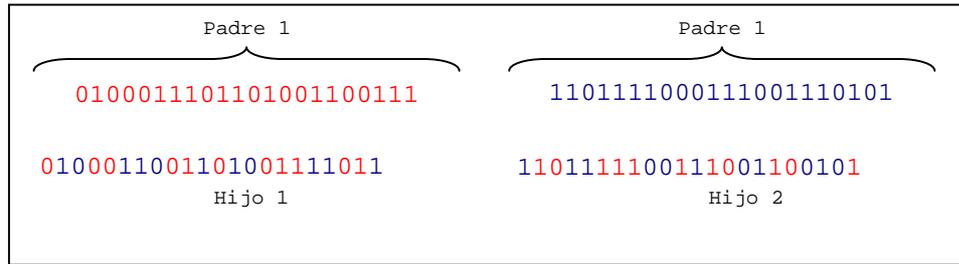


Figura2-6 Ejemplo de Reproducción Uniforme

Este método tiene la particularidad de permitir el intercambio genético a nivel de genes y no a nivel de esquemas como era el caso de los puntos de cruces únicos y múltiples. Sin embargo, en algunos casos podría tener la desventaja de romper las cadenas de bits que forman un esquema y fenotipo particular.

2.6.4 Reproducción Aritmética

En este método, el esquema de los nuevos individuos se define como una combinación lineal de los esquemas de los padres. Como puede suponerse, el esquema tiene que ser representado por valores numéricos, y podrían representar por ejemplo la altura de un individuo. Las ecuaciones utilizadas se muestran a continuación.

$$\begin{aligned}
 Esquema_{hijo1} &= (a)(Esquema_{padre1}) + (1-a)(Esquema_{padre2}) \\
 Esquema_{hijo2} &= (1-a)(Esquema_{padre1}) + (a)(Esquema_{padre2})
 \end{aligned}$$

Ecuación 2-4

donde a es un factor que puede ser tanto definido por el usuario como por el algoritmo de forma aleatoria.

Poniendo de ejemplo que la altura del padre 1 y 2 corresponde a 1.80m y 1.65m respectivamente y el factor a es definido como 0.3, la altura del primer hijo sería 1.695m y la del segundo sería 1.755m.

2.7 Mutación

En gran parte, el operador reproducción es el que más influye en la diversidad de la población en un algoritmo genético, teniendo el operador de mutación más bien un rol secundario, contrario a los primeros trabajos de programación evolutiva, donde la mutación era la única opción de diversidad en las soluciones.

A pesar de su impacto relativamente pequeño en los algoritmos genéticos, la mutación permite evitar que el algoritmo converja prematuramente a soluciones locales y no globales.

Al igual que lo que ocurre en la naturaleza, las mutaciones son pequeñas variaciones en la cadena cromosómica que alteran el fenotipo de un individuo. Muchas veces estas variaciones son imperceptibles, sin embargo, algunas tienen una gran repercusión en la evaluación del individuo, ya sea

positiva o negativamente. En el caso de un salto genético negativo, rápidamente esta información será desechada al ser poco probable la selección del individuo portador de este código, sin embargo, si es positiva, puede guiar el algoritmo hacia ese nuevo código genético que acaba de ser descubierto en la población.

2.8 Nueva Generación

Una vez que se han generado nuevos individuos a partir de la reproducción, y cambiado ligeramente el genoma de la población por medio de la mutación, la nueva generación está lista para ser creada.

Esta puede estar compuesta por todos aquellos individuos nuevos o incluir individuos de generaciones anteriores. Como se explicó anteriormente, existen casos sobre todo cuando se aplican redes neuronales en los que es recomendable incluir cierto porcentaje de las generaciones anteriores para garantizar que el aprendizaje de los individuos no se pierda.

En esta etapa se suele incluir criterios de elitismo, los cuales pueden consistir en excluir los individuos pobremente evaluados o copiar el cromosoma de los mejores individuos de la generación anterior en la nueva.

2.9 Criterios de Convergencia

Como con los operadores anteriores, existen diversos criterios de convergencia para los algoritmos genéticos.

2.9.1 Número de Generación

Este criterio simplemente indica un número finito de generaciones en los cuales el algoritmo estará buscando una solución al problema planteado. Este criterio es comúnmente superpuesto a alguno de los criterios mencionados a continuación, de esta forma se controla al algoritmo a no iterar indefinidamente y llegar al número de generaciones descrito por el usuario, que da por terminado el proceso.

2.9.2 Tiempo de Cómputo

Este método controla el tiempo computacional requerido para los cálculos internos del algoritmo genético. Es particularmente útil en problemas complejos que requieren de una gran cantidad de iteraciones que conllevan largos tiempos de cómputo y, por lo mismo, dinero invertido en la solución. Al igual que el criterio de número de generaciones, este criterio comúnmente se utiliza de manera adicional a algún otro método. Así si el algoritmo no cumple alguno de los otros métodos hasta el tiempo determinado por el usuario, el proceso llega a su fin.

2.9.3 Evaluación Mínima

Este criterio, ampliamente utilizado en los algoritmos genéticos, se da cuando la evolución promedio de la población en una generación dada, o el individuo mejor evaluado de ella, cumplen los requerimientos mínimos especificados por el usuario. Este puede estar dado como un porcentaje de la evaluación de la solución inicial. Este método no es común, ya que los algoritmos genéticos se utilizan sobre todo para lograr encontrar óptimos globales, sin importar que tan alejados estén de una solución inicial. Sin embargo, en situaciones de algoritmos complejos y tiempos de cómputo largos y costosos, encontrar una solución con una evaluación mínima definida por el usuario puede ser más que suficiente.

2.9.4 Convergencia en la Evaluación

Esta convergencia, también muy común, se da cuando la variación entre generación y generación de las soluciones del promedio de la población o el individuo mejor evaluado está dentro del parámetro definido por el usuario.

El usar este criterio de convergencia únicamente aplicado a la generación puede ser contraproducente ya que, sobre todo en etapas tempranas en donde suele haber bastante dispersión, los promedios de las poblaciones no cambian radicalmente, sino que los mayores cambios se dan

precisamente en disminuir la dispersión de las soluciones. De la misma forma, aplicar el criterio únicamente al mejor individuo puede terminar el proceso de forma prematura al no considerar una mejora en la población que podría generar, por medio de reproducciones o mutaciones, mejores individuos que el mejor evaluado en esa generación.

Para minimizar los problemas descritos anteriormente, se opta frecuentemente por un criterio de convergencia combinado, en el cual se debe de cumplir tanto el criterio impuesto a la población, como el criterio al mejor individuo. Adicionalmente, para minimizar también las convergencias prematuras, se elige frecuentemente indicar el número de generaciones en las cuales los criterios de convergencia tienen que ser cumplidos. Este número depende en gran parte en la naturaleza del problema y es una variable de gran importancia para el correcto funcionamiento del algoritmo.

2.9.5 Convergencia Estadística

Como se describió anteriormente, medir solamente la media de la población o el mejor individuo puede llevar a convergencias prematuras. Tratando de evitar estas convergencias, este método o en realidad grupo de métodos por la variación en la forma en que se aplica, consiste en evaluar no sólo el promedio de la población o el mejor individuo, sino también la desviación estándar,

percentiles, cuartiles y otros parámetros estadísticos de las soluciones.

2.9.6 Convergencia Genética

Esta convergencia se da cuando la información genética, nuevamente tanto de la población o del individuo mejor evaluado, presenta cambios de generación en generación menor al criterio definido por el usuario.

Este criterio es similar al criterio de convergencia en la evaluación, ya que están íntimamente ligados. Mientras que el criterio en la evaluación está asociado al fenotipo del individuo, el criterio de convergencia genética está ligado al o a los cromosomas que generan este fenotipo. De esta forma se puede decir que los beneficios y desventajas de este par de métodos son compartidos.

3. DISEÑO DE JUNTAS ATORNILLADAS

3.1 Introducción

Los tornillos han sido ampliamente utilizados en la industria como instrumento de sujeción entre dos o más partes distintas. A pesar de su extensa aplicación, estas juntas son comúnmente malinterpretadas y poco estudiadas en parte por la gran cantidad de factores que rigen su diseño.

Para comenzar, como una primera división, las juntas atornilladas se diferencian entre sí por la forma en que las fuerzas de los cuerpos a unirse son transferidas: estas pueden ser a cortante o a tensión.

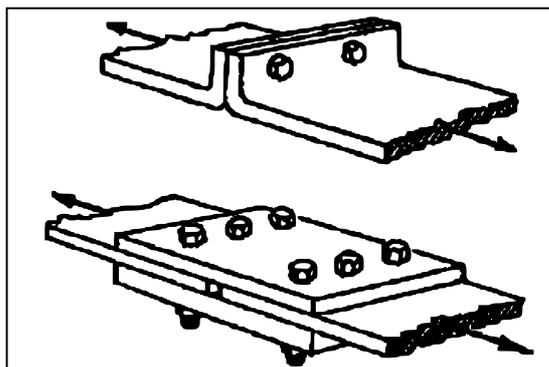


Figura 3-1 Juntas a Cortante y a Tensión [Imagen Recuperada de Ref.24]

Las juntas a cortante son aquellas en las que las fuerzas están orientadas perpendicularmente respecto al eje de los

tornillos, mientras que para las juntas a tensión, los ejes están alineados.

La mayor parte del contenido de este trabajo explora únicamente las juntas a tensión, ya que estas son las cargas mayoritarias que se transmiten en una junta atornillada utilizada en las turbinas de gas, sin embargo, y como se verá en el capítulo siguiente, cargas a cortante existen y son incluidas en el diseño de la junta.

Como regla general, el objetivo de una junta atornillada a tensión es de mantener una tensión en el tornillo tal que prevenga una separación de los cuerpos a unir bajo cargas externas (térmicas, mecánicas, vibración, etc.).

Puesto que los elementos incluidos en la junta son elementos comúnmente elásticos, esta puede modelarse como un sistema de resortes, en el cual los tornillos actúan a tensión, y los elementos a unir como resortes a compresión. De esta forma, toda la teoría mostrada a continuación se basa en este principio.

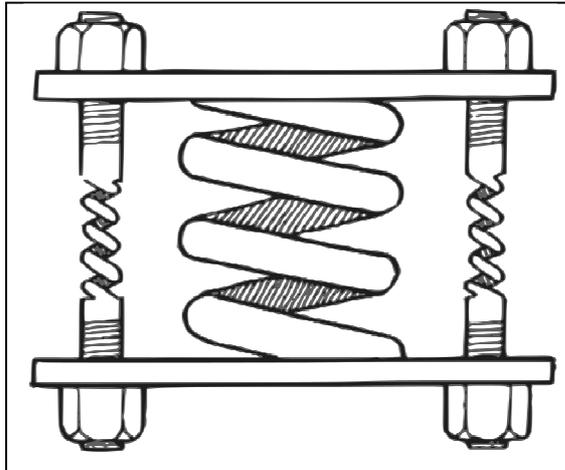


Figura 3-2 Junta Atornillada como Sistema de Resortes [Imagen Recuperada de Ref.24]

3.2 Juntas a Tensión

El objetivo básico de esta junta, como se explicó anteriormente, es mantener una compresión suficiente creada bajo una precarga en los tornillos, tal que prevenga una separación o fuga en los cuerpos a unir.

Consecuentemente este principio dicta mantener la compresión en la junta bajo cualquier tipo de carga externa. Sin embargo, y de una forma general, el incremento en una carga a tensión externa crea un incremento en la tensión de los tornillos.

Si la precarga de un tornillo es demasiado alta, el tornillo estará sujeto a cargas tales que lo hagan ceder o incluso romper. Una precarga demasiado baja hará que las

cargas en la junta prácticamente desaparezcan, lo que significa una separación en la junta.

Con objeto de tener una mejor representación del comportamiento de una junta atornillada, se graficará la tensión en el tornillo, la compresión en la junta y la carga externa aplicada como lo muestra la Figura 3-3.

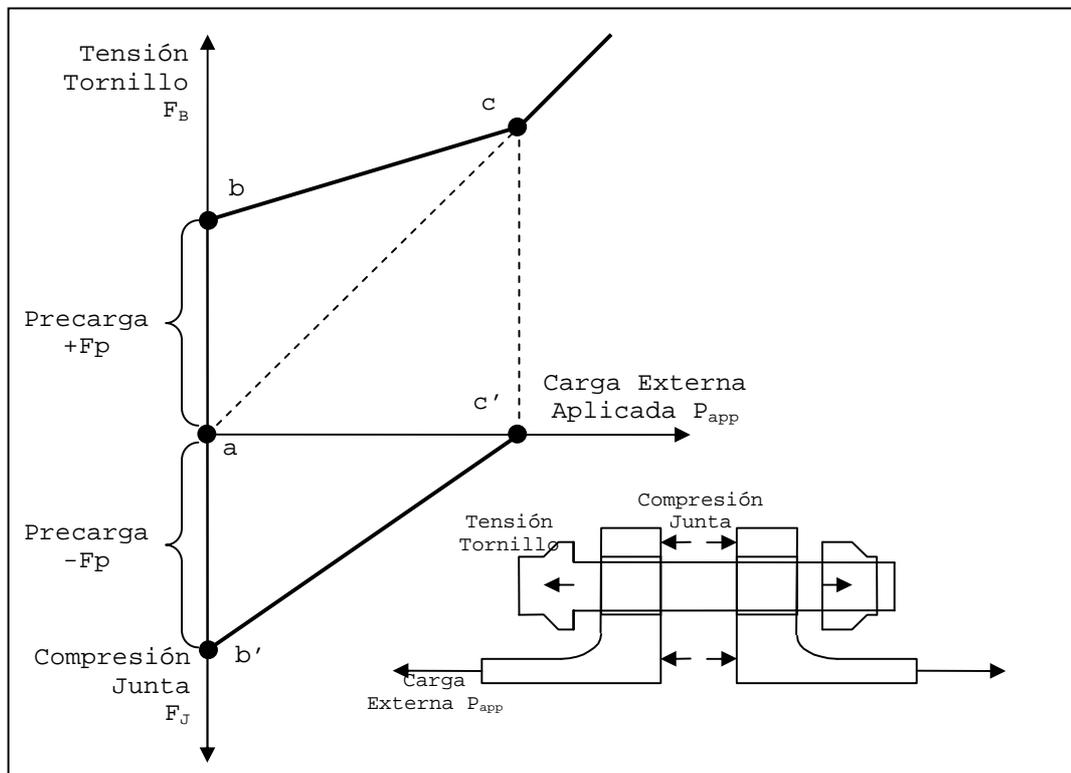


Figura 3-3 Modelo del Tornillo para Cálculo de Rigideces

La junta sin ningún tipo de carga externa cambia del punto **a** al punto **b** en el momento en que aplica una precarga. Como puede observarse, aunque de magnitud idéntica, la precarga se traduce como una fuerza a tensión en el tornillo y una

fuerza a compresión en la junta. Conforme se van aplicando cargas externas, la compresión en la junta va disminuyendo paulatinamente. De la misma manera la tensión en el tornillo va aumentando. Finalmente, en el momento en que la precarga en la junta desaparece se llega al punto de separación de la junta representado por el punto **c**. Toda carga aplicada después del punto de separación será reaccionada igualmente por el tornillo, es decir, la carga externa será la misma que la del tornillo.

Puesto que uno de los criterios fundamentales es que la junta no se separe, se espera que las cargas en la junta oscilen entre el punto **b** y **c**. La pendiente de las cargas en el tornillo y la junta dependen de la relación de rigideces del sistema que se explicará a continuación.

3.3 Rigideces y Deformaciones

Puesto que la junta atornillada se comporta como un sistema de resortes, las rigideces de los elementos definen las cargas y deformaciones a las que estarán sujetos y finalmente estas cargas y deformaciones son las que definen el comportamiento de la junta.

Para analizar las rigideces del sistema, se definirán dos tipos de elementos en la junta: elementos fijos, y elementos fijantes. Los elementos fijos son aquellos que

son sujetos a cargas externas, mientras que los elementos fijantes son los que retienen en su posición al sistema como lo muestra la figura siguiente.

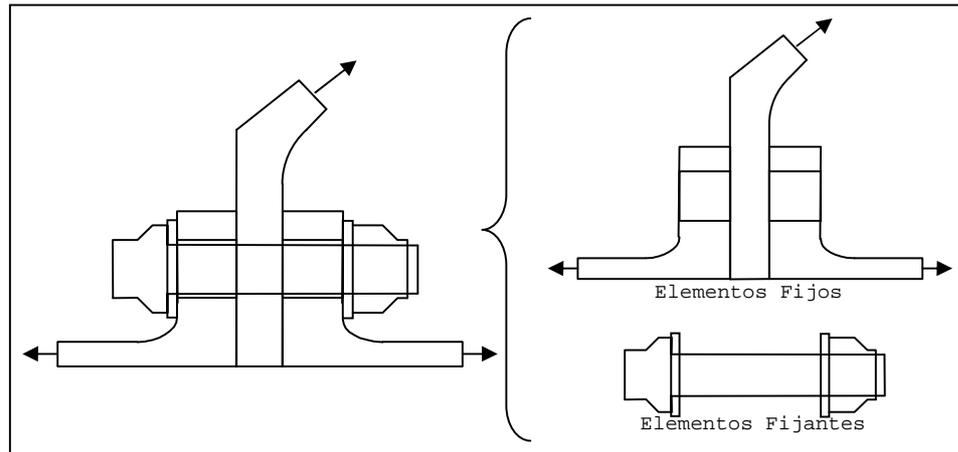


Figura 3-4 Elementos Fijos y Fijantes en una Junta

3.3.1 Rigidez del Tornillo y Tuerca

En una junta atornillada típica, los elementos fijantes los constituyen los tornillos, tuercas y arandelas.

Para el caso de los tornillos, el cambio de dimensión se calcula como la suma del cambio de dimensión de cada uno de sus elementos:

$$\Delta L_T = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 + \dots + \Delta L_n \quad \text{Ecuación 3-1}$$

Considerando la ley de Hooke, el cambio de longitud en cada segmento del tornillo se describe como:

$$\Delta L = \frac{F L}{E A} \quad \text{Ecuación 3-2}$$

donde ΔL corresponde al cambio de longitud, F a la fuerza aplicada, L a la longitud de cada sección, E al módulo de elasticidad y A a la sección transversal.

La rigidez de un cuerpo está definida como:

$$K = \frac{F}{\Delta L} \quad \text{Ecuación 3-3}$$

Considerando la Ecuación 3-1 a la Ecuación 3-3, la rigidez de todo el tornillo puede calcularse como:

$$\frac{1}{K_{bolt}} = \frac{L_1}{E A_1} + \frac{L_2}{E A_2} + \frac{L_3}{E A_3} + \dots + \frac{L_n}{E A_n} \quad \text{Ecuación 3-4}$$

Para la aplicación de la Ecuación 3-4, la longitud de los segmentos que tiene un impacto en la rigidez del tornillo tiene que ser definida. Sin embargo, en un tornillo real, la longitud efectiva no es la porción del tornillo que se encuentra entre los cuerpos a unir. Esto se debe a que parte de la cabeza del tornillo en un extremo, y parte de las cuerdas y tuerca en el otro extremo contribuyen a la rigidez total del tornillo como lo muestra la Figura 3-5 .

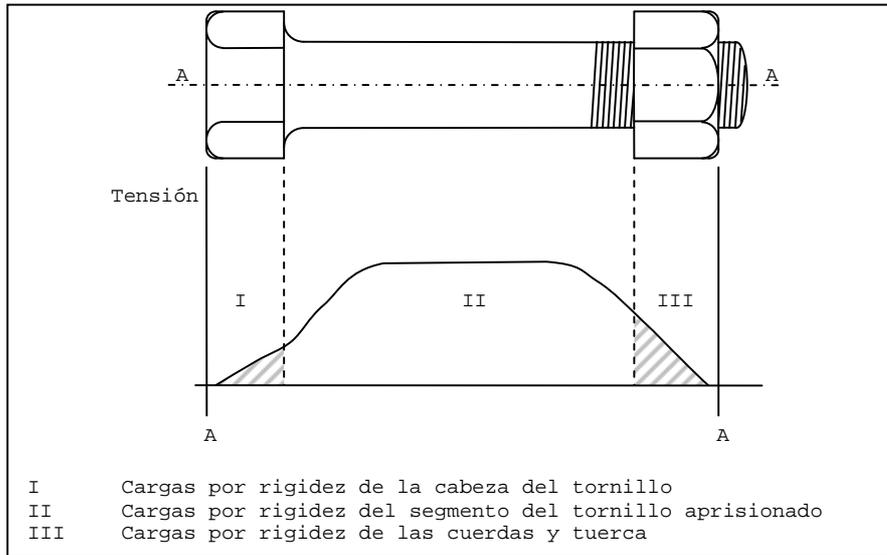


Figura 3-5 Esfuerzos en el Árbol de un Tornillo

Existen diferentes fuentes que proponen distintos factores de corrección para considerar la rigidez añadida de la cabeza del tornillo, cuerdas y tuerca. Para el trabajo presentado, se considera el criterio de Meyer y Strelow [Ref. 26] el cual considera agregar $0.4 \times D_1$ para compensar la cabeza del tornillo y $0.4 \times D_m$ para las cuerdas y tuerca, donde D_1 corresponde al Diámetro del árbol del tornillo en el punto de unión con la cabeza del tornillo y D_m al Diámetro mínimo de la sección cordada.

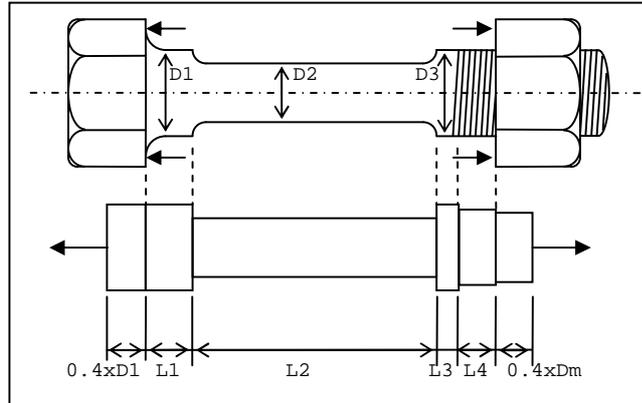


Figura 3-6 Modelo del Tornillo para Cálculo de Rigideces

Tomando en cuenta la Figura 3-6 y la Ecuación 3-4, la Rigidez del tornillo puede ser definida como:

$$\frac{1}{K_{bolt}} = \left(\frac{1}{E_{bolt}} \right) \left(\frac{0.4 D_1}{A_1} + \frac{L_1}{A_1} + \frac{L_2}{A_2} + \frac{L_3}{A_3} \dots + \frac{L_4}{A_m} + \frac{0.4 D_m}{A_m} \right) \quad \text{Ecuación 3-5}$$

3.3.2 Rigidez de la Arandela

Para el caso de la arandela, la solución a la Ecuación 3-3 es simple, ya que se puede considerar que todo el cuerpo de la arandela contribuye a la rigidez efectiva. De esta forma la rigidez es calculada como:

$$K_{washer} = \frac{E_w \pi (D_o^2 - D_i^2)}{4 L_w} \quad \text{Ecuación 3-6}$$

Como es de esperarse, la Ecuación 3-6 es válida sólo si el diámetro exterior de la arandela es relativamente similar

al diámetro exterior del tornillo y la tuerca, lo cual es supuesto en este trabajo.

3.3.3 Rigidez Total del Sistema Fijante

Una vez que se han calculado las rigideces de los elementos que conforman los elementos fijantes, el sistema completo se puede calcular como:

$$\frac{1}{K_{clamping}} = \frac{1}{K_{washer}} + \frac{1}{K_{bolt}} \quad \text{Ecuación 3-7}$$

Cabe resaltar que la rigidez de la tuerca es incluida como un elemento más del tornillo.

3.3.4 Rigidez del Sistema Fijo

El primer paso para el cálculo de la rigidez de los cuerpos a unir, o bridas para el presente caso de estudio, es el de aislar el segmento de brida que corresponde a cada uno de los tornillos. El primer criterio consiste en dividir la brida en tantos segmentos como tornillos tenga la junta, como lo muestra la Figura 3-7.a. Una vez aislada se procede a definir la distancia más pequeña a los ejes libres o a la frontera entre segmento y segmento. Esta distancia mínima se le denomina D_j y será utilizada para el cálculo del área equivalente de las bridas.

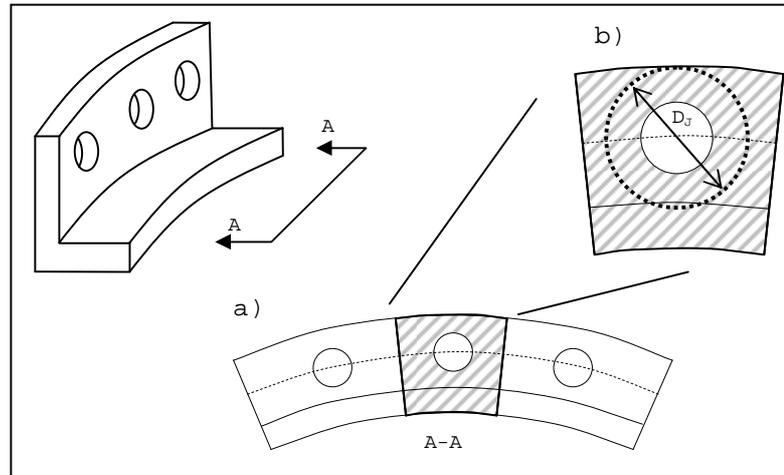


Figura 3-7 Modelo del Tornillo para Cálculo de Rigideces

El siguiente paso es definir esta área equivalente. Para hacerlo, se usarán las ecuaciones experimentales publicadas por la Sociedad Alemana de Ingeniería [Ref. 25] y transcritas a continuación.

Para $D_B < D_J \leq 3D_B$ y $T \leq 8D$

$$A_C = \frac{\pi}{4}(D_B^2 - D_H^2) + \frac{\pi}{8} \left(\frac{D_J}{D_B} - 1 \right) \left(\frac{D_B T}{5} + \frac{T^2}{100} \right) \quad \text{Ecuación 3-8}$$

Para $D_J > 3D_B$ y $T \leq 8D$

$$A_C = \frac{\pi}{4} \left(D_B + \frac{T}{10} \right)^2 - D_H^2 \quad \text{Ecuación 3-9}$$

donde los valores de D_B , D , T y D_J se muestran en la siguiente figura.

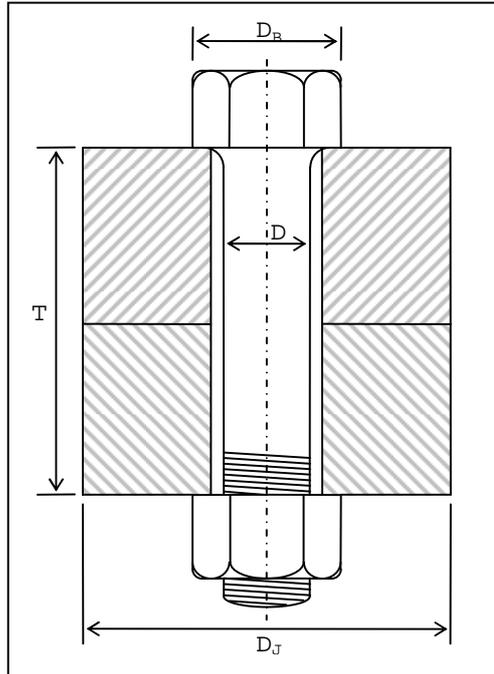


Figura 3-8 Modelo del Tornillo para Cálculo de Rigideces

Finalmente, la rigidez de la junta es calculada con el valor del área equivalente A_C , el espesor de cada brida y su módulo de elasticidad como se define a continuación.

$$\frac{1}{K_{clamped}} = \frac{t_1}{E_1 A_C} + \frac{t_2}{E_2 A_C} + \dots + \frac{t_n}{E_n A_C} \quad \text{Ecuación 3-10}$$

3.3.5 Relación de Rigideces

Una vez definidas las rigideces de los dos grupos que forman la junta atornillada: fijantes y fijos, se puede calcular la relación de rigideces de la junta. Esta relación será ampliamente utilizada para cálculos posteriores y se define como:

$$R = \frac{K_{clamping}}{K_{clamped}} \quad \text{Ecuación 3-11}$$

3.4 Cargas en el Sistema

Una vez que se ha definido la relación de rigideces en el sistema es posible calcular el punto de separación y las cargas en el tornillo y la junta a partir de esta relación como se describe a continuación:

$$F_B = F_p + \frac{R}{R+1} P \quad \text{Ecuación 3-12}$$

$$F_J = -F_p + \frac{1}{R+1} P \quad \text{Ecuación 3-13}$$

$$P_{sep} = F_p (1 + R) \quad \text{Ecuación 3-14}$$

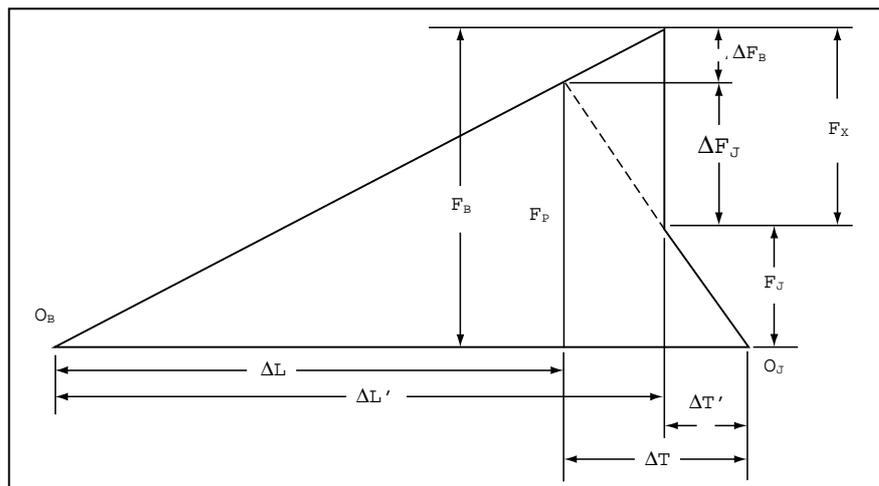


Figura 3-9 Diagrama del Comportamiento de la Junta

donde:

F_P Precarga Inicial

F_B Fuerza en el tornillo

F_J Fuerza en la junta

P Carga externa aplicada a la junta

P_{sep} Carga externa aplicada de separación

$\Delta L, \Delta L'$ Elongación del tornillo antes y después de la aplicación de la carga externa

$\Delta T, \Delta T'$ Compresión de la junta antes y después de la aplicación de la carga externa

3.5 Precarga

La precarga es uno de los parámetros más importantes, ya que rige en gran medida el comportamiento de la junta, pero a la vez es uno de los parámetros en los que menos control se tiene por parte del diseñador.

A pesar de que existe en el mercado una gran cantidad de aparatos para medir de una manera bastante precisa el torque aplicado, se tiene una gran variación para el valor de la precarga. Entre otras muchas causas esta variación proviene de:

- El uso de lubricantes
- Tolerancias de dimensiones geométricas
- Acabado superficial
- Método de manufactura (rolado, maquinado, etc)
- Uso repetitivo de las partes
- Dureza de los materiales

Aparte de la variación obtenida desde el mismo momento del ensamble con la aplicación del torque requerido por diseño, las precargas suelen relajarse una vez que la junta entra en función bajo cargas normales de operación.

Así pues, lo más recomendable es tener a la mano datos estadísticos de pruebas con la geometría que se quiere analizar, o en su defecto geometrías similares. Como muchas veces esto no es posible, como en el presente caso, se supondrá una variación de +/- 30% del valor promedio de la precarga para los cálculos posteriores.

3.6 Cargas en una Junta Excéntrica

Hasta este punto se han considerado las cargas externas aplicadas a la junta como si estuvieran alineadas al eje de los tornillos. Este comportamiento está lejos de ser

representativo en las juntas con bridas que se utilizan en una turbina de gas.

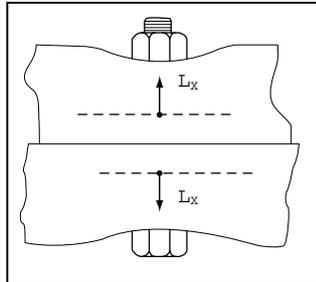


Figura 3-10 Cargas externas Alineadas al Eje del Tornillo

En el caso de las turbinas de gas, la carga aplicada tiene un desalineamiento con respecto al eje del tornillo, lo que crea momentos en la junta que deben de tomarse en cuenta. A este tipo de juntas se les denomina Juntas Excéntricas.

Anexado al efecto excéntrico de la junta, las cargas en una turbina de gas se dan de forma axisimétrica y asimétrica. Esto se explicará a continuación.

3.6.1 Cargas Simétricas

3.6.1.1 Cargas Axiales

Las cargas axiales en una junta atornillada en una turbina de gas se dan generalmente por la transmisión del empuje que genera la misma turbina. Esta carga puede ser distribuida en el brazo de acción de la junta como se describe a continuación:

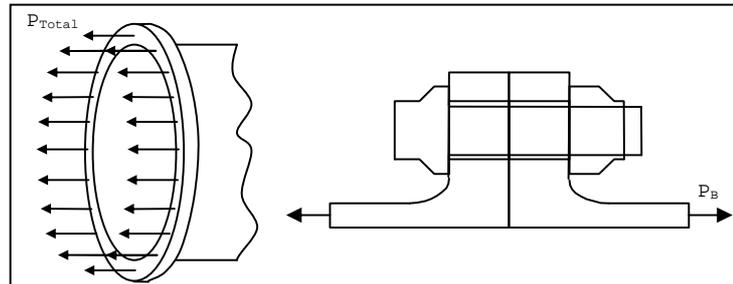


Figura 3-11 Cargas Axiales Axisimétricas

$$P_B = \frac{P_{total}}{N}$$

Ecuación 3-15

donde

P_B Carga axial total de la junta

P_{Total} Carga axial por tornillo

N Número de Tornillos en la Junta

3.6.1.2 Cargas Radiales

Las cargas radiales son generalmente una constante en las juntas de turbinas de gas ya que en su gran mayoría son juntas que se aplican a recipientes sellados a presión.

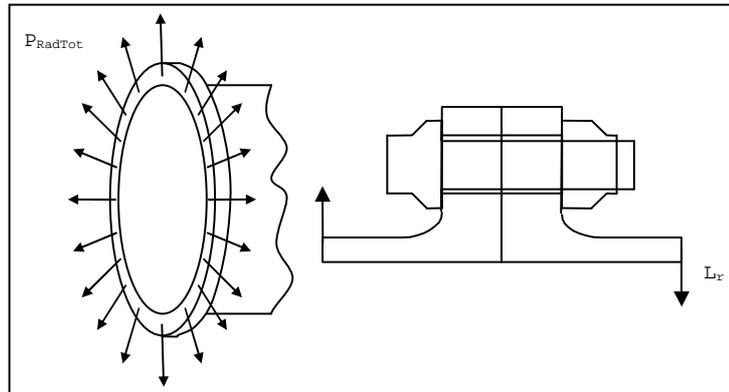


Figura 3-12 Cargas Radiales Axisimétricas

$$L_r = \frac{2 \pi P_{RadTot}}{N}$$

Ecuación 3-16

donde:

L_r Carga radial por tornillo la junta

P_{RadTot} Carga radial total de la junta

3.6.1.3 Cargas de Torsión

Las cargas de torsión se generan por el continuo movimiento de los álabes al interior de la turbina. Estas cargas de torsión son transferidas por la estructura interna al caparazón y finalmente transmitidas por las juntas atornilladas.

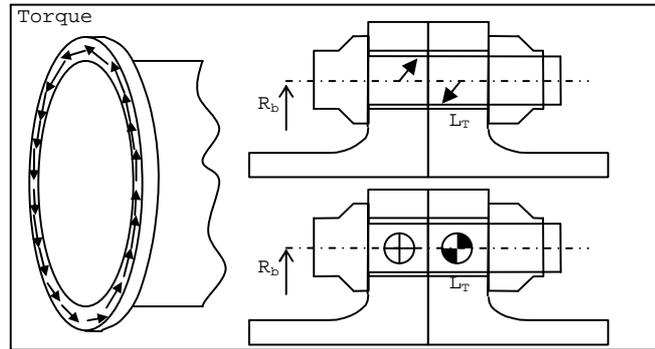


Figura 3-13 Cargas de Torsión Axisimétricas

$$L_T = \frac{\text{Torque}}{R_b \times N}$$

Ecuación 3-17

donde:

Torque Torsión total de la junta

R_b Radio al eje de tornillo

3.6.1.4 Cargas por Momento Simétrico

Estas cargas son en su mayoría generadas por diferencias de temperatura en la junta, lo que crea expansiones térmicas axisimétricas y por lo tanto momentos simétricos.

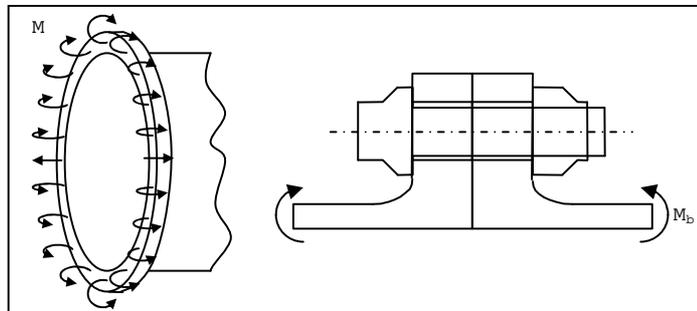


Figura 3-14 Cargas de Momento Axisimétrico

$$M_s = \frac{M \times 2 \times \pi}{N}$$

Ecuación 3-18

donde:

M Momento Simétrico de la junta

M_s Momento Simétrico por tornillo

3.6.2 Cargas Asimétricas

3.6.2.1 Cortantes Asimétricos

Estas cargas se dan generalmente por desbalance en la turbina y por maniobras del avión. Por su naturaleza asimétrica, algunos tornillos cargarán más que otros por lo que es necesario calcular la carga de cada uno y considerar el análisis por separado.

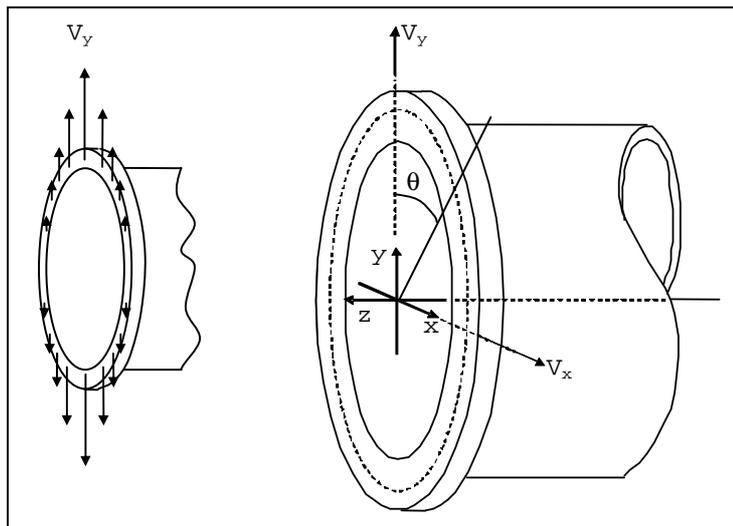


Figura 3-15 Cargas de Cortante Asimétrico

$$P_{tran_y} = \frac{-2V_y}{\pi} \text{Sen} \frac{\pi}{N} \text{Cos} \frac{2\pi i}{N} \quad \text{Ecuación 3-19}$$

$$P_{tran_x} = \frac{-2V_x}{\pi} \text{Sen} \frac{\pi}{N} \text{Cos} \left(\frac{2\pi i}{N} + \frac{\pi}{2} \right) \quad \text{Ecuación 3-20}$$

$$P_{tran} = \sqrt{P_{tran_y}^2 + P_{tran_x}^2} \quad \text{Ecuación 3-21}$$

donde:

V_y Momento Simétrico de la junta

V_x Momento Simétrico por tornillo

P_{tran_x} Carga transversal en la dirección x para el tornillo ubicado a π/N respecto a la parte superior

P_{tran_y} Carga transversal en la dirección y para el tornillo ubicado a π/N respecto a la parte superior

P_{tran} Carga transversal resultante para el tornillo ubicado a π/N respecto a la parte superior

i Número de tornillo, varía entre 1 y N.

3.6.2.2 Momentos Asimétricos

Al igual que las cargas cortantes asimétricas, estas cargas se dan generalmente por desbalance en la turbina y por maniobras del avión. Al igual que las cargas cortantes, algunos tornillos cargarán más que otros.

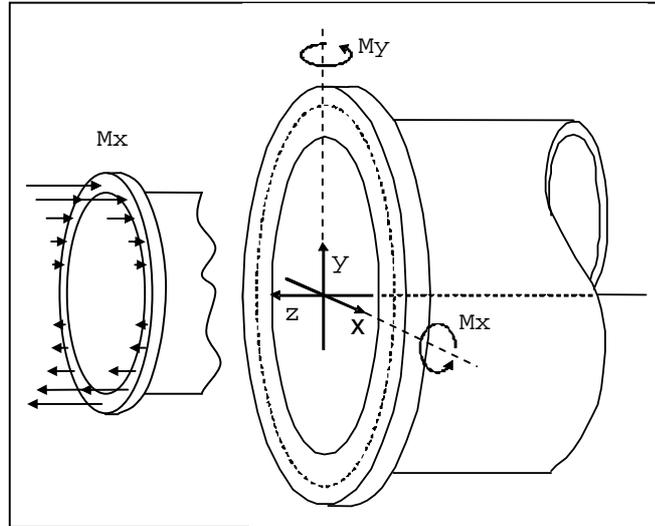


Figura 3-16 Cargas de Momento Asimétrico

$$P_m = \frac{2M \times \cos \frac{2\pi i}{N}}{R_b \times N}$$

Ecuación 3-22

3.6.3 Cálculo de Cargas Externas Aplicadas

Una vez que se han trasladado las cargas axisimétricas y asimétricas a cada uno de los tornillos, es necesario calcular la carga externa aplicada a cada uno de ellos. Para esto basta considerar la junta como un diagrama de cuerpo libre y calcular la reacción en el eje del tornillo.

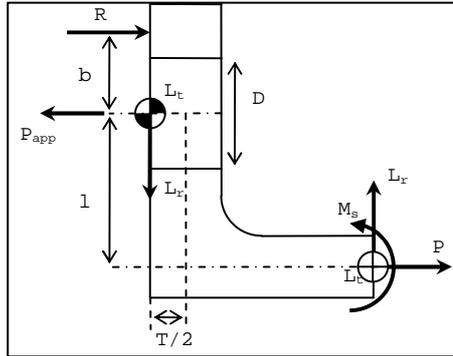


Figura 3-17 Cargas Aplicadas a la Brida

$$P_{app} = \frac{1}{b} \left[P(l+b) + M_s + L_r \left(L_x + \frac{t}{2} \right) \right] \quad \text{Ecuación 3-23}$$

$$R = P_{app} - P \quad \text{Ecuación 3-24}$$

donde:

- b Punto de reacción
- M_s Momento Simétrico
- D Diámetro del agujero
- T Espesor de la brida
- R Fuerza de reacción de pivote

Como se puede observar, la carga externa aplicada al tornillo depende de la distancia **b** en donde se considere la reacción. Existen numerosas teorías de cómo calcular este punto, sin embargo, de forma conservadora este punto se definirá como el punto medio de la cabeza del tornillo:

$$b = D_H / 2 \quad \text{Ecuación 3-25}$$

3.6.4 Cálculo de Cargas y Momentos en Brida y Tornillo

El cálculo de los momentos aplicados en el tornillo y la brida se lleva a cabo utilizando métodos numéricos, ya que la determinación de las cargas superiores e inferiores, que no son simétricas, no tienen una solución directa.

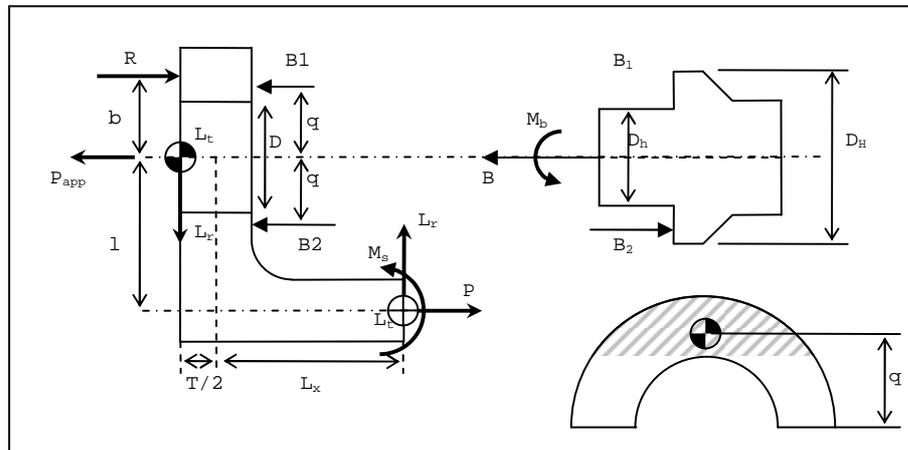


Figura 3-18 Cargas y Momentos en Tornillo y Brida

Las ecuaciones a resolver se listan a continuación:

$$q = \frac{2D_H}{3\pi} \left(\frac{D_h}{D_H} + \frac{D_H}{D_H + D_h} \right) \quad \text{Ecuación 3-26}$$

$$P_{app} = B - B_1 - B_2 \quad \text{Ecuación 3-27}$$

$$M_f = Pl + M_s + L_r(L_x + T/2) - B_2 q \quad \text{Ecuación 3-28}$$

$$B_r = \frac{B_1 - B_2}{2} \quad \text{Ecuación 3-29}$$

$$M_b = 2 q B_r = \frac{M_f l I_b E_b}{3 T_f I_f E_f}$$

Ecuación 3-30

donde:

q Distancia del eje del tornillo al punto de aplicación de cargas

D_H Diámetro de la cabeza del tornillo

D_h Diámetro menor de contacto de la cabeza del tornillo (puede ser el diámetro del tornillo o en caso de haber arandelas, el diámetro menor de esta.

B₁ Fuerza de reacción superior del tornillo

B₂ Fuerza de reacción inferior del tornillo

M_f Momento en la brida

M_b Momento en el tornillo

B_r Fuerza de par equivalente al valor de M_b con un brazo de palanca q.

I_b Momento de Inercia del tornillo

I_f Momento de Inercia de la brida

E_b Módulo de elasticidad del tornillo

E_f Módulo de elasticidad de la brida

3.7 Requerimientos de Junta Atornillada (Turbina de Gas)

Los requisitos que se tomaron en cuenta para la evaluación de una junta atornillada de una turbina de gas se derivaron a partir del párrafo 33.24 de las Regulaciones Federales de Aviación publicadas por la Administración Federal de Aviación (FAA-FAR por sus siglas en inglés Ref. 1).

Los requerimientos se dividen en el tipo de cargas aplicadas como se detalla a continuación.

3.7.1 Requisitos bajo Cargas Normales

Los requisitos de cargas normales se basan en aquellas que ocurren frecuentemente a lo largo de la vida útil de la turbina. El objetivo primario es mantener la seguridad de aeronavegabilidad de la turbina. Para este tipo de cargas se impusieron los siguientes requisitos:

1. Esfuerzos netos a tensión del tornillo menor al criterio de cedencia mínimo y con precarga promedio con un margen de seguridad del 20%.

$$MNS = \frac{YS_{\min}}{F_{b_avg_nor} / Min(A_b)} - 1$$

Ecuación 3-31

donde:

$Min(A_b)$ Área equivalente de tensión mínima en el tornillo (eje, cuerdas, etc)

YS_{min} Esfuerzo de cedencia mínimo

2. Esfuerzo concentrado menor al criterio de cedencia mínimo con precarga promedio.

$$MCS = \frac{YS_{min}}{F_{b_avg_nor} / \left((0.25 \times \pi \times D^2) + 0.5 \times M_{b_avg_nor} \times D / I_b \right)} - 1 \quad \text{Ecuación 3-32}$$

3. Esfuerzo de aplastamiento entre tornillo-brida-tuerca menor al criterio de cedencia mínimo con precarga promedio.

$$MCS = \frac{YS_{min}}{F_{b_avg_nor} / \left(0.25 \times \pi \times (D_{max}^2 - D_{min}^2) \right)} - 1 \quad \text{Ecuación 3-33}$$

donde:

D_{max} Diámetro máximo de contacto, ya sea la cabeza del tornillo o el diámetro exterior de la arandela.

D_{min} Diámetro mínimo del contacto, calculado como el máximo entre el diámetro del agujero y el diámetro interno de la arandela

4. Esfuerzo de momento en la brida menor al criterio de cedencia mínimo.

$$MFM = \frac{YS_{\min}}{(M_{f_norm} \times T/2)/I_f} - 1 \quad \text{Ecuación 3-34}$$

5. Margen de Separación mayor al 20% con precarga mínima.

$$MS = \frac{P_{sep_min}}{P_{app_nor}} - 1 \quad \text{Ecuación 3-35}$$

6. Capacidad de Carga Transversal (anti-rotación) mayor al 20% con precarga mínima.

$$MTR = \frac{\mu \times (R_{avg_norm} + F_{J_avg_norm})}{P_{trans_nor}} - 1 \quad \text{Ecuación 3-36}$$

donde:

μ Coeficiente de fricción entre las bridas

3.7.2 Requisitos bajo Cargas Límite

Los requisitos de cargas límites se basan en aquellas cargas máximas que se esperan ocurran una vez a lo largo de la vida útil de la turbina. El objetivo primario es mantener íntegra la estructura sin ningún tipo de deformaciones permanentes. Para este tipo de cargas se impusieron los siguientes requisitos:

7. Esfuerzo neto a tensión del tornillo menor al criterio de cedencia promedio y con precarga promedio con un margen de seguridad del 20%.

$$MS = \frac{YS_{avg}}{F_{b_avg_lim} / \text{Min}(A_b)} - 1 \quad \text{Ecuación 3-37}$$

donde:

YS_{avg} Esfuerzo de cedencia promedio

8. Esfuerzo concentrado menor al criterio de cedencia promedio con precarga promedio.

$$MCS = \frac{YS_{avg}}{F_{b_avg_lim} / \left((0.25 \times \pi \times D^2) + 0.5 \times M_{b_avg_lim} \times D / I_b \right)} - 1 \quad \text{Ecuación 3-38}$$

9. Esfuerzo de aplastamiento entre tornillo-brida-tuerca menor al criterio de cedencia promedio con precarga promedio.

$$MCrS = \frac{YS_{avg}}{F_{b_avg_lim} / \left(0.25 \times \pi \times (D_{max}^2 - D_{min}^2) \right)} - 1 \quad \text{Ecuación 3-39}$$

10. Esfuerzo de momento en la brida menor al criterio de cedencia promedio.

$$MFM = \frac{YS_{avg}}{(M_{f_lim} \times T / 2) / I_f} - 1 \quad \text{Ecuación 3-40}$$

11. Margen de Separación mayor a 0 con precarga promedio.

$$MS = \frac{P_{sep_avg}}{P_{app_lim}} - 1 \quad \text{Ecuación 3-41}$$

12. Capacidad de Carga Transversal (Anti-rotación) mayor a 0 con precarga promedio.

$$MTR = \frac{\mu \times (R_{avg_lim} + F_{J_avg_lim})}{P_{trans_lim}} - 1 \quad \text{Ecuación 3-42}$$

3.7.3 Requisitos bajo Cargas Últimas

Finalmente, los requisitos de cargas últimas se basan en aquellas cargas extremas que se esperan no ocurran a lo largo de la vida útil de la turbina pero que la estructura debe garantizar su integridad, como el caso de un amerizaje, aterrizaje con el tren retractado o una pérdida de un álabe del ventilador principal. El objetivo primario es mantener integra la estructura sin rompimiento. Para este tipo de cargas se impusieron los siguientes requisitos:

13. Carga a tensión del tornillo en la sección del árbol menor al criterio de ruptura mínimo y con precarga promedio.

$$MS = \frac{UTS_{\min}}{F_{b_avg_ult} / \text{Min}(A_b)} - 1 \quad \text{Ecuación 3-43}$$

donde:

UTS_{\min} Esfuerzo de ruptura mínimo

14. Esfuerzo de momento en la brida menor al criterio de ruptura mínimo.

$$MFM = \frac{UTS_{\min}}{(M_{f_ult} \times T / 2) / I_f} - 1 \quad \text{Ecuación 3-44}$$

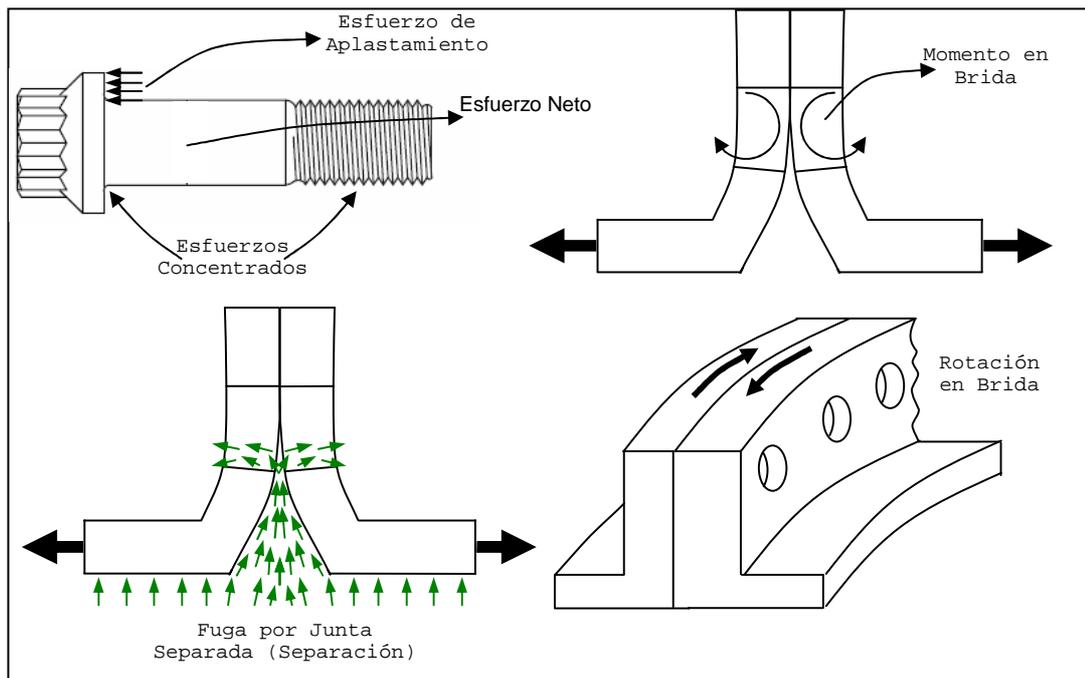


Figura 3-19 Ejemplos de Requerimientos

3.8 Ejemplo Resuelto

3.8.1 Detalles de la Junta

A fin de tener una visión más clara de cómo se aplican las ecuaciones mostradas anteriormente, se aplicará el método a la solución de una junta como ejemplo.

Considerando las propiedades geométricas mostradas en la Figura 3-20, y las siguientes propiedades mecánicas de los materiales involucrados se procederá a calcular las relaciones de rigideces del sistema.

Propiedad	Tornillo	Bridas	Tuerca	Arandela
Módulo de Elasticidad	30E3 ksi	30E3 ksi	32E3 ksi	29E3 ksi
Esfuerzo de Cedencia Mínimo	120 ksi	80 ksi		
Esfuerzo de Cedencia Promedio	140 ksi	110 ksi		
Esfuerzo de Ruptura Mínimo	160 ksi	140 ksi		

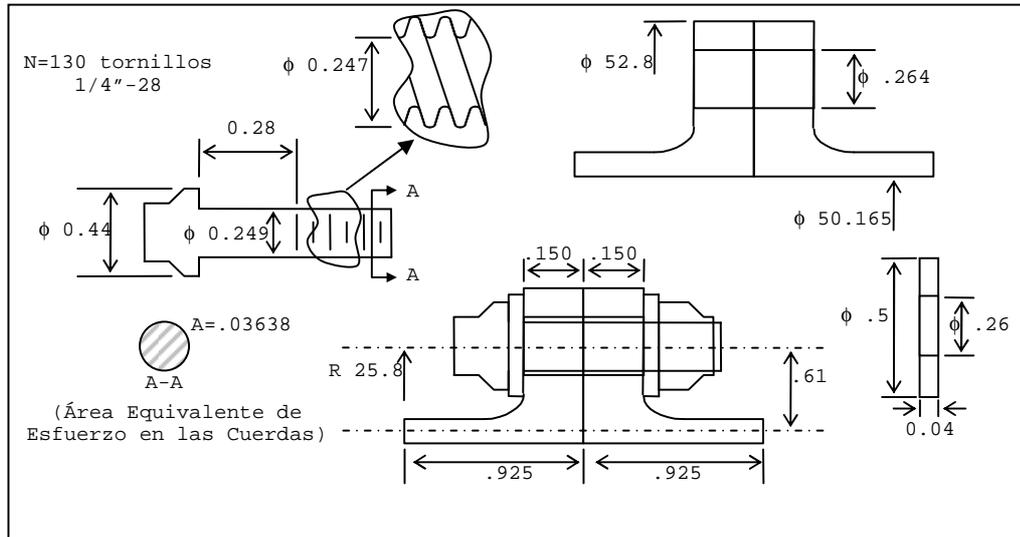


Figura 3-20 Dimensiones de Junta-Ejemplo (pulgadas)

Adicionalmente se considerará que la precarga promedio en el tornillo es de 3000 lb. A falta de datos estadísticos para calcular la precarga mínima se considerará el valor promedio menos el 30%.

Para el cálculo de carga transversal se considerará un coeficiente de fricción de 0.1 entre las bridas.

De Ecuación 3-5 se puede calcular la rigidez del tornillo:

$$\frac{1}{K_{bolt}} = \left(\frac{1}{30E6} \right) \left(\frac{0.4 \times 0.249}{0.25 \times \pi \times 0.249^2} + \frac{0.28}{0.25 \times \pi \times 0.249^2} + \frac{2 \times (0.150 + 0.04) - 0.28 + 0.4 \times 0.247}{0.25 \times \pi \times 0.247^2} \right)$$

$K_{bolt} = 2.512E6 \text{ lb/in}$

De Ecuación 3-6 se puede calcular la rigidez de la arandela:

$$K_{washer} = \frac{29E6 \times \pi \times (0.5^2 - 0.26^2)}{4 \times 0.04} = 1.039E8 \text{ lb/in}$$

De Ecuación 3-7 se puede calcular la rigidez de los elementos fijantes:

$$\frac{1}{K_{clamping}} = \frac{1}{1.039E8} + \frac{1}{1.039E8} + \frac{1}{2.512E6}$$

$$K_{clamping} = 2.395E6$$

Para el cálculo de la rigidez de la junta es necesario calcular el diámetro equivalente de la brida D_j . Este diámetro tiene que ser el menor de entre el ligamento superior (1.2), el ligamento inferior (1.435) o el espaciamiento de los agujeros (1.247), como se indica en la siguiente figura:

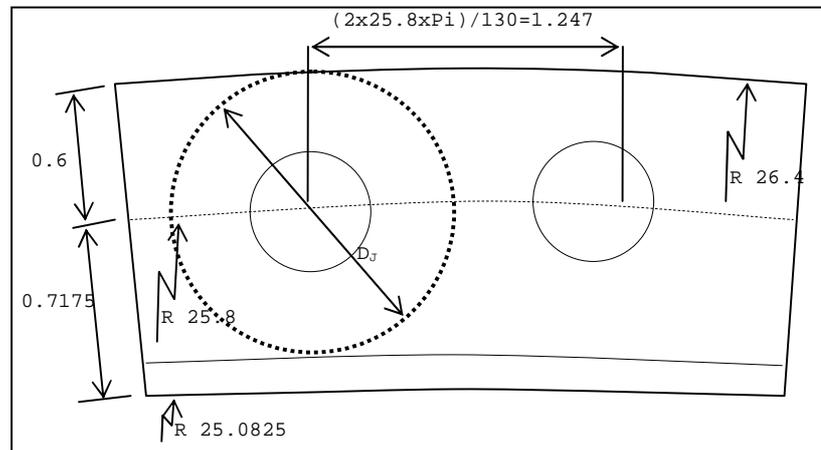


Figura 3-21 Diámetro Equivalente de la Brida (pulgadas)

Así pues:

$$D_j = 1.2$$

Puesto que

$$D_b < D_j \leq 3D_b \quad (0.44 < 1.2 \leq 1.32)$$

Y

$$T \leq 8D \quad (0.3 \leq 1.992)$$

El cálculo del área equivalente puede calcularse con la Ecuación 3-8.

$$A_c = \frac{\pi}{4}(0.44^2 - 0.264^2) + \frac{\pi}{8} \left(\frac{1.2}{0.44} - 1 \right) \left(\frac{0.44 \times 0.3}{5} + \frac{0.3^2}{100} \right)$$

$$A_c = 0.116 \text{ in}^2$$

La rigidez de las bridas (que en el ejemplo son iguales) se puede calcular con la Ecuación 3-10.

$$\frac{1}{K_{clamped}} = \frac{0.150}{30E6 \times 0.116} + \frac{0.150}{30E6 \times 0.116}$$

$$K_{clamped} = 11.6E6 \text{ lb/in}$$

Por lo que la relación de rigideces, tomando en cuenta la Ecuación 3-11, se calcula:

$$R = \frac{2.395E6}{11.6E6}$$

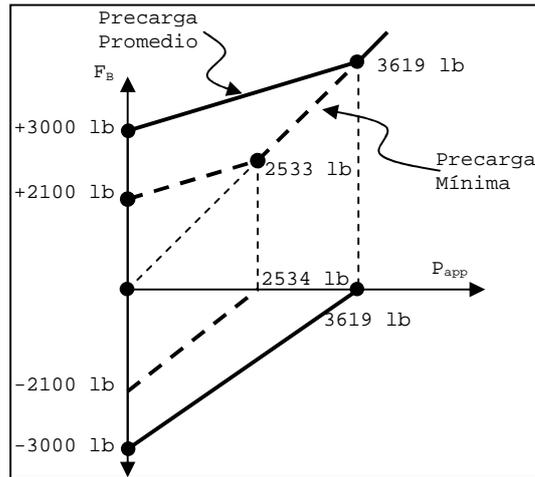
$$R = 0.2064$$

Con los datos anteriormente definidos, es posible calcular la carga de separación utilizando la Ecuación 3-14.

$$P_{s_min} = (3000 \times 0.7)(1 + 0.2064) = 2533.4 \text{ lb}$$

$$P_{crit_avg} = (3000)(1 + 0.2064) = 3619.2 \text{ lb}$$

Finalmente es posible trazar el diagrama de la junta ante los dos casos estudiados, precarga promedio y precarga mínima con la Ecuación 3-12 :



3.8.2 Cálculo de Cargas en la Junta

Para este ejemplo resuelto, se considerarán las siguientes cargas aplicadas al sistema y con el supuesto que corresponden a cargas normales de operación.

Carga	Valor
Carga Axial Simétrica	7000 lb
Carga Radial Simétrica	1200 lb/rad
Carga de Torsión	50,000 lb in
Momento Simétrico	1500 lb in/rad
Momento Asimétrico	45,000 lb in
Cortante Vertical	-15,000 lb

La carga axial simétrica puede calcularse con la Ecuación 3-15.

$$P_B = \frac{7000}{130} = 53.846lb$$

De la misma manera, la carga radial simétrica se da por la Ecuación 3-16.

$$L_r = \frac{2 \times \pi \times 1200}{130} = 57.999lb$$

La carga de torsión por tornillo se calcula por la Ecuación 3-17.

$$L_T = \frac{50000}{25.8 \times 130} = 14.908lb$$

El momento simétrico por tornillo se calcula con la Ecuación 3-18.

$$M_s = \frac{1500 \times 2 \times \pi}{130} = 72.498lb$$

La carga transversal vertical se calcula con la Ecuación 3-19. Puesto que la carga máxima se da en el tornillo superior (0°), sólo se calcula esta posición.

$$P_{tran_v} = \frac{2 \times 15000}{\pi} \text{Sen}\left(\frac{\pi}{130}\right) \text{Cos}\left(\frac{2 \pi 0}{130}\right) = 230.7lb$$

La carga axial por el momento asimétrico se calcula con la Ecuación 3-22. Nuevamente se toma el caso del tornillo superior (0°).

$$P_m = \frac{2(45000) \times \cos \frac{2 \times \pi \times 0}{130}}{25.8 \times 130} = 26.834 lb$$

3.8.3 Cálculo de Márgenes de Seguridad

El valor de la carga aplicada se da utilizando la Ecuación 3-23.

$$P_{app_nor} = \frac{1}{0.44/2} \left[(53.486 + 26.834)(0.61 + 0.44/2) + 72.498 + 57.999 \left(0.925 + \frac{0.15}{2} \right) \right] = 898 lb$$

El margen de separación de la junta puede calcularse con la Ecuación 3-35.

$$MS = \frac{2533.4}{898} - 1 = 182\%$$

La carga nominal de reacción en la brida se puede calcular con la Ecuación 3-13

$$F_j = 3000 - \frac{1}{0.2064 + 1} 898 = 2256 lb$$

La carga de reacción de pivote se calcula con la Ecuación 3-24.

$$R = 898 - (53.846 + 26.834) = 817 lb$$

La carga transversal máxima está dada por la resultante geométrica de las cargas radiales y circunferenciales. Esta se calcula con la Ecuación 3-21.

$$P_{tran} = \sqrt{(230.7 + 14.908)^2 + (57.999)^2} = 252.4lb$$

Así pues se puede calcular el margen de seguridad de carga transversal con la Ecuación 3-36.

$$MTR = \frac{0.1 \times (817 + 2256)}{252.4} - 1 = 21.7\%$$

Las cargas mínimas y promedio en el tornillo se calculan con la Ecuación 3-12.

$$F_{B_min} = (3000 \times 0.7) + \frac{0.2064}{0.2064 + 1} 898 = 2,254lb$$

$$F_{B_avg} = 3000 + \frac{0.2064}{0.2064 + 1} 898 = 3154lb$$

El margen de seguridad de esfuerzo de aplastamiento se calcula con la Ecuación 3-33.

$$\sigma = 3154 / (0.25 \times \pi \times (0.5^2 - 0.264^2)) = 22.272ksi$$

$$MCrS = \frac{80}{22.272} - 1 = 259\%$$

El margen de seguridad al esfuerzo en el eje del tornillo se calcula con la Ecuación 3-31.

$$\sigma = \frac{3154}{\text{Min}(0.03638, 0.25 \times \pi \times .249^2)} = 86.699ksi$$

$$MNS = \frac{P_{app_nor} / \text{Min}(A_b)}{YS_{min}} - 1 = \frac{120}{86.699} - 1 = 38.4\%$$

Resolviendo con métodos numéricos las ecuaciones Ecuación 3-26 a Ecuación 3-30 se pueden calcular las cargas de reacción del tornillo y los momentos tanto en el tornillo como en las bridas:

$$q = \frac{2 \times 0.44}{3\pi} \left(\frac{0.264}{0.44} + \frac{0.44}{0.44 + 0.264} \right) = 0.114$$

$$B_1 = 93.61 lb$$

$$B_2 = 803.95 lb$$

$$B_f = \frac{803.95 - 93.61}{2} = 355.17 lb$$

$$M_f = (53.846 + 26.834)(0.61) + 72.498 + 57.999(0.15/2) - 803.95 \times 0.114 = 87.8 lb \times in$$

$$M_b = 2 \times 0.114 \times 355.17 = 81 lb \times in$$

Una vez calculados los momentos tanto en la brida como en el tornillo es posible calcular el resto de los márgenes de seguridad.

El margen de seguridad al esfuerzo concentrado se calcula con la Ecuación 3-32.

$$\sigma = \frac{3154}{0.25 \times \pi \times 0.249^2} + \frac{81 \times 249/2}{\pi \times 0.249^4 / 64} = 118.337 ksi$$

$$MCS = \frac{120}{118.337} - 1 = 1.4\%$$

El margen de seguridad del esfuerzo de momento en la brida se calcula con la Ecuación 3-34.

$$\sigma = \frac{M_f \times T / 2}{I_f} = \frac{88 \times \frac{0.15}{2}}{\left(\frac{\pi \times 2 \times 25.8}{130} \right) \times 0.15^3} = 23.809 \text{ksi}$$

$$MFM = \frac{80}{23.809} - 1 = 236\%$$

Una vez que se han calculado todos los márgenes bajo cargas normales, se presentan a continuación de una forma condensada.

Criterio		Margen	Requerimiento
Esfuerzo del Tornillo	MNS	38.4%	>20%
Esfuerzo Concentrado del Tornillo	MCS	1.4%	>0%
Esfuerzo de Aplastamiento de la Brida	MCrS	259%	>0%
Esfuerzo de Momento Flector en la Brida	MFM	236%	>0%
Margen de Separación de la Junta	MS	182%	>20%
Margen de Carga Transversal	MTR	21.7%	>20%

El cálculo ante cargas límites y cargas últimas no se presenta por considerarse cálculos repetitivos respecto a las cargas normales, ya que únicamente el cambio se da al considerar distintas propiedades del material y distintas cargas, sin embargo, las ecuaciones son las mismas.

4. ALGORITMO GENÉTICO

4.1 Estructura General del Algoritmo

La estructura del algoritmo genético utilizado para el diseño de juntas atornilladas está basada en los principios básicos que fueron explicados en el capítulo 2. Esta estructura está mostrada en la Figura 4-1 .

Como puede observarse, el primer bloque corresponde a las entradas geométricas generales del diseño, como lo son los espesores y diámetros de las carcasas a unir, materiales de las carcasas y cargas normales, límites y últimas. El segundo bloque corresponde a la creación de la primera generación, en donde existe un ciclo repetitivo hasta lograr generar individuos no solamente geoméricamente válidos, sino que cumplan todos los requerimientos de diseño, este método de evaluación elitista se describirá en el módulo correspondiente. El tercer bloque corresponde al ciclo repetitivo de evolución generacional, en el cual se seleccionan los individuos para su posterior cruce basado en el peso que añaden al diseño. Una vez seleccionados los individuos, se procede a la reproducción y generación de nuevos individuos. Una vez más se aplica el módulo de evaluación y elitismo para definir el nuevo individuo, sin embargo, de no lograrse una reproducción exitosa después de un número de iteraciones fija (en el presente trabajo se limitó a 20 iteraciones), se procede a definir el nuevo

individuo por torneo entre los padres. Finalmente una vez creada la nueva generación se evalúa bajo el criterio de convergencia; si esta no se logra se aplica una mutación al genoma de toda la generación y sólo si esta mutación genera individuos válidos, se guarda el nuevo genoma. Finalmente se repite el bucle para continuar con la siguiente generación.

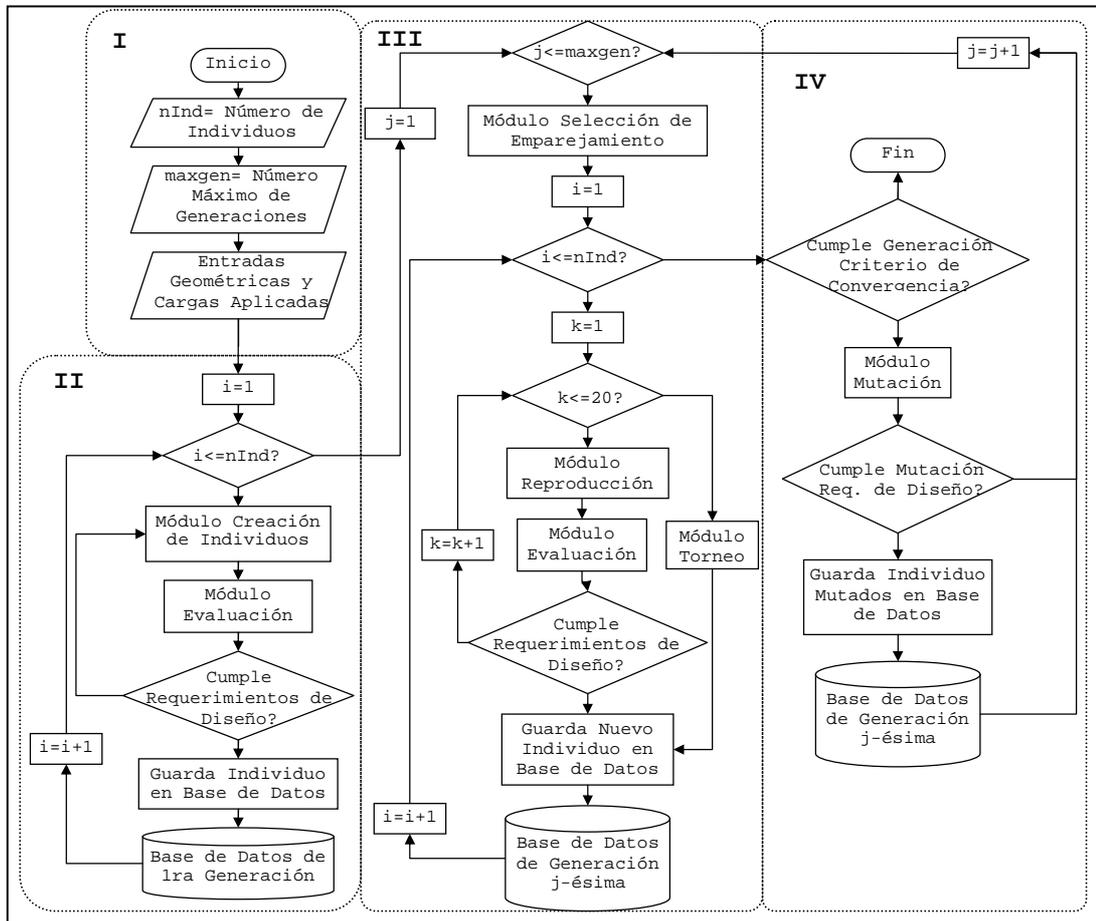


Figura 4-1 Estructura General de Algoritmo

En cuanto a su codificación, se eligió binaria por la simplicidad que ofrece en el módulo de reproducción y por

su similitud al proceso de evolución natural, en donde las cadenas genéticas se componen de estructuras simples.

Además se optó por utilizar el lenguaje de programación del software Mathematica de la compañía Wolfram, ya que este es uno de los programas más ampliamente utilizados en áreas científicas, matemáticas y computacionales, por lo que se espera que al estar el algoritmo en esta base, sea fácilmente adaptable en la industria aeronáutica en caso de ser necesario.

4.2 Módulo Creación de Individuos

Para completar la primera generación, es necesario crear n cantidad de individuos cuidando que esta cantidad sea lo suficientemente grande como para tener diversidad en la población, y al mismo tiempo no tan extensa como para impactar negativamente el tiempo de convergencia del algoritmo.

En el presente algoritmo, cada individuo representa un diseño de junta atornillada particular, el cual es definido por su genoma. El presente caso utiliza un genoma conformado por 22 genes donde cada gen es binario por lo que el genoma presenta 2^{22} diferentes opciones o 4,194,304 distintos tipos de diseño.

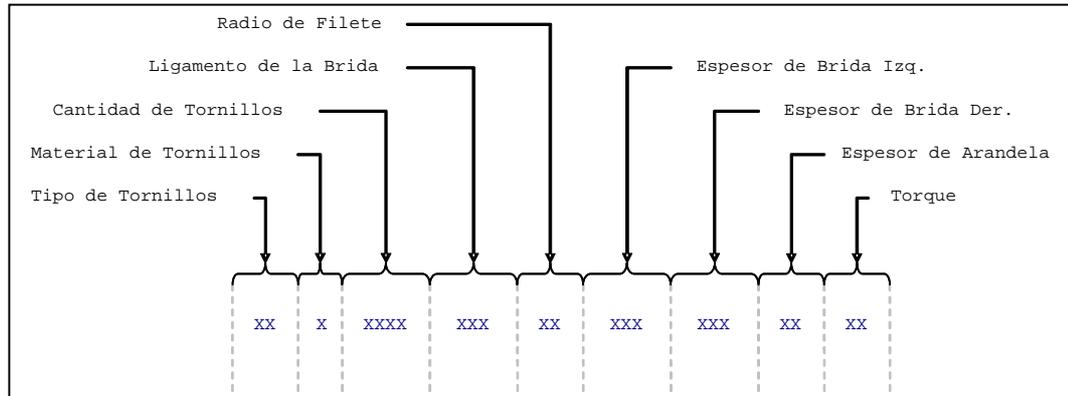


Figura 4-2 Genoma del Individuo

Para definir cada una de estas características geométricas del diseño y sus propiedades mecánicas, se crearon sub-módulos los cuales se muestran en la Figura 4-3 .

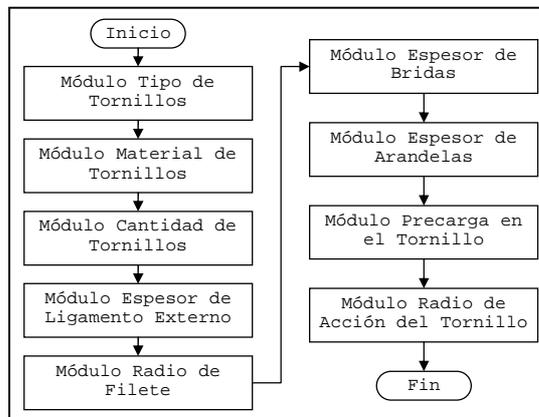


Figura 4-3 Estructura Módulo Creación de Individuos

Cabe mencionar que la forma en que los sub-módulos interactúan, permiten que cualquier individuo generado por estos sea geométricamente posible. Ejemplos de geometrías inválidas son que el agujero de la brida sea más grande que el diámetro exterior de la cabeza del tornillo, o que no

exista espacio suficiente para instalar el tornillo con un herramental estándar, como lo indica la Figura 4-4.

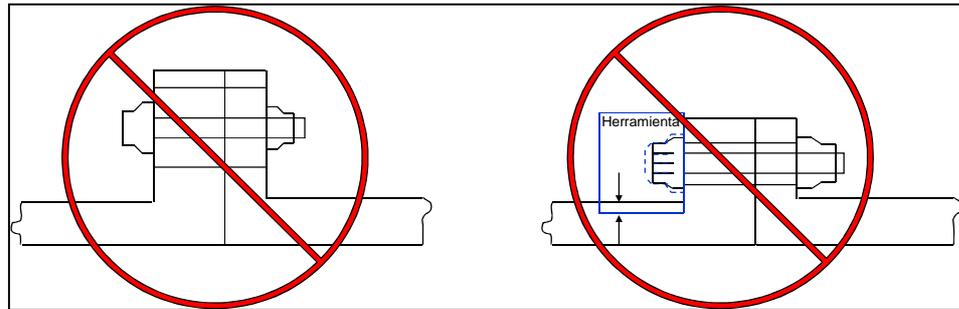


Figura 4-4 Diseño Geométricamente Inválido

Así pues, los módulos descritos definen todas las variables geométricas y de ensamble necesarias para unir las dos carcasas. Gráficamente, estas variables se definen en la figura siguiente.

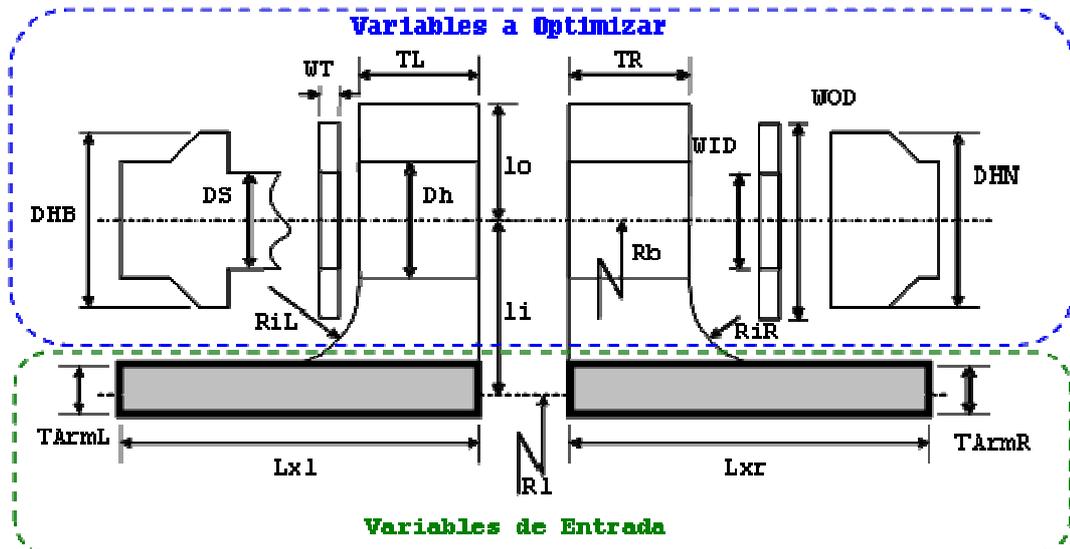


Figura 4-5 Variables de Entrada y Salida del Algoritmo

4.2.1 Sub-Módulo Tipo de Tornillos

Para el algoritmo se seleccionaron opciones de tornillos y tuercas hexagonales de cuerda UNF y con dimensiones basadas en la especificación ANSI B18.2.1 y ANSI B18.2.2, las cuales se describen en la Figura 4-6 , Figura 4-7 , Tabla 4-1 y Tabla 4-2 .

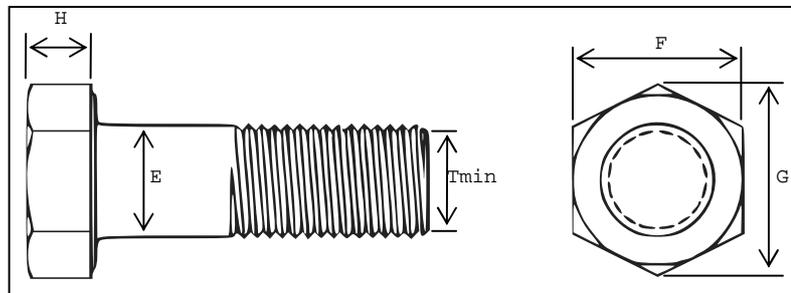


Figura 4-6 Dimensiones de Tornillos Hexagonales

Tabla 4-1 Tornillos Hexagonales [Ref. 29]

Tamaño Nominal	Cuerdas por Pulgada	Área de Esfuerzo Equivalente	Distancia entre caras planas [F]	Distancia entre esquinas [G]	Diámetro menor de Cuerda	Altura de Cabeza [H]	Diámetro del eje del Tornillo
1/4"	28	0.0364	7/16"	0.4945	0.2052	11/64"	0.260
5/16"	24	0.0581	1/2"	0.5645	0.2603	7/32"	0.324
3/8"	24	0.0878	9/16"	0.635	0.3228	1/4"	0.388
7/16"	20	0.1187	5/8"	0.7045	0.3749	19/64"	0.452
1/2"	20	0.1600	3/4"	0.846	0.4374	11/32"	0.515
5/8"	18	0.2560	15/16"	1.058	0.5554	27/64"	0.642
3/4"	16	0.3730	1 1/8"	1.2695	0.6718	1/2"	0.768
7/8"	14	0.5095	1 5/16"	1.4815	0.7858	37/64"	0.875

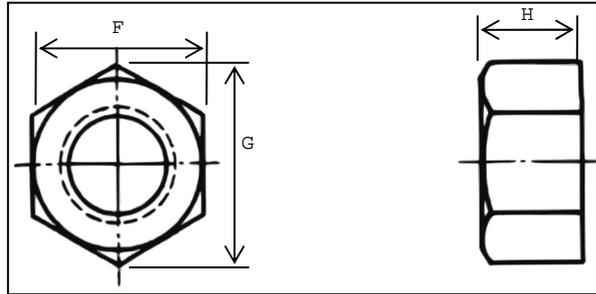


Figura 4-7 Dimensiones de Tuercas Hexagonales

Tabla 4-2 Tuercas Hexagonales [Ref. 30]

Tamaño Nominal	Cuerdas por Pulgada	Distancia entre caras planas [F]	Distancia entre esquinas [G]	Altura [H]	Diámetro de Herramienta
1/4"	28	7/16"	0.4965	7/32"	0.75
5/16"	24	1/2"	0.567	17/64"	0.81
3/8"	24	9/16"	0.639	21/64"	0.87
7/16"	20	11/16"	0.781	3/8"	1.03
1/2"	20	3/4"	0.853	7/16"	1.12
5/8"	18	15/16"	1.067	35/64"	1.37
3/4"	16	1 1/8"	1.2695	41/64"	1.61
7/8"	14	1 5/16"	1.4815	3/4"	1.98

Una restricción que será mostrada más adelante fue la de garantizar el ensamblaje del conjunto tornillo-tuerca. Esta restricción se basa en alojar el suficiente espacio en el diseño para permitir el acceso de herramental para lograr el torque requerido. Para este efecto se tomaron en cuenta las recomendaciones del manual de dibujo aeronáutico de la Sociedad de Ingenieros Automotrices [Ref. 31] y las dimensiones de tuercas de la especificación ANSI B18.2.2 [Ref. 30]. Tanto las dimensiones del herramental como

claros recomendados se muestran en la Figura 4-8 y Tabla 4-3 .

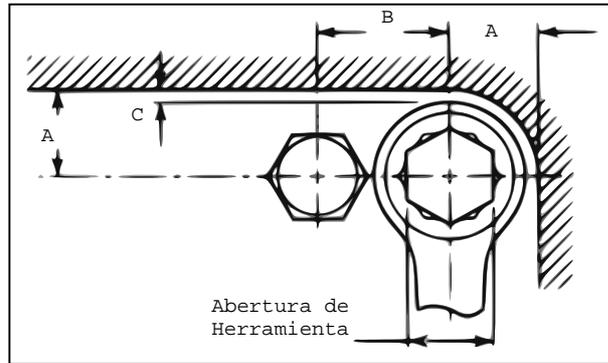


Figura 4-8 Dimensiones de Herramental de 12 puntos de Agarre

Tabla 4-3 Herramental para Tuercas Hexagonales [Ref. 31]

Tamaño Nominal	Distancia entre caras planas Tuerca	Claro entre Centro de Herramienta y Pared[A]	Espaciamiento Mínimo [B]	Claro Mínimo entre Herramienta y Pared [C]
1/4"	7/16"	0.400	0.650	0.03
5/16"	1/2"	0.450	0.740	0.03
3/8"	9/16"	0.500	0.830	0.03
7/16"	11/16"	0.590	0.990	0.03
1/2"	3/4"	0.660	1.090	0.03
5/8"	15/16"	0.780	1.032	0.03
3/4"	1 1/8"	0.950	1.060	0.03
7/8"	1 5/16"	1.090	1.850	0.03

Dentro del algoritmo, el tipo de tornillos está representado por 3 genes que permiten $3^2=8$ opciones distintas como se muestra en la Tabla 4-4 .

Tabla 4-4 Genoma de Conjunto Tuerca/Tornillo

Genes	Tamaño Nominal
000	1/4"
001	5/16"
010	3/8"
011	7/16"
100	1/2"
101	5/8"
110	3/4"
111	7/8"

El diagrama de flujo del bloque para asignar las variables relacionadas al tipo de tornillo se muestra a continuación.

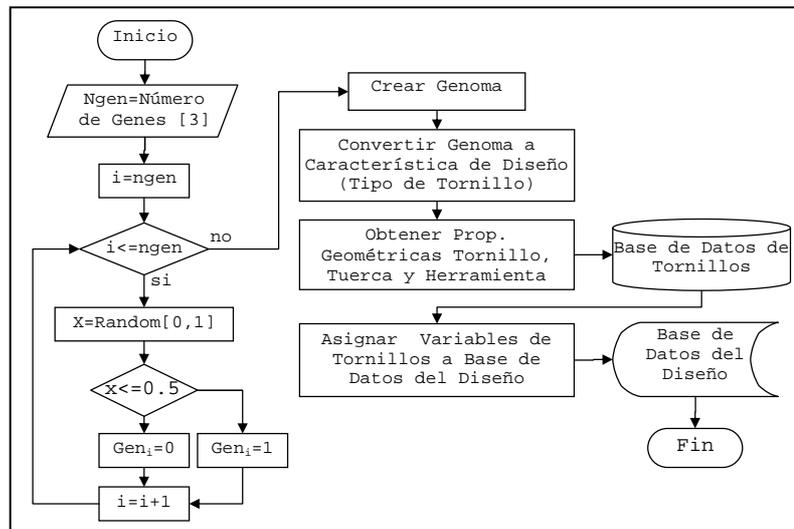


Figura 4-9 Estructura Módulo de Tipo de Tornillos

4.2.2 Sub-Módulo Material del Tornillo

Dentro de las opciones incluidas en el algoritmo está la del material con que está hecho el tornillo.

El par de opciones está basado en dos de las superaleaciones base níquel más comúnmente utilizados para aplicaciones aeronáuticas: Inconel 718 y Waspalloy.

Este par de superaleaciones base níquel son para aplicaciones de alta temperatura, con gran resistencia a la corrosión y de alta resistencia mecánica.

Las propiedades de este par de materiales están basadas en material rolado para aplicación en tornillería. Este proceso mejora las propiedades en zonas críticas del tornillo como los filetes, en donde existe un gran concentrador de esfuerzos. Estas propiedades son mostradas en la Tabla 4-5 .

Tabla 4-5 Propiedades Mecánicas de Materiales de Tornillería

Material	Módulo de Elasticidad	Esfuerzo de Cedencia Mínimo	Esfuerzo de Cedencia Promedio	Esfuerzo de Ruptura Mínimo
Inconel 718	30.3x10 ³ ksi	133ksi	153ksi	155ksi
Waspalloy	32x10 ³ ksi	143ksi	155ksi	170ksi

Las propiedades descritas anteriormente se definen para datos mínimos y datos promedios. Los datos promedios corresponden a la media aritmética mientras que los datos mínimos corresponden a datos 90/95 (90% de confianza con 95% de confiabilidad).

En lenguaje binario, el genoma de las opciones del tornillo está dado por un solo gen, que proporciona dos opciones:

Tabla 4-6 Genoma del Material del Tornillo

Genes	Material
0	Inconel 718
1	Waspaloy

La estructura de este módulo en el algoritmo se presenta a continuación:

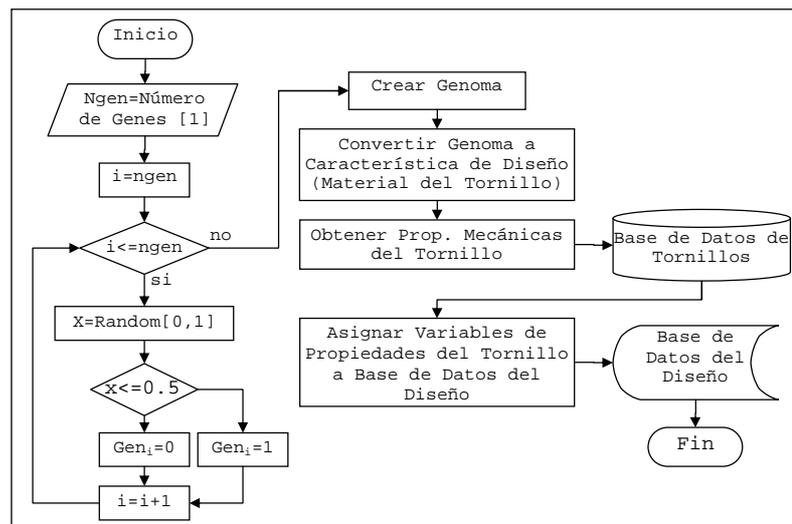


Figura 4-10 Estructura Módulo de Material del Tornillo

4.2.3 Sub-Módulo Cantidad de Tornillos

Para definir la cantidad de tornillos, se supuso que el arreglo de tornillos es equidistante, esto quiere decir que el paso del arreglo es simplemente el perímetro al radio de acción de los tornillos dividido por el número de tornillos.

Puesto que el número de tornillos requeridos depende en gran del diámetro de la junta, no se eligió una relación directa entre el genoma y el número de tornillos. En lugar de esta relación directa se optó por definir las opciones del genoma entre un número mínimo y máximo recomendado.

El número de tornillos máxima se define como la cantidad de tornillos tal que cumpla los requerimientos de ensamble mostrados anteriormente en la Figura 4-8 . Para la cantidad de tornillos mínima se supuso un paso entre los tornillos de máximo 10 veces el diámetro de la cabeza del tornillo como se muestra a continuación.

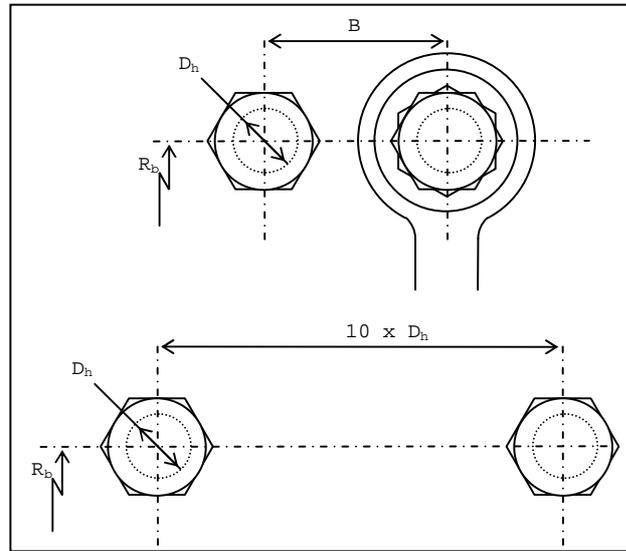


Figura 4-11 Dimensiones de Herramental de 12 puntos de Agarre

$$BoltQty_{\min} = \text{MultiploSup} \left[\frac{2 \pi R_b}{10 \times D_h} \right] \quad \text{Ecuación 4-1}$$

$$BoltQty_{\max} = \text{MultiploInf} \left[\frac{2 \pi R_b}{B} \right] \quad \text{Ecuación 4-2}$$

El genoma que determina la cantidad de tornillos está definido con 4 genes, lo que permite 16 opciones. Tomando en cuenta las condiciones geométricas del ejemplo resuelto del capítulo 3, donde $D_h=0.249''$, $R_b=25.8$, $B=0.650''$ (para tornillos de $1/4''$), las opciones serían entre $BoltQty_{\min}=66$ y $BoltQty_{\min}=249$:

Tabla 4-7 Genoma de la Cantidad de Tornillos

Genes	Tornillos	Genes	Tornillos
0000	66	1000	164
0001	78	1001	176
0010	90	1010	188
0011	103	1011	200
0100	115	1100	212
0101	127	1101	225
0110	139	1110	237
0111	151	1111	249

Cabe destacar que al no ser números enteros las opciones de cantidad de tornillos, estos fueron redondeados a números enteros, ya que no se puede obtener una fracción de tornillo.

A continuación se presenta la estructura de este módulo en el algoritmo.

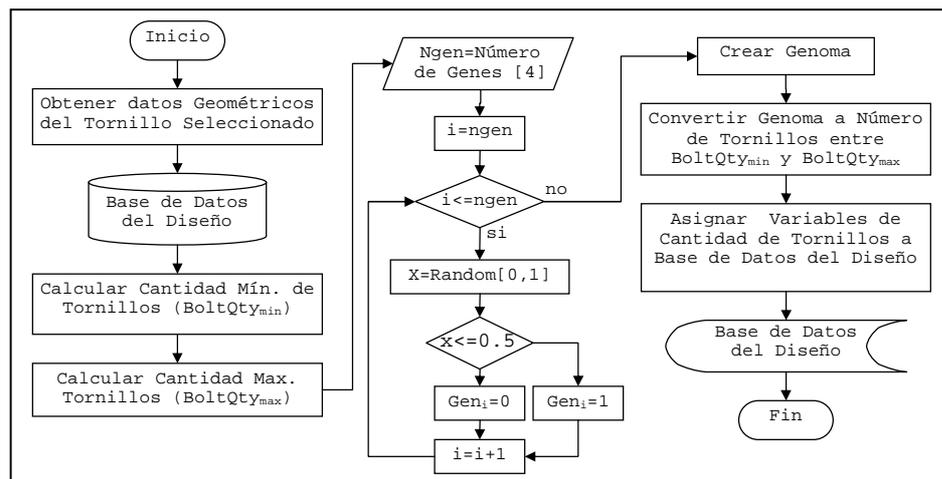


Figura 4-12 Estructura Módulo de Cantidad de Tornillos

4.2.4 Sub-Módulo Espesor de Ligamento Externo

Con el fin de acotar el espacio de búsqueda del ligamento externo a valores representativos y geoméricamente proporcionados al diseño en evaluación, esta variable se definió en función del tornillo elegido para el diseño. Así pues el área de búsqueda se define con un límite inferior de la mitad del diámetro nominal del tornillo, hasta un máximo de dos veces este diámetro como se muestra a continuación:

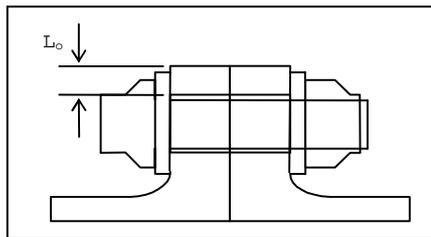


Figura 4-13 Ligamento Externo

$$L_{o\min} = \text{MultiploSup}[0.5 \times D_h]$$

Ecuación 4-3

$$L_{o\max} = \text{MultiploInf}[2 \times D_h]$$

Ecuación 4-4

Para su discretización en el algoritmo se eligieron tres genes que producen 8 opciones.

Nuevamente tomando en cuenta el ejemplo del capítulo 3, donde $D_h=0.249"$, las opciones para L_o se definirían entre $L_{o\min}=0.1245"$ y $L_{o\max}=0.498"$.

Tabla 4-8 Genoma del Ligamento Externo

Genes	Ligamento
000	0.1245"
001	0.1779"
010	0.2312"
011	0.2846"
100	0.3379"
101	0.3913"
110	0.4446"
111	0.4980"

La estructura en forma de diagrama de flujo para este módulo en el algoritmo se presenta a continuación:

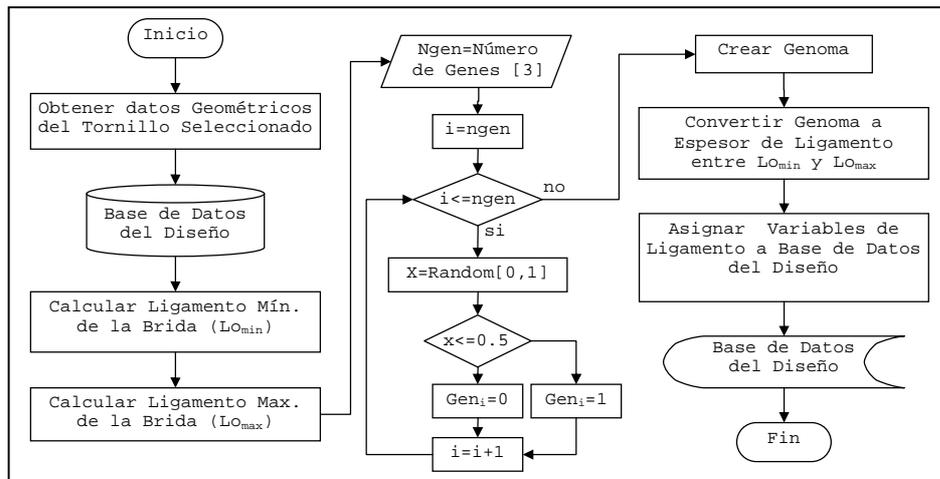


Figura 4-14 Estructura Módulo de Espesor de Ligamento

4.2.5 Sub-Módulo Filete entre Carcasa y Brida

El genoma del radio de filete entre carcasa y brida se definió con 2 genes que permiten 4 opciones entre un valor máximo y mínimo definidos por el usuario.

La razón por la cual los valores máximos y mínimos están definidos por el usuario es bajo el supuesto que este radio es creado por el uso específico de herramientas con radios determinados como fresadoras. Para las corridas del algoritmo mostradas en el capítulo siguiente se consideró herramental que crea filetes entre 0.010" y 0.040" en intervalos de 0.010"

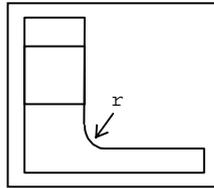


Figura 4-15 Radio de Filete

Tabla 4-9 Genoma del Radio de Filete

Genes	Radio
00	0.01"
01	0.02"
10	0.03"
11	0.04"

La estructura de este módulo en el algoritmo se presenta a continuación:

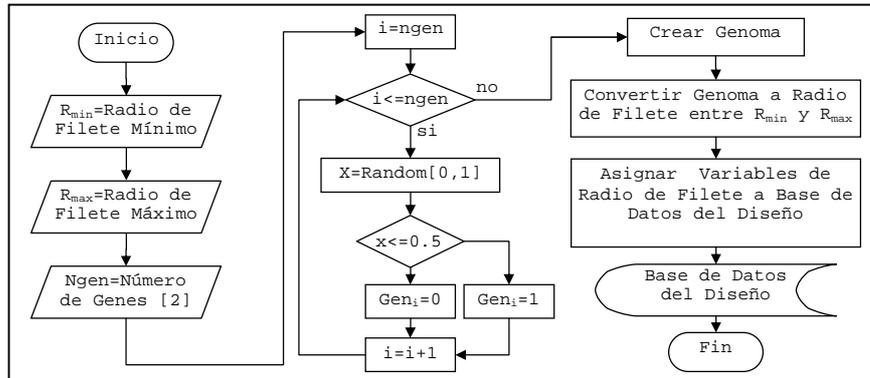


Figura 4-16 Estructura Módulo de Radio de Filete

4.2.6 Sub-Módulo Espesor de Bridas

El espesor de cada una de las bridas está definido por medio de 3 genes cada uno, lo que genera 8 opciones entre valores máximo y mínimos definidos por el usuario.

Para el caso de estudio se definieron como fronteras inferiores y superiores espesores entre 0.125" y 0.750", por lo que el genoma se define como:

Tabla 4-10 Genoma del Espesor de la Brida

Genes	Ligamento
000	0.1250"
001	0.2143"
010	0.3036"
011	0.3929"
100	0.4821"
101	0.5714"
110	0.6607"
111	0.7500"

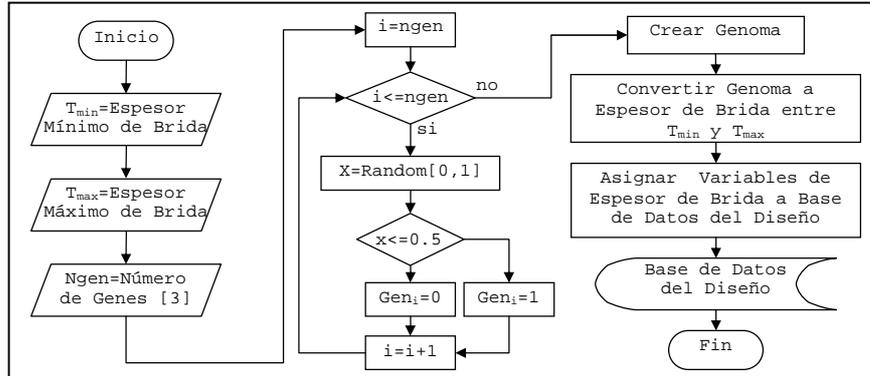


Figura 4-17 Estructura Módulo de Espesor de Bridas

4.2.7 Sub-Módulo Espesor de Arandelas

El uso de arandelas en el diseño está representado por dos genes que definen cuatro opciones de espesor de la misma. Para considerar la posibilidad de un diseño sin arandelas, se definió como frontera menor un espesor igual a cero. Para frontera superior se definió un espesor de 0.090".

Tabla 4-11 Espesor de la Arandela

Genes	Espesor
00	No Arandela
01	0.03"
10	0.06"
11	0.09"

Para totalmente definir la geometría de la arandela, es necesario especificar el diámetro interior y exterior de la arandela. Con el fin de garantizar el ensamble de la pieza, el diámetro interior se definió como el diámetro del tornillo más un claro fijo de 0.040" para garantizar el

paso del tornillo libremente. Para el diámetro exterior se definió como el diámetro de la cabeza del tornillo más 0.010"

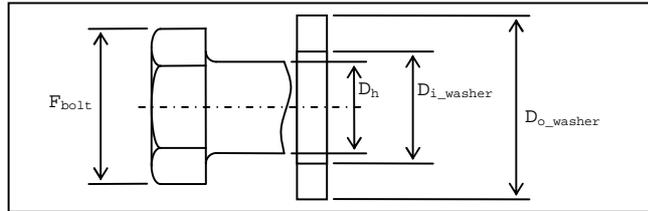


Figura 4-18 Dimensiones de las Arandelas

$$D_{i_washer} = D_h + 0.040''$$

Ecuación 4-5

$$D_{o_washer} = F_{bolt} + 0.010''$$

Ecuación 4-6

Finalmente cabe señalar que el diseño supone que en el caso de requerir arandelas, siempre estas estarán en par. Esto quiere decir que si el genoma indica un espesor para la arandela, habrá entonces dos arandelas, una del lado del tornillo y otra del lado de la tuerca.

A continuación se presenta la estructura de este módulo en el algoritmo en forma de diagrama de flujo:

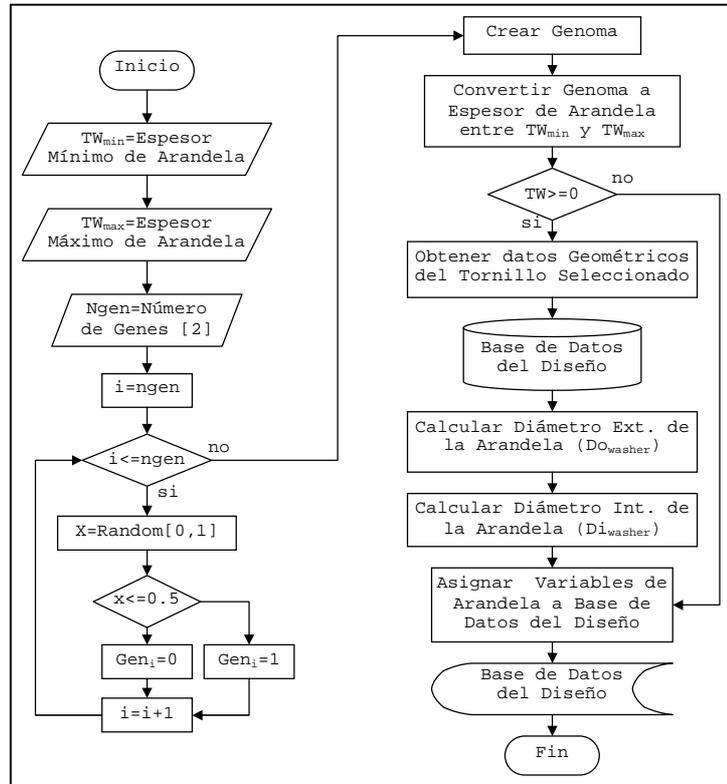


Figura 4-19 Estructura Módulo de Espesor de Arandelas

4.2.8 Sub-Módulo Precarga en el Tornillo

Como se describió en el capítulo 3, existe una gran variación en la precarga del tornillo en función del torque aplicado, geometría, acabados superficiales etc. Por este motivo en lugar de definir la precarga en función del torque y la tornillería elegida, se optó por definirla como función de la carga que produciría un porcentaje del criterio de cedencia del material con que está hecho el tornillo.

El genoma está definido por medio de dos genes que crean 4 opciones que generen un esfuerzo de precarga en el tornillo de entre 30% y 90% del esfuerzo de cedencia promedio (F_{ty}).

Así pues, se espera que, por medio de pruebas específicas a la geometría elegida, se defina de una forma precisa el torque requerido para lograr esta precarga.

Tabla 4-12 Genoma de la Precarga en el Tornillo

Genes	Esfuerzo de Precarga
00	30% de F_{ty}
01	50% de F_{ty}
10	60% de F_{ty}
11	90% de F_{ty}

La estructura de este módulo en el algoritmo se presenta a continuación.

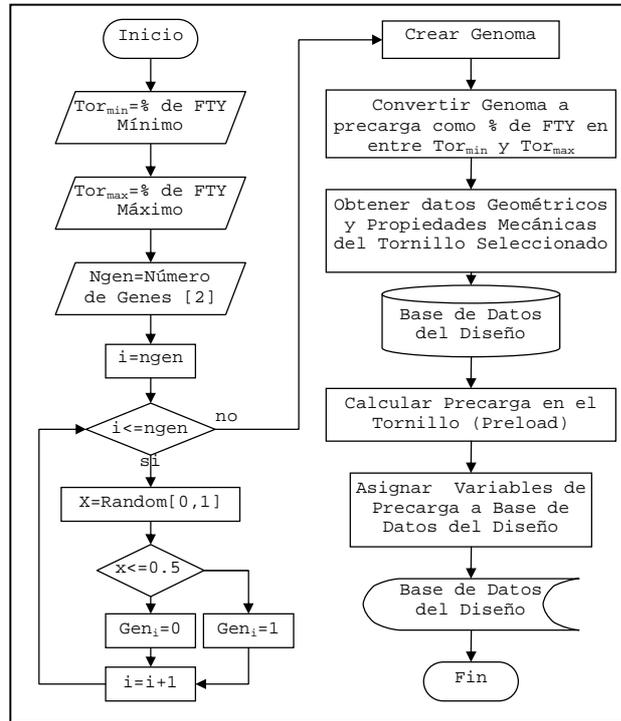


Figura 4-20 Estructura Módulo de Precarga en el Tornillo

4.2.9 Sub-Módulo Radio de Acción del Tornillo

Esta característica geométrica no está directamente definida en el genoma, sino que es función de la geometría definida previamente.

Es sabido que para minimizar los momentos generados por el brazo de palanca entre el radio de acción de fuerzas de las carcasas y el radio de acción del tornillo, este último tiene que estar lo más próximo al primero.

Sin embargo, un diseño robusto tiene que garantizar el ensamble de los tornillos, por lo que se consideró el diámetro del herramental requerido para la instalación, asimismo como el claro recomendado entre la herramienta y la pared más próxima.

Siendo conservadores para evitar un posible rallado de la superficie en la zona del radio entre la brida y la carcasa, se consideró la distancia a la pared más próxima como la distancia en donde comienza el radio del filete como lo muestra la Figura 4-21 .

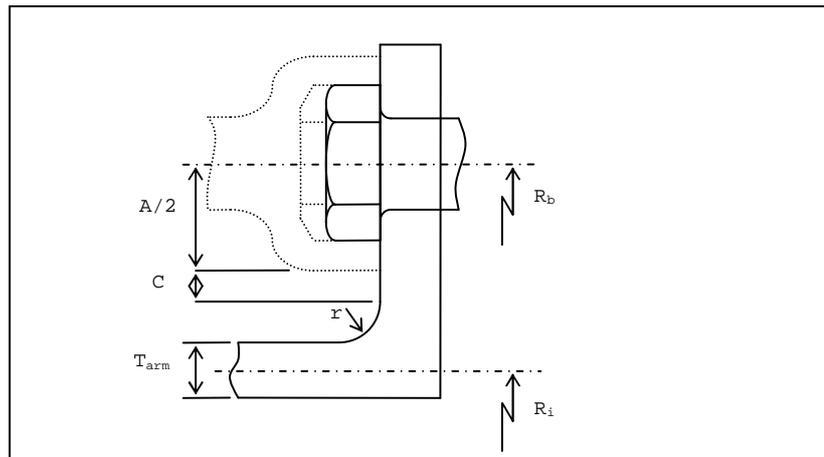


Figura 4-21 Radio de Acción del Tornillo

$$R_b = R_i + \frac{T_{arm}}{2} + r + C + \frac{A}{2}$$

Ecuación 4-7

La estructura de este módulo representado como diagrama de flujo se muestra en la figura siguiente:

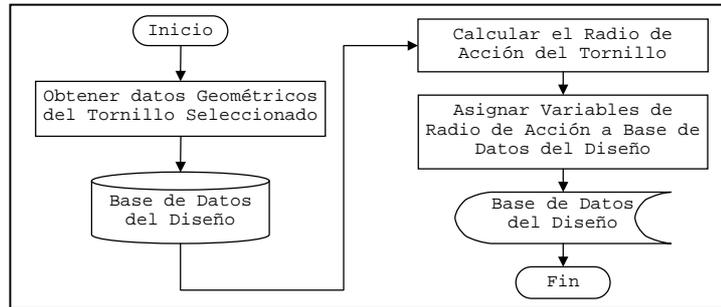


Figura 4-22 Estructura Módulo de Radio de Acción del Tornillo

4.3 Módulo Evaluación

El módulo de evaluación se basa en las ecuaciones mostradas en el capítulo 4. Como lo muestra la Figura 4-23 el módulo se divide en 4 bloques específicos. El primero de ellos corresponde a obtener las propiedades mecánicas y geometría del diseño para así obtener las rigideces de cada uno de los elementos y finalmente la relación de rigideces de la junta. Una vez calculada esta relación de rigideces y con los datos de precarga del diseño es posible crear el diagrama general de la junta y obtener la carga de separación.

Los siguientes dos bloques corresponden al cálculo de la junta bajo cargas normales y límites. Estas cargas, divididas en cargas simétricas y asimétricas son trasladadas a cada uno de los segmentos de cada tornillo en la junta y se identifica el más crítico que será el que presente las cargas asimétricas más altas. Una vez identificado el segmento crítico se obtienen los márgenes

de seguridad por esfuerzos concentrados y netos en el tornillo, de esfuerzo por momento y de aplastamiento en la brida y los márgenes de seguridad de separación y de rotación en la junta.

El último segmento corresponde al cálculo bajo cargas últimas. En este caso se sigue el mismo procedimiento que bajo cargas normales y últimas, salvo que sólo se calculan los márgenes de seguridad de esfuerzo neto en el tornillo, de momento en la brida.

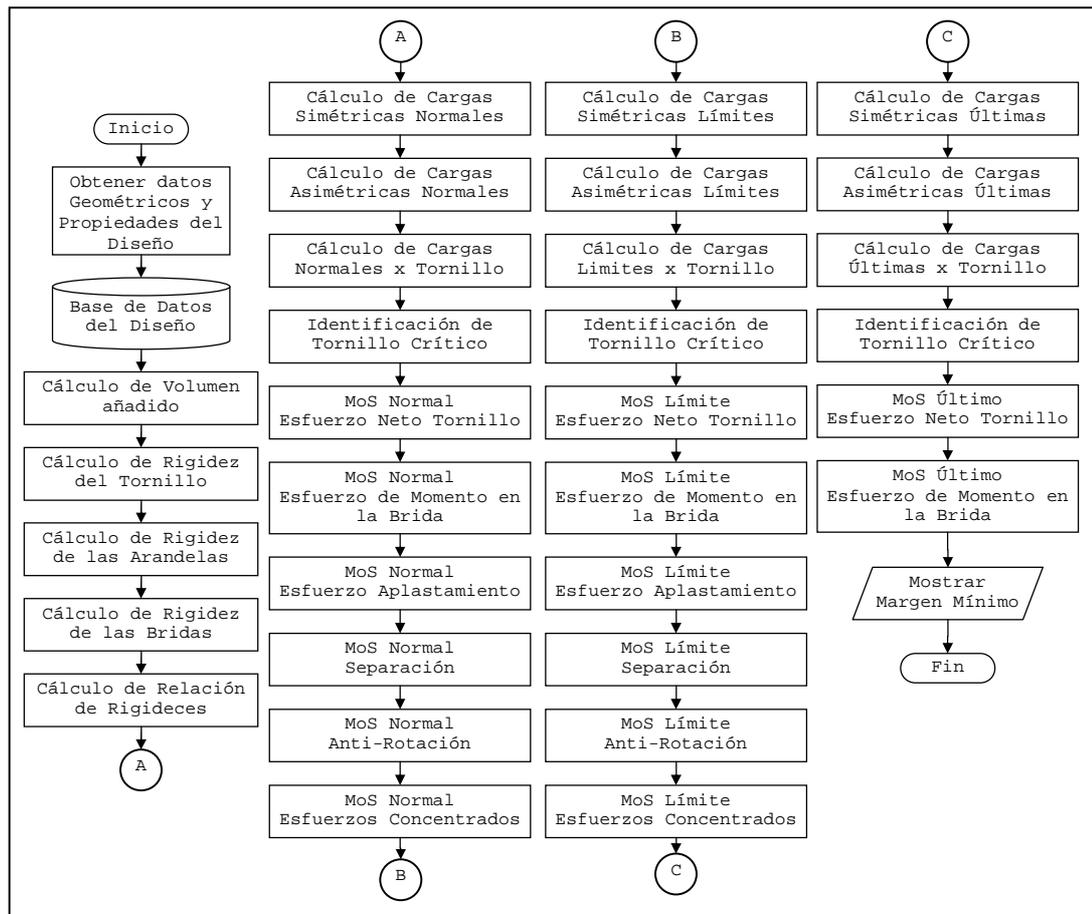


Figura 4-23 Estructura Módulo de Evaluación

Como se puede observar, uno de los pasos en este módulo es el de calcular tanto los márgenes de seguridad como el peso añadido al sistema, ya que al final lo que se busca es minimizar el peso garantizando márgenes de seguridad positivos.

El peso añadido al sistema se calcula de la siguiente manera:

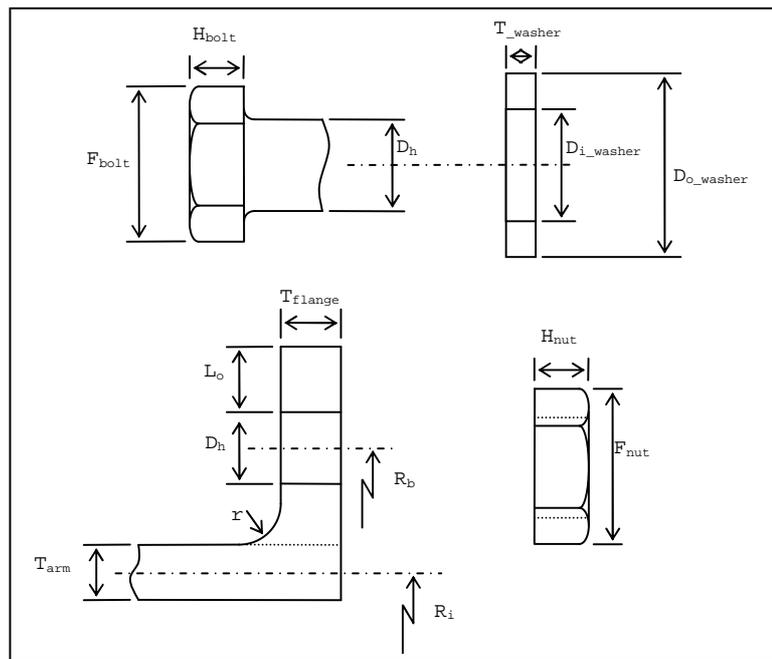


Figura 4-24 Dimensiones para Cálculo de Peso Añadido

$$Wt_{bolt} = \rho_{bolt} \left(\frac{6}{4} \times H_{bolt} \times \tan[30^\circ] \times F_{bolt} + \frac{\pi}{4} D_h^2 \times (T_{flange_lft} + T_{flange_rth} + H_{nut} + 2 \times T_{washer}) \right) \quad \text{Ecuación 4-8}$$

$$Wt_{nut} = \rho_{nut} \left(\frac{6}{4} \times H_{nut} \times Tan[30^\circ] \times F_{nut} - \frac{\pi}{4} D_h^2 \times (H_{nut}) \right) \quad \text{Ecuación 4-9}$$

$$Wt_{washer} = \rho_{washer} \left(\frac{T_{washer} \times \pi \times (D_{o_washer}^2 - D_{i_washer}^2)}{4} \right) \quad \text{Ecuación 4-10}$$

$$Wt_{flange_lft} = \rho_{flange_lft} \left(T_{flange_lft} \times \pi \times \left[\left[\left(R_b + \frac{D_h}{2} + L_o \right)^2 - \left(R_i + \frac{T_{arm}}{2} \right)^2 \right] - N \times \frac{D_h^2}{4} \right] \right) \quad \text{Ecuación 4-11}$$

$$Wt_{flange_rht} = \rho_{flange_rht} \left(T_{flange_rht} \times \pi \times \left[\left[\left(R_b + \frac{D_h}{2} + L_o \right)^2 - \left(R_i + \frac{T_{arm}}{2} \right)^2 \right] - N \times \frac{D_h^2}{4} \right] \right) \quad \text{Ecuación 4-12}$$

$$Wt_{added} = Wt_{bolt} + Wt_{nut} + Wt_{washer} + Wt_{flange_lft} + Wt_{flange_rht} \quad \text{Ecuación 4-13}$$

En el algoritmo genético propuesto ha sido impuesta una característica elitista o restricción al módulo de evaluación, que consiste en que ningún individuo puede existir en la población que no cumpla con todos los requerimientos del diseño. El ejemplo siguiente describe más claramente este concepto:

Si después de crear un par de individuos (ya sea en la primera generación o después de una reproducción en las siguientes generaciones), el primero aumenta el peso del diseño en un 1% respecto al óptimo global pero cumple al 99% un criterio de falla mientras que el segundo aumenta el peso del diseño en un 200% del óptimo global pero cumple al 200 % un criterio de falla, sólo al segundo individuo se le permitirá continuar en el algoritmo y el primero será

desechado. Esto a pesar de la cercanía del primero hacia el óptimo global.

La razón de esta restricción es porque al diseñar con genomas extensos (caso de estudio = 22 genes) resulta difícil lograr la convergencia en tales universos de búsqueda.

4.4 Módulo Selección de Emparejamiento

El método de emparejamiento o selección utilizado se basa en el sistema de ruleta, en el cual se asigna un porcentaje a cada individuo en función de su evaluación relativa al resto de la generación. Así pues, un individuo con mejor desempeño en comparación al resto de la población tendrá más porcentaje de ser elegido para una reproducción que aquel que tiene un pobre desempeño.

La lógica general del algoritmo puede definirse de la siguiente manera:

1. Evaluar conforme a los requerimientos a cada individuo
2. Calcular la probabilidad (o tamaño del espacio en la ruleta) de cada miembro de la población
3. Calcular la probabilidad acumulada de cada individuo
4. Generar un número al azar entre 0 y 1

5. Seleccionar el individuo tal que el número al azar esté comprendido entre su frontera superior e inferior de la probabilidad acumulada.

Este módulo en el algoritmo genético está compuesto por tres bloques. El primero de ellos es un bucle que calcula la evaluación absoluta de la generación. El segundo calcula la evaluación relativa de cada individuo en función de la evaluación absoluta de la generación. Finalmente el tercer bloque elige para una subsecuente cruza.

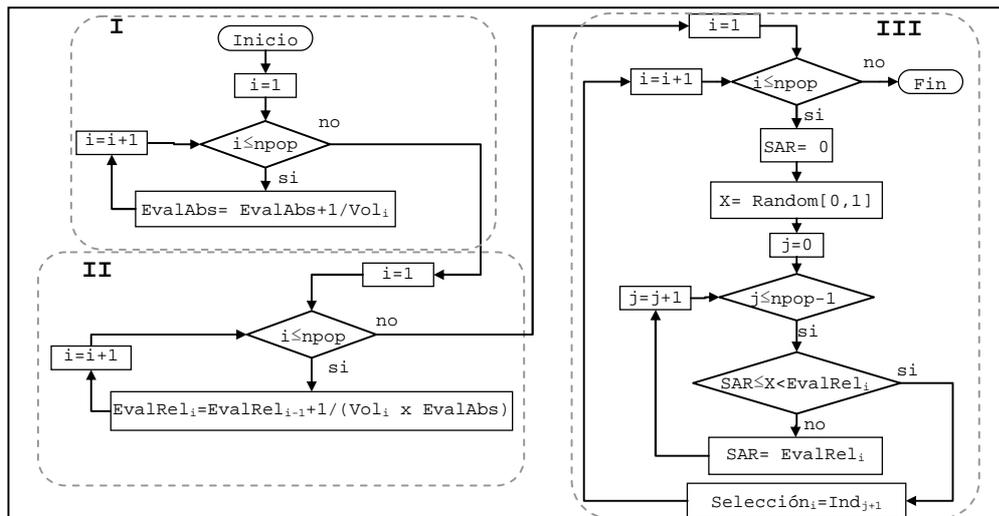


Figura 4-25 Estructura Módulo de Radio de Acción del Tornillo

4.5 Módulo Reproducción

Se exploraron dos tipos de módulos para la reproducción y creación de nuevos individuos. El primero de ellos es el Cruce Único Aleatorio, el cual es el más comúnmente

utilizado en algoritmos genéticos. El segundo de ellos es el Cruce Variable por Característica, los cuales se explicaran más adelante.

La reproducción que se detalla en la mayoría de las referencias bibliográficas, muestran un sistema en el cual un par de padres generan un par de hijos basados en su genoma lo que garantiza mantener una uniformidad en la dimensión de la población.

Con el fin de permitir más flexibilidad en el algoritmo, y que un par de padres, no necesariamente compartiendo un genoma similar, puedan procrear individuos válidos, se añadió la opción de reproducción única, el cual consiste en siguientes requerimientos:

1. Se elige los padres de forma aleatoria de la matriz preseleccionada para individuos para emparejamiento
2. Se define los grupos de cruce aleatorio, ya sea por el método de cruce único o cruce por característica
3. Se genera un individuo
4. Se evalúa este individuo
5. En caso de una evaluación positiva, se sigue con el sistema de reproducción hasta generar una nueva generación

6. En caso de una evaluación negativa, se definen nuevos cruces aleatorios y evaluación del individuo hasta un número máximo de 20 iteraciones

En caso de que después de 20 iteraciones no se encuentre un punto de cruce el cual genere un individuo válido del par de padres, se genera el nuevo individuo igual en genoma que el mejor de los padres.

De esta forma se permite al algoritmo que si bajo el o los puntos de cruce se logra al menos un hijo que cumpla los requerimientos de diseño, la reproducción se considera exitosa.

4.5.1 Cruce Único Aleatorio

Como se mostró en el Capítulo 2, este método reproductivo consta de aplicar un punto de cruce aleatorio en el genoma de dos individuos, y de ahí, crear dos nuevos individuos a partir de los genomas divididos de ambos padres.

El método incluido en el algoritmo aplica exactamente el mismo principio, con la diferencia antes explicada en la cual se evalúan ambos hijos, y en caso de lograr alguno de ellos pasar los requisitos de diseño, este pasará a la siguiente generación. En caso de que los dos nuevos individuos cumplan los requerimientos, el mejor de ellos

pasará a la nueva generación y será escogido por el método de torneo. Finalmente si ninguno cumple los requerimientos se continúa el bucle de 20 intentos con ese par de padres.

El diagrama de flujo de este módulo se presenta a continuación.

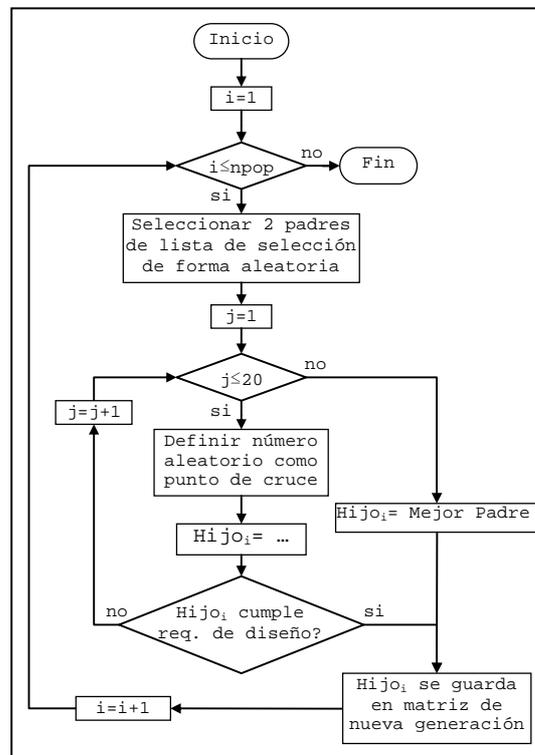


Figura 4-26 Estructura Módulo Reproducción con Punto de Cruce Fijo

4.5.2 Cruce Variable Por Característica

Contrario al Método de Cruce Único Aleatorio, el método propuesto de cruce variable por característica sitúa un

punto de cruce en cada una de las características. Estos cruces rompen cada una de las cadenas de genes que forman cada característica del fenotipo y forman una nueva.

El objetivo de este tipo de cruce es el de ampliar la diversidad de cada una de las características, pero en un rango próximo a las características de los padres que ya han pasado los requerimientos de diseño como lo muestra la Figura 4-27.

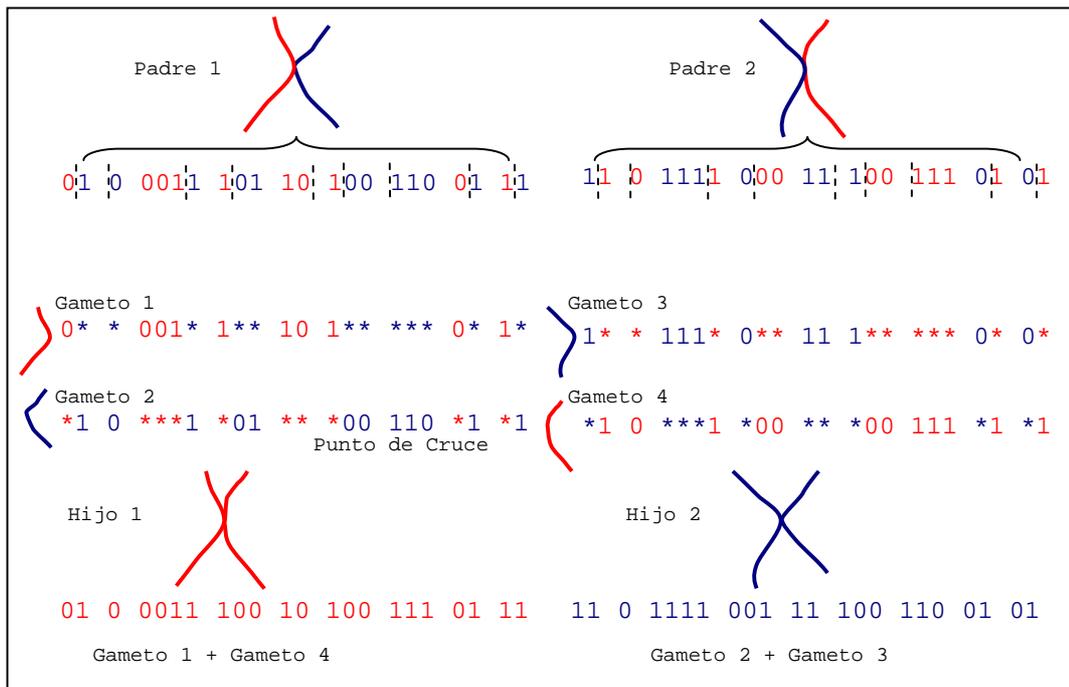


Figura 4-27 Reproducción con Cruce Variable por Característica

De nueva cuenta, el proceso consiste en determinar si alguno de los nuevos individuos pasa los requerimientos de diseño para ser parte de la nueva generación. En caso de que ambos individuos cumplan los requerimientos se procede

a elegir al mejor por torneo. En caso de que ninguno cumpla, se continua el bucle de 20 intentos para lograr una reproducción exitosa entre ese par de padres.

El diagrama de flujo de este método se muestra a continuación.

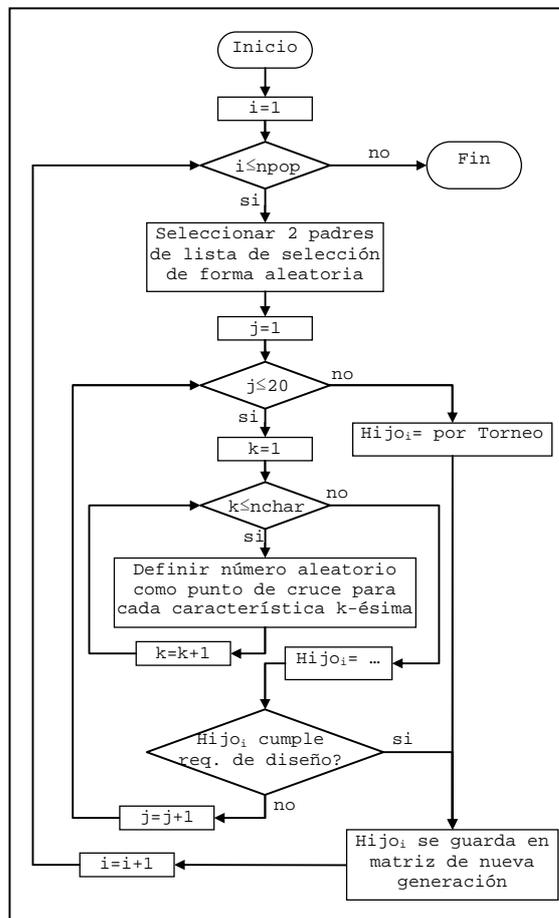


Figura 4-28 Estructura Módulo Reproducción Cruce Variable por Característica

4.6 Módulo Torneo

Mientras que en el capítulo 2 se explicó el método de torneo para efectos de selección de individuos para una posterior reproducción, en el caso de estudio se utilizó para evaluar los dos individuos generados por la reproducción, o en el caso de que la reproducción no haya sido fructífera.

El módulo de evaluación por torneo se define simplemente como una selección del mejor individuo entre dos opciones. Este módulo se da en el algoritmo cuando después de una reproducción ambos nuevos individuos logran cumplir todos los requerimientos de diseño o cuando después de cumplir todas las iteraciones, la reproducción no fue exitosa y se tiene que elegir el genoma del mejor padre para crear una nueva generación.

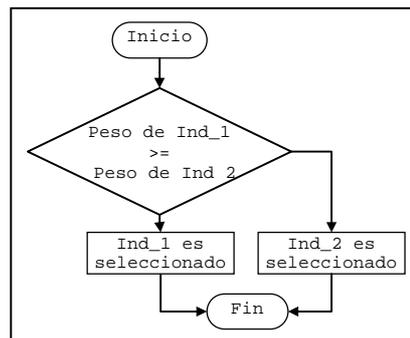


Figura 4-29 Estructura Módulo Torneo

4.7 Módulo Mutación

La técnica de mutación impuesta al algoritmo genético está sujeta a las restricciones impuestas al método de elitismo. Como se recordará, no existirá ningún individuo en la población inicial, así como individuos creados posteriormente bajo métodos de reproducción que no cumpla con todos los requerimientos de diseño.

De esta forma, al aplicarse las mutaciones al genoma de toda la generación, se selecciona a cada individuo afectado y se evalúa el efecto de la mutación bajo el punto de vista de requerimientos de diseño. Sin importar si la mutación aumenta o disminuye el parámetro a optimizar, el nuevo individuo es válido si y sólo si cumple con los requerimientos. En caso de no hacerlo, esta mutación se rechaza y el individuo seleccionado se reemplaza con el genoma del individuo original.

Los parámetros propuestos fueron el aplicar un 0.5%, 1% y 5% de mutación al genoma de la población total, la cual consiste en identificar aleatoriamente un gen y cambiarle su valor binario, por ejemplo, si era un 0 cambiarlo a 1 y viceversa.

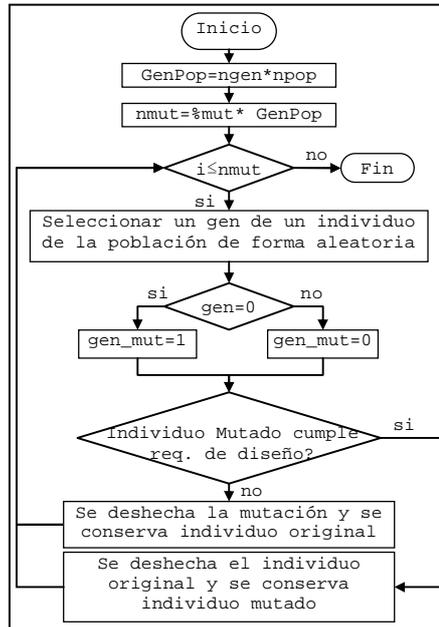


Figura 4-30 Estructura Módulo Mutación

5. RESULTADOS

5.1 Variables de Entrada

Para evaluar la capacidad del algoritmo planteado, se decidió crear un caso de estudio bajo cargas límites, últimas y normales y calcular su efectividad para encontrar diseños robustos con bajo incremento en el peso.

Puesto que la brida es totalmente definida por el algoritmo, sólo la geometría de las carcavas es definida como variable de entrada. Cabe destacar que las cargas simétricas que serán definidas más adelante son aplicadas en el punto definido en la Figura 5-1 .

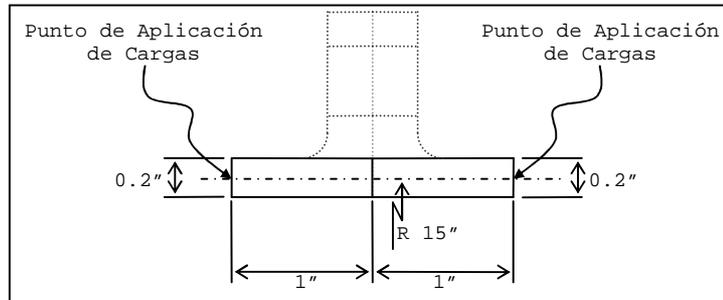


Figura 5-1 Variables Geométricas de Entrada

Aunque estas cargas no provienen de un caso específico por considerarse información privilegiada de las compañías diseñadoras, se pueden considerar estas representativas de una turbina cuyo empuje oscila en el rango de las 20,000 a 30,000 libras.

Además se supuso que las cargas térmicas no están presentes, supuesto válido para las juntas atornilladas que se encuentran en la parte frontal de la turbina que comprende desde el ventilador principal hasta el inicio de la sección del compresor. Estas cargas son mostradas en la tabla siguiente.

Tabla 5-1 Cargas para Caso de Estudio

Carga	Valor Normal	Valor Límite	Valor Último
Carga Axial Simétrica [lb]	30,000	39,000	58,500
Carga de Torsión [lb in]	4,000	5,000	7,500
Carga Radial Simétrica [lb/rad]	3,800	6,080	9,120
Momento Simétrico [lb in /rad]	1,000	1,400	2,100
Momento Asimétrico Horizontal [lb in]	4,000	5,600	8,400
Momento Asimétrico Vertical [lb in]	3,000	3,750	5,625
Cortante Horizontal [lb]	60,000	102,000	153,000
Cortante Vertical [lb]	30,000	43,500	63,250

Las dos carcasas a unir fueron consideradas del mismo material, el cual es Inconel 718. Este material es ampliamente utilizado en la industria aeronáutica por su alta resistencia mecánica. Se supuso a su vez que en caso de que el diseño requiera de arandelas, estas serán de una aleación de Waspaloy.

Tabla 5-2 Materiales Caso de Estudio

Propiedad	Brida Izq	Brida Der	Arandela
Módulo de Elasticidad	30.3E3 ksi	30.3E3 ksi	28.8E3 ksi
Esfuerzo de Cedencia Mínimo	81 ksi	81 ksi	-
Esfuerzo de Cedencia Promedio	123 ksi	123 ksi	-
Esfuerzo de Ruptura Mínimo	130 ksi	130 ksi	-

Adicionalmente, se decidió considerar un coeficiente de fricción entre las bridas de 0.1, el cual es considerado típico para contactos entre metales con acabado maquinado y con una rugosidad del orden de 250 micropulgadas.

5.2 Variantes Propuestas a los AG Tradicionales

Como primera opción se optó por utilizar como punto de partida un software en el mercado para la aplicación de técnicas evolutivas para efectos de optimización. Se escogió la paquetería de algoritmos genéticos del programa Mathematica de la compañía Wolfram [Ref. 45], sin embargo la forma tradicional de los algoritmos no se adapta al problema propuesto ya que:

- En el caso de estudio, la función evaluadora no es única, sino que depende de tres tipos de cargas (normales, límite y últimas), además de contar con distintos tipos de requerimientos cada una de ellas.
- Las funciones elitistas son aplicadas de forma manual y dependen totalmente del tipo de problema a analizar. Esta aplicación caso por caso impide que

estas funciones estén disponibles en software comerciales.

- Por lo altamente restringido del sistema, el método de reproducción incluido en el software (cruce único con dos individuos creados a partir de dos padres), no produce resultados aceptables. Como se verá más adelante, la probabilidad de que dos individuos sean válidos de la reproducción de dos padres, una vez que se aplican funciones elitistas, es muy baja, por lo que generalmente la reproducción en el software es infructuosa y no lleva a ninguna convergencia.

A partir de estos resultados preliminares, se optó por crear un algoritmo que fuera específico a problemas complejos y altamente restringidos como el necesario para el caso de estudio. A continuación se mostraran las variaciones que fueron necesarias.

5.2.1 Dimensión de Población Inicial

Se exploró con distintas dimensiones de poblaciones en el rango de 25 a 300 individuos. Como se demostrará más adelante, un mayor número de individuos impacta el tiempo de convergencia de una manera lineal. Además se visualizó que un aumento de población en el rango de 25 a 100 individuos produce exponenciales mejoras en la calidad de los resultados (reportados como peso añadido). En el rango de 100 a 150, las mejoras disminuyen drásticamente y

finalmente entre 150 a 300 individuos no se percibe una mejora en el algoritmo. De ahí que se pueda concluir que una población de 150 individuos es suficiente para el caso de estudio.

5.2.2 Elitismo

Como se mencionó anteriormente, en el algoritmo fue aplicada la técnica de elitismo, la cual restringe que los individuos que no cumplan todos los requerimientos de diseño estén presentes en cualquier generación. Aunque pueda parecer demasiado extremista, este elitismo corresponde al proceso de diseño y a la adaptación natural. De la misma forma que un componente que no cumpla los requerimientos no puede estar sobre la mesa de diseño y pasar a una siguiente etapa, un individuo que no pueda reaccionar a su ambiente no solamente no tendrá oportunidades de generar descendencia, sino que no sobrevivirá.

A pesar de que esta técnica ayude a lograr más rápidamente la convergencia en generaciones posteriores a la creación de la población inicial, esta última requiere una gran cantidad de iteraciones para lograr individuos válidos.

Para evaluar el efecto que tiene esta técnica en el tiempo de cómputo, se corrió el algoritmo para generar una población de 200 individuos y se calculó cuantas

iteraciones son necesarias para obtener un individuo válido.

Como lo muestra la Figura 5-2 , en menos del 10% de los casos se logró un individuo válido en la primera iteración e incluso existen individuos que necesitaron más de 100 iteraciones. Como se puede observar también, la distribución no es normal, pero se puede decir que la media aritmética del experimento es de aproximadamente 17.5 iteraciones por individuo.

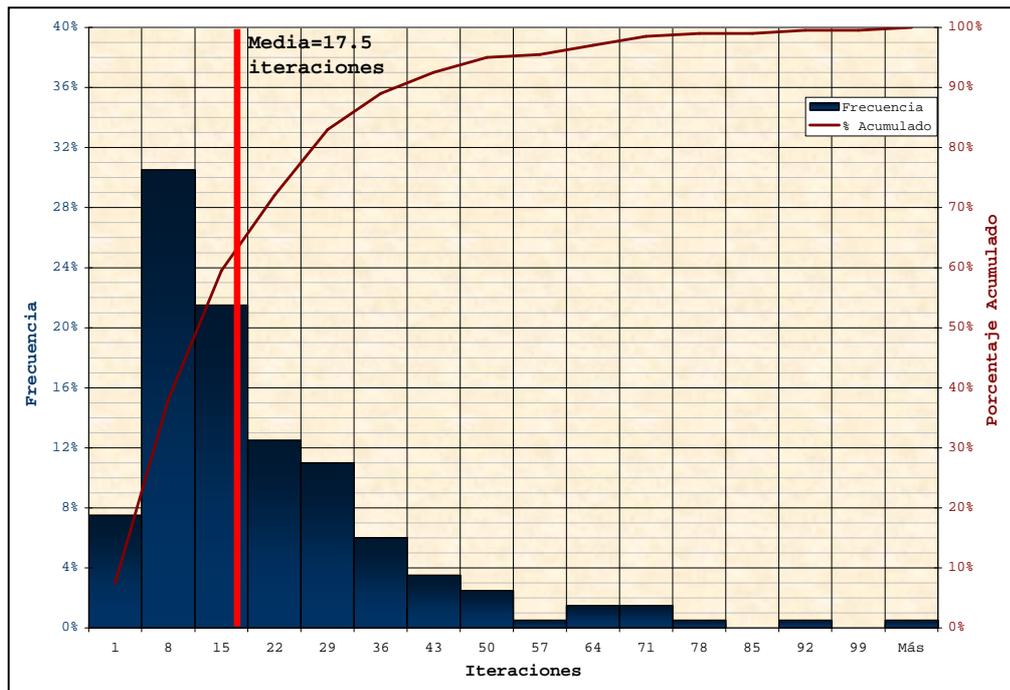


Figura 5-2 Iteraciones para lograr un Individuo Válido

Con datos de la Figura 5-2 se puede dar una idea de lo restringido del sistema. Puesto que en promedio fueron necesarias 17 iteraciones para lograr un individuo válido,

se puede concluir que aproximadamente que tan solo 1/17.5 o 5.7% de los casos geoméricamente posibles cumplen con cada uno de los 14 requerimientos de diseño.

Otro impacto de esta restricción es que una parte considerable del tiempo de cómputo se consume tan sólo lograr tener una población inicial que cumpla con todos los requisitos de diseño. Basándose en las corridas cuyos resultados se muestran en este capítulo se puede concluir que aproximadamente 20% del tiempo de cómputo se dedica a la creación de la población inicial.

5.2.3 Criterio de Convergencia

Como primer parámetro, se impuso un criterio de no más de 100 generaciones. Sin embargo se observó que, por lo restringido del sistema y el poco espacio de búsqueda que se delimitaba por el criterio elitista, en muy tempranas generaciones (generalmente menos de 20), el genoma de todos los individuos era prácticamente el mismo.

De esta forma, se optó por cortar el algoritmo una vez que:

1. Por más de 5 generaciones, el genoma del individuo mejor evaluado de la generación no sufriera ningún cambio
2. Que más de la mitad de los individuos en la población tuvieran el mismo genoma.

Aunque el criterio de convergencia es compuesto, en la realidad el criterio aplicado al individuo mejor evaluado de la población fue el que primero se alcanzaba.

Se probó aumentar o disminuir el número de 5 generaciones sin cambio en el genoma del individuo mejor evaluado a valores entre 2 y 10. Sin embargo en 5 el comportamiento se muestra estable y no presenta variación en cuanto a la calidad de la solución. A continuación se muestran un par de gráficas típicas que muestran la convergencia del algoritmo tanto para la media de la población como para el individuo mejor evaluado para una población de 150 individuos.

Cabe destacar que en el punto de convergencia de la primera y segunda corrida, en estos casos de 10 y 11 generaciones respectivamente, la media de la población no dista mucho de los valores del mejor individuo seleccionado (aproximadamente 23 contra 17.5 pulgadas cúbicas), lo que demuestra que el criterio de 5 generaciones sin cambio en el individuo mejor evaluado es suficiente para el problema analizado.

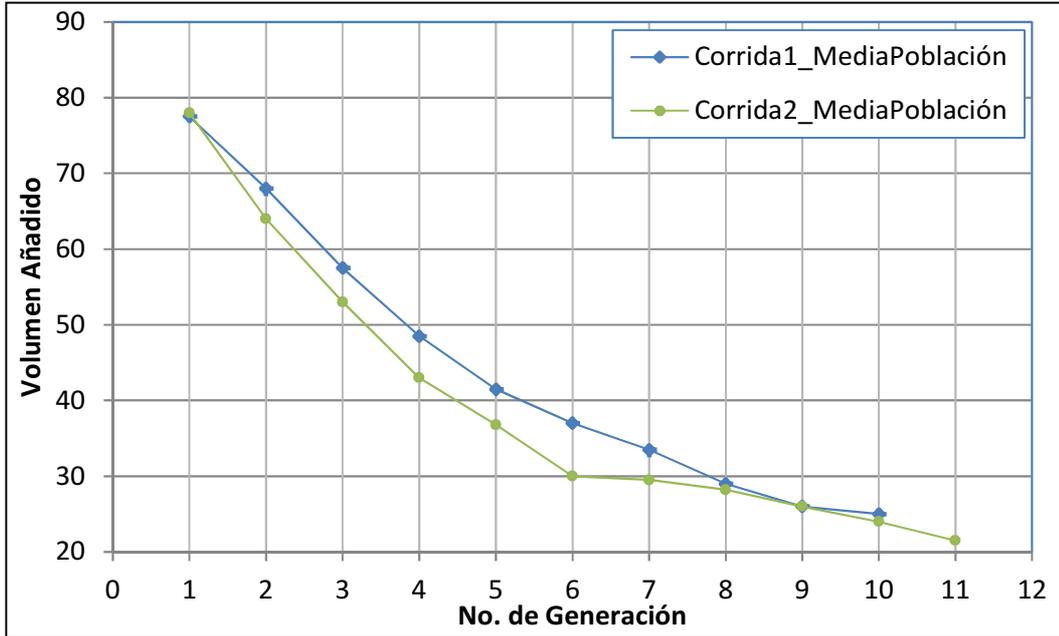


Figura 5-3 Convergencia de la Población

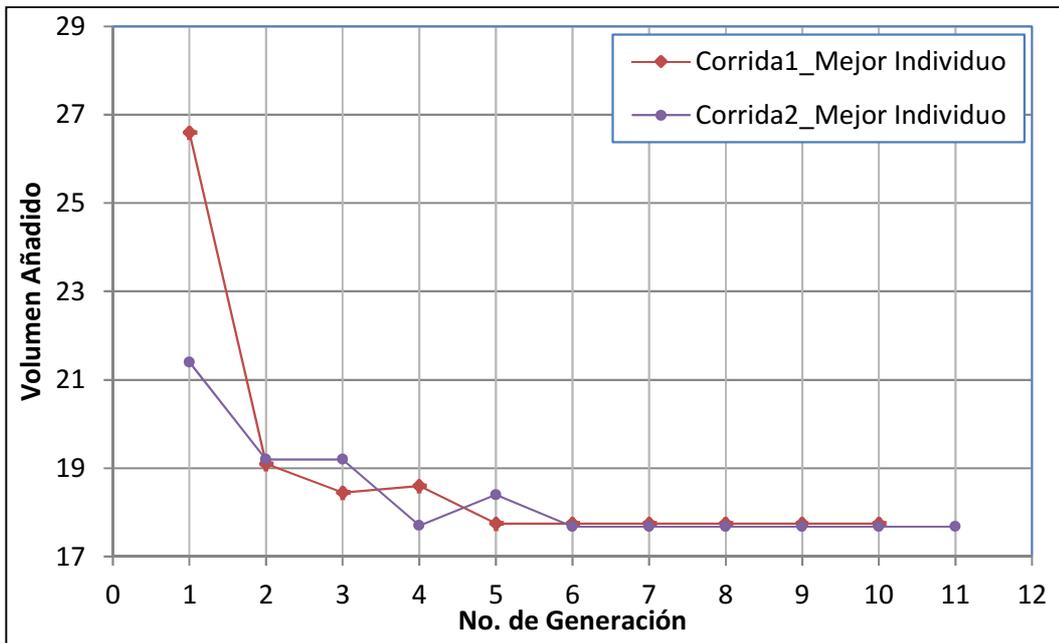


Figura 5-4 Convergencia del Individuo Mejor Evaluado

Como se observa en las figuras anteriores, la mejora en el promedio de la población se da la forma esperada, una

mejora considerable en las primeras generaciones, y un comportamiento asintótico cerca de la convergencia. Sin embargo, el comportamiento del individuo mejor evaluado se muestra con una repentina disminución en el volumen añadido dentro de las primeras 5 generaciones.

5.2.4 Reproducción Selectiva

Las técnicas descritas en la sección 2.6 se basan en que dos padres generan dos nuevos individuos, sin embargo, la aplicación de estos esquemas de reproducción no mostró una aplicación válida al caso de estudio por la siguiente razón:

Como ya se describió, el criterio de elitismo genera una sobrerrestricción en el sistema tan grande que del universo de opciones, tan solo un 5.7% son objeto de optimización. De esta forma, la posibilidad de generar una reproducción en la cual los dos nuevos individuos sean válidos a partir de dos padres válidos es remota, y cuando es exitosa se debe generalmente a que el genoma de los padres es muy similar, lo que genera individuos nuevos que son prácticamente clones de los padres.

Para minimizar este inconveniente se tuvo que optar por aplicar un criterio de reproducción selectivo a partir de un torneo entre los nuevos individuos. De esta forma, si los dos nuevos individuos no son válidos, el elitismo los deshecha. En caso de que sólo uno de los individuos sea

válido, este toma un lugar en la siguiente generación, y en caso de que ambos sean válidos, el mejor evaluado es el que toma lugar en la siguiente generación.

5.2.5 Cruce Único Aleatorio como Método Reproductivo

Este método corresponde al descrito en la sección 2.6.1 Punto de Cruce Único aunado a la restricción de una reproducción selectiva.

Recordando el caso de estudio, el genoma de cada individuo está conformado por 22 genes, los cuales representan características físicas del diseño (su fenotipo). Como lo muestra la Figura 2-3, con un Método Reproductivo de Cruce Único, existen limitadas posibilidades de obtener una cruce entre los genes que forman cada una de las características del fenotipo. Esto es obvio al ver que de los 23 posibles puntos de cruce, 10 de ellos (~43%) definen la frontera entre característica y característica. De esta forma, los individuos creados a partir de esta técnica de cruce tendrán altas probabilidades de tener fenotipos (o grupos de genes) iguales a uno de los padres.

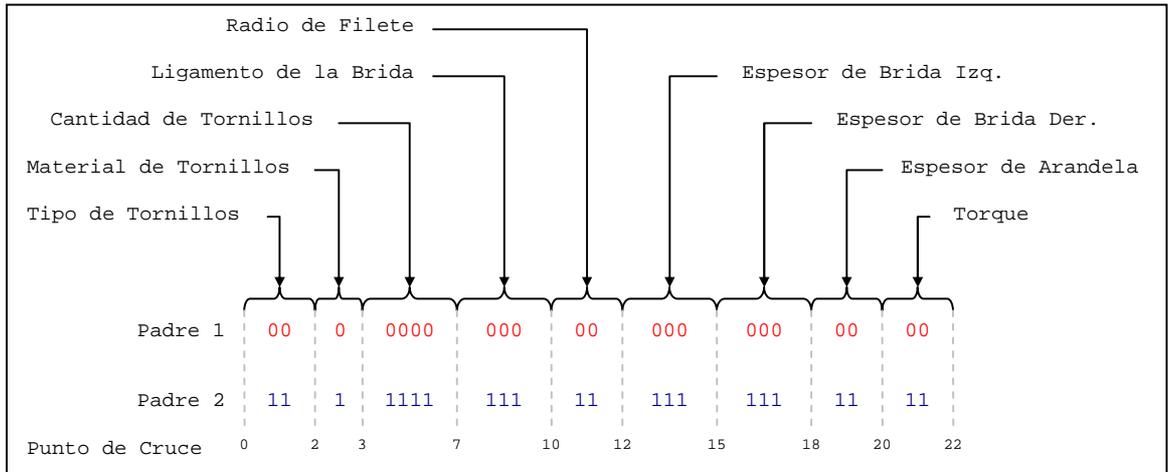


Figura 5-5 Puntos de Cruce en Genoma de Caso de Estudio

Desde un punto de vista matemático, las probabilidades de que cada una de las características del problema de estudio se cruce son las siguientes:

Cantidad de tornillos:	$3/23 =$	13.0%
Espesor de Brida Izq.:	$2/23 =$	8.7%
Espesor de Brida Der.:	$2/23 =$	8.7%
Ligamento de la Brida:	$2/23 =$	8.7%
Espesor de la Arandela:	$1/23 =$	4.3%
Radio de Filete:	$1/23 =$	4.3%
Tipo de Tornillos:	$1/23 =$	4.3%
Torque:	$1/23 =$	4.3%
Restante (frontera):	$10/23 =$	43.5%

Tomando el caso del genoma de la Figura 5-5 y enfocándose en el fenotipo de la cantidad de tornillos se puede deducir que para 87% de los casos, los individuos generados por este método tendrán o la cantidad de tornillos de un padre o del otro, ya que tan sólo en un 13% se logra un punto de cruce dentro del genotipo que define la cantidad de tornillos.

Quizá el parámetro más importante de este tipo de cruce es el número de individuos en la población, ya que al haber limitadas probabilidades de características intermedias al genoma de los padres, estas deben estar representadas desde la creación inicial de la población.

Para evaluar este punto de cruce, se utilizó el algoritmo genético propuesto para el caso de estudio y se evaluó 100 veces para distintas poblaciones (25, 50, 75, 100, 125, 150 y 200 individuos). A su vez, se calculó el tiempo promedio de cómputo, el volumen promedio agregado por la población y el volumen agregado por el mejor individuo de la población al momento de cumplirse el criterio de convergencia.

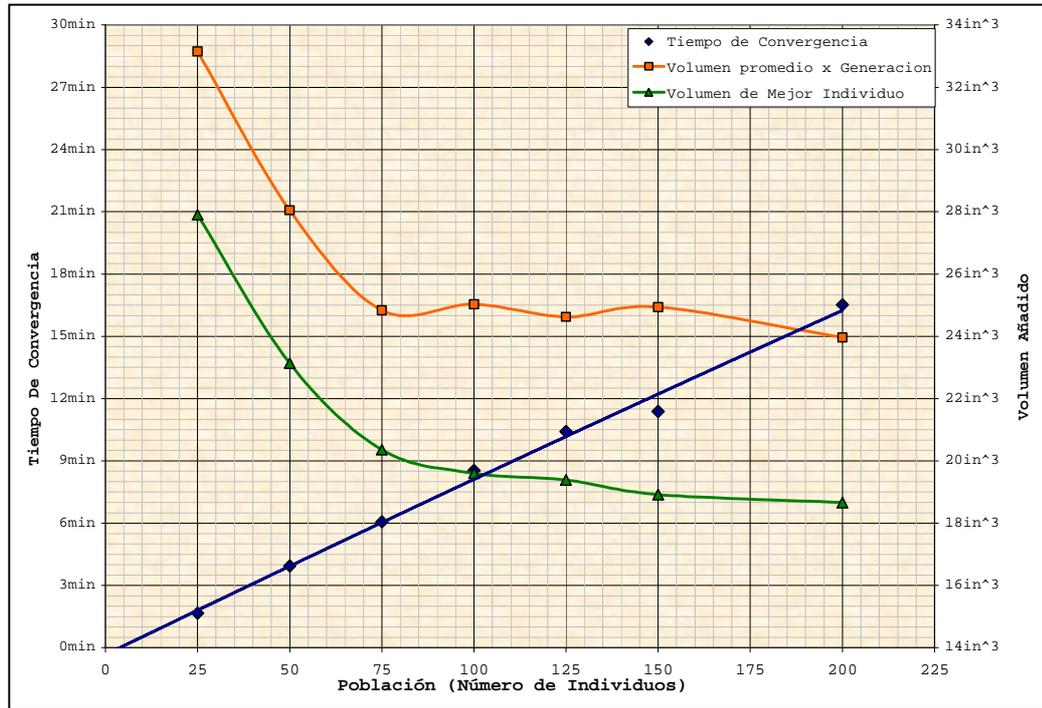


Figura 5-6 Resultados de Punto Único de Cruce

Como se puede observar, el tiempo de convergencia tiene un comportamiento lineal en función del número de individuos que forman la población. A su vez, se ve un poco impacto de incrementar el número de individuos de la población más allá de aproximadamente 100 individuos, ya que el cambio refleja muy poca variación en el volumen añadido.

5.2.6 Cruce Variable Por Característica como Método Reproductivo

Contrario al Método de Cruce Único Aleatorio y a las técnicas descritas en la sección 2.6 "Reproducción", el método propuesto de cruce variable por característica con

Como se muestra en la Tabla 5-3, el fenotipo de los nuevos individuos puede ser un número intermedio de tornillos al número de los padres en 40% de los casos, igual al de los padres en un 40%, y menor o mayor al de los padres en un 20%.

Recordando que para el método de cruce único, sólo existía un 13% de probabilidad que el punto de cruce estuviera en el esquema de cantidad de tornillos, el resultado es contrastante: Mientras que para el método de cruce por característica hay un 40% de tener una cantidad de tornillos entre el número de los padres, este porcentaje baja hasta un 5% para el método de cruce único.

Similar a lo llevado a cabo anteriormente, se evaluó este punto de cruce con el algoritmo genético propuesto para el caso de estudio y se evaluó 100 veces para distintas poblaciones (25, 50, 75, 100, 125, 150 y 200 individuos). A su vez, se calculó el tiempo promedio de cómputo, el volumen promedio agregado por la población y el volumen agregado por el mejor individuo de la población al momento de cumplirse el criterio de convergencia.

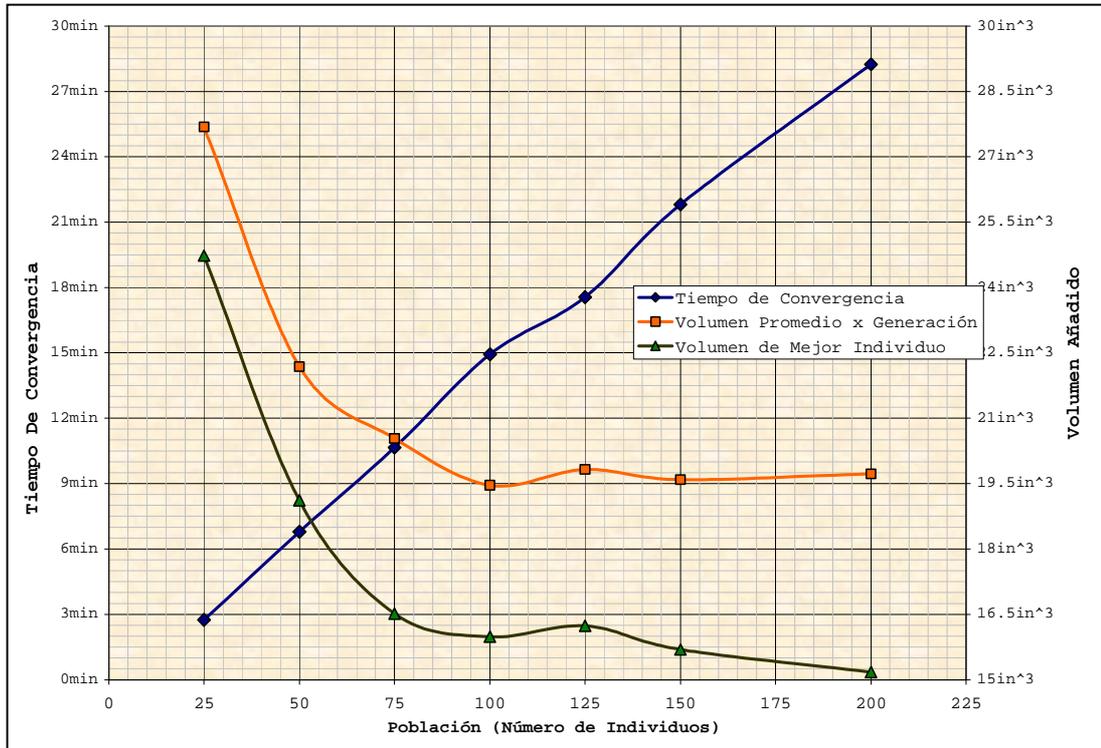


Figura 5-8 Resultados de Punto Variable de Cruce por Característica

Comparando los resultados de la Figura 5-6 con los de la Figura 5-8, se muestra la misma tendencia pero con menor volumen añadido a un número menor de individuos. Así mismo se observa un incremento de aproximadamente el 80% en tiempo de cómputo (Figura 5-9). Este incremento se explica bajo el hecho de que el método de cruce por característica rompe con cada cadena que forma una característica, por lo que, a pesar de dar diversidad nuevamente al algoritmo (aparte de la creada en la primera generación), los nuevos individuos tenderán a no cumplir los requisitos de diseño.

Sin embargo, a pesar el efecto negativo del incremento en tiempo de cómputo, la diversidad en los nuevos individuos

tiene un impacto considerable en la optimización del volumen añadido. Como se muestra en la Figura 5-10, la técnica de cruce por característica logra mejores resultados que la de cruce único. Como también se muestra en la Figura 5-10, la diferencia entre estos dos métodos tiende a descender conforme se incrementa el número de individuos en la población, sin embargo, esta diferencia tiende a descender de una manera muy gradual y se esperarían los mismos resultados entre los dos métodos en poblaciones lo suficientemente grandes como para que una gran mayoría de combinaciones fueran representadas en una población inicial diversa, precisamente esa diversidad que falta en el método de cruce único en poblaciones pequeñas.

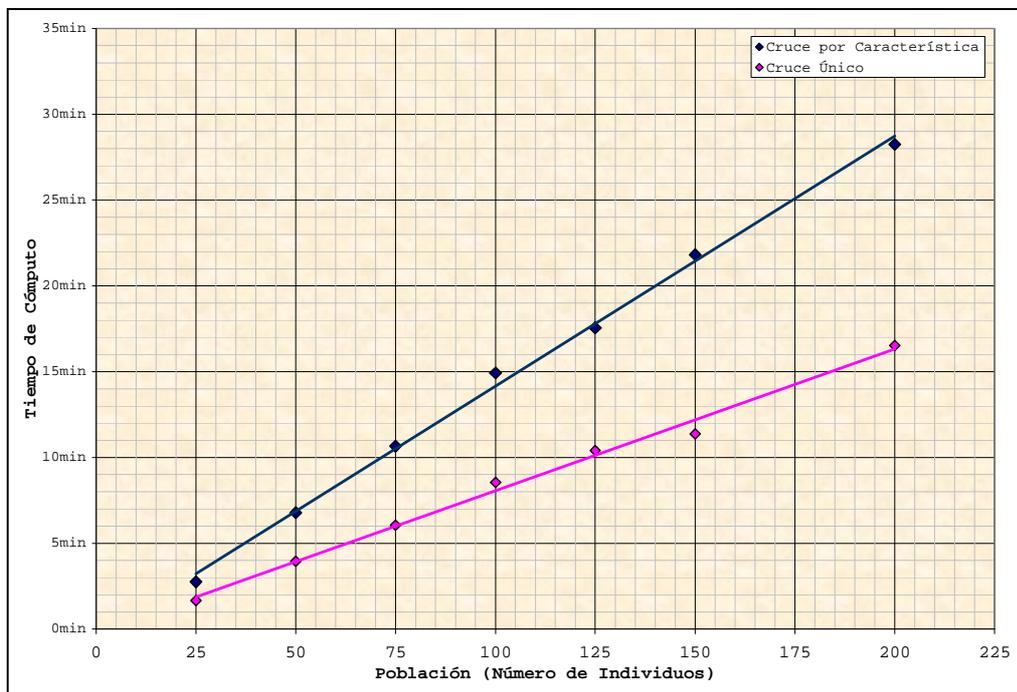


Figura 5-9 Diferencia en Tiempo de Cómputo

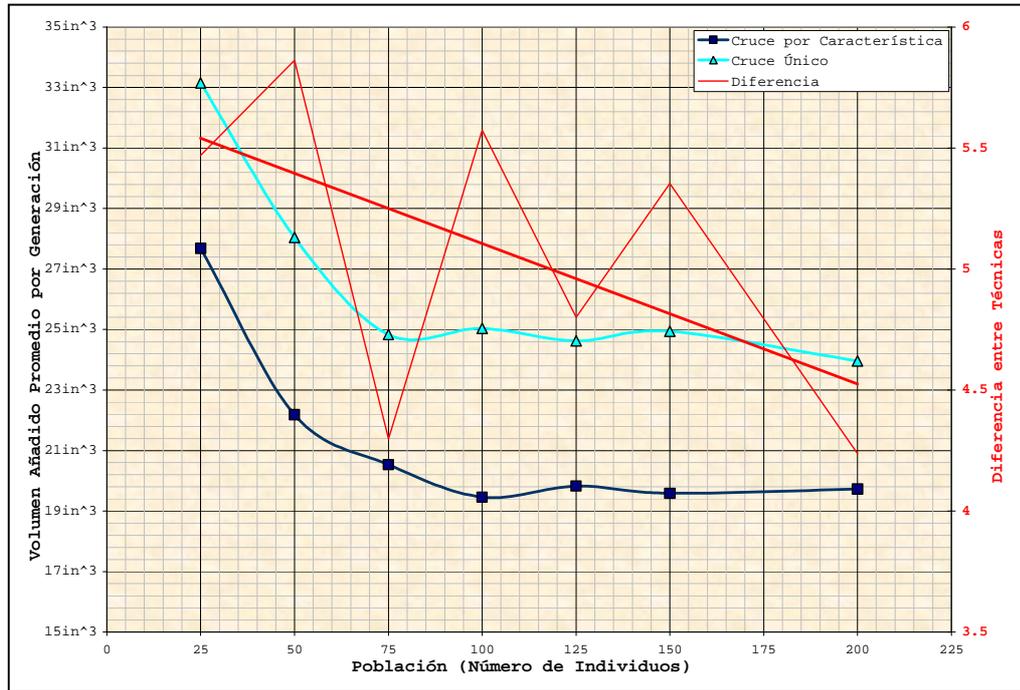


Figura 5-10 Comparación de Métodos - Volumen Añadido por Población

5.2.7 Mutación Selectiva

Se trabajó con distintos valores para mutación, en el rango de 0% hasta 5% de índice de mutación, el cual representa el número de genes seleccionados aleatoriamente entre todos los genes de la población que cambian su valor binario de 1 a 0 o de 0 a 1. Una vez que se efectúa la mutación, se hace una evaluación del individuo para verificar que este siga cumpliendo los requisitos de diseño, de ahí que sea una mutación selectiva.

Sin embargo, a pesar de llegar a valores de hasta 5% (los valores recomendados en la literatura no pasan del 1%) no

se detectó impacto alguno en la calidad de los resultados. Nuevamente se tuvo el mismo efecto que durante la etapa de reproducción en donde, por efecto de lo sobre restringido del sistema, pocas mutaciones son realmente efectivas, por lo que estas no cambian el resultado de la convergencia.

5.3 Evolución del Algoritmo

5.3.1 Evolución General del Diseño

Para mostrar gráficamente el comportamiento del algoritmo, se desarrolló un módulo de dibujo paramétrico en el programa Mathematica el cual lee el genoma ya sea del individuo mejor evaluado o de la media de la población y genera gráficamente la sección transversal de la junta, así como un segmento de 7 tornillos en la junta.

En la Figura 5-11 se muestra el comportamiento de la media de la población para la primera corrida mostrada en la Figura 5-3. Como se puede observar existe una clara disminución gradual de los espesores y del tamaño del tornillo seleccionado, en donde en la primer generación se ve un diseño conservadoramente robusto, hasta la última en donde se muestran diseños más esbeltos.

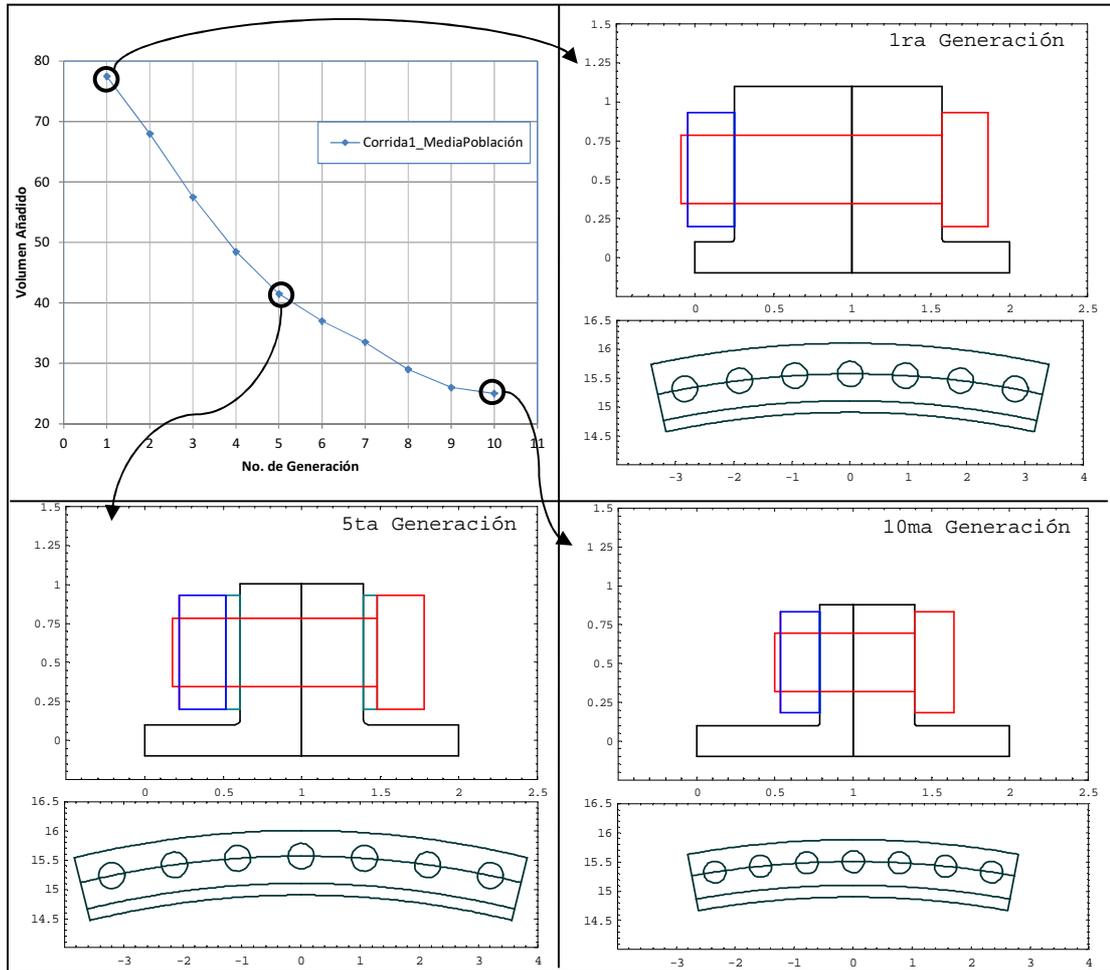


Figura 5-11 Evolución Geométrica de la Población

En la siguiente figura se muestran los resultados del mismo análisis pero para el individuo mejor evaluado de la generación. En esta se muestra un comportamiento más drástico que al de la media de la población, ya que el cambio de un diseño conservadoramente robusto a uno esbelto se logra en las primeras 3 generaciones. Nuevamente cabe resaltar la similitud de las soluciones entre la media de la población y el individuo mejor evaluado al momento de convergencia.

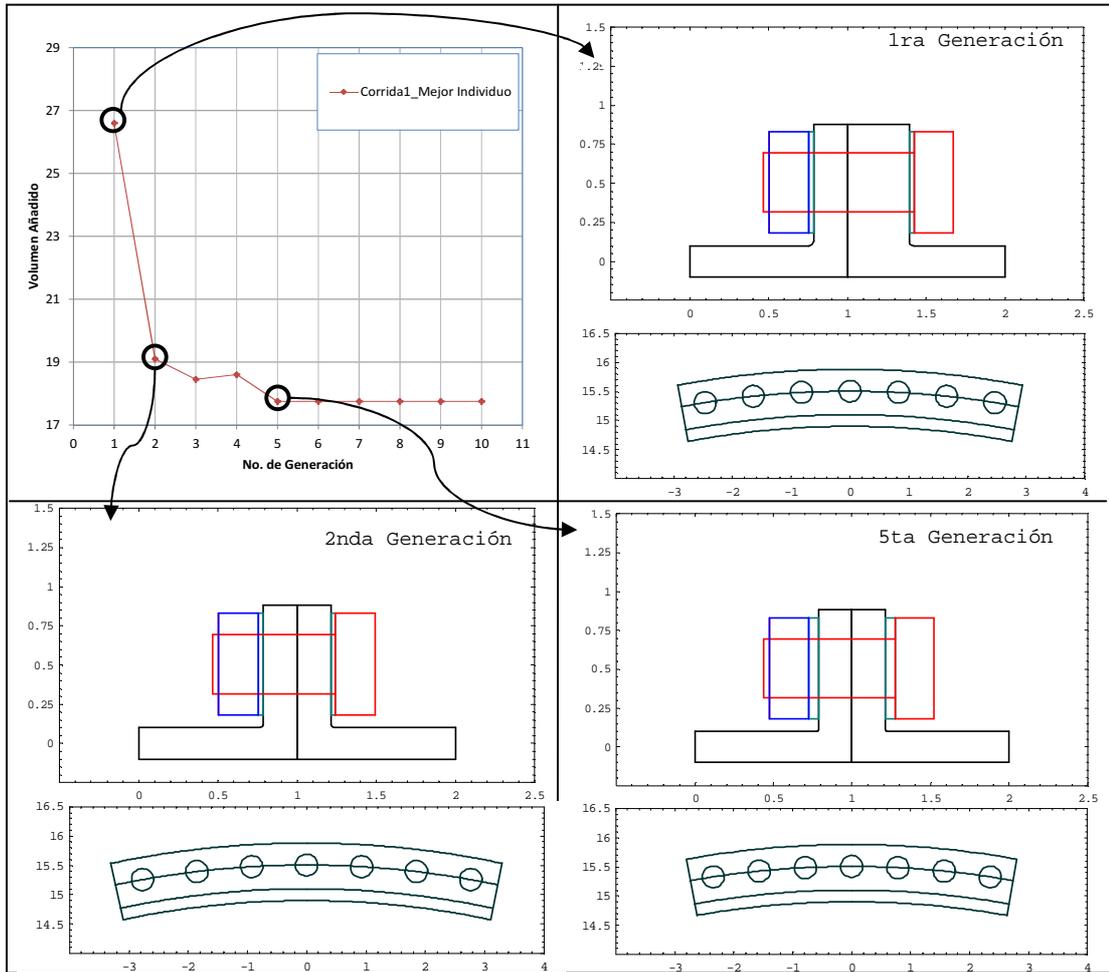


Figura 5-12 Evolución Geométrica del Mejor Individuo

5.3.2 Evolución del Tipo de Tornillo

Una de las variables que más impactan el diseño de la junta es el tipo de tornillos requeridos. En la Figura 5-13 se muestra el comportamiento típico de cómo este parámetro se comporta en la población a lo largo de las generaciones. Como puede observarse, en la primera generación se tiene un comportamiento dividido entre tornillos de 3/8" y,

ligeramente mayor representada en la población, de 7/16". Conforme el algoritmo avanza se ve una gradual pero constante disminución en la opción de 7/16" favoreciendo la opción de 3/8". Se puede notar también que el 100% de la población la constituyen sólo este par de opciones, demostrando que tanto tornillos menores a 3/8" como mayores a 7/16" no producen diseños válidos que cumplan los requerimientos de diseño dentro de los valores frontera definidos por el usuario. El valor encontrado para este parámetro en el genoma del individuo mejor evaluado fue de tornillos de 3/8", como se puede observar, desde la 10ma generación, el 100% de la generación comparte el tipo de tornillos con el individuo mejor evaluado.

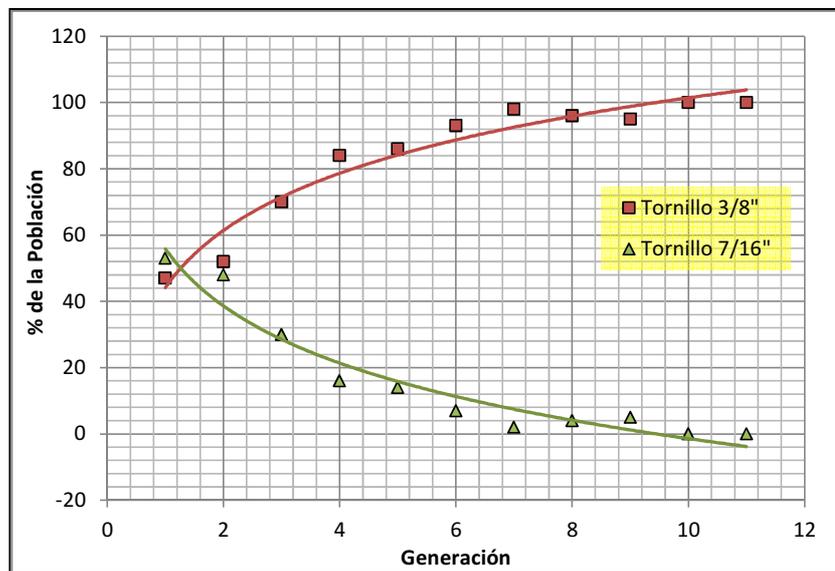


Figura 5-13 Evolución del Tipo de Tornillos

5.3.3 Evolución del Cantidad de Tornillos

En cuanto a la cantidad de tornillos, la Figura 5-14 muestra que, a la par que el tipo de tornillos va convergiendo a valores de 3/8", el número de tornillos necesario va en aumento, lo que indica que un diseño optimizado al volumen añadido corresponde a tornillos de menor dimensión, aunque su número sea extenso. Claro que esto aplica hasta el punto en que, por su proximidad, el diseño no permita tornillos tan próximos que impidan su ensamble. El valor encontrado en el genoma del individuo mejor evaluado corresponde a 124 tornillos, mientras que la media al final de la convergencia fue de aproximadamente 119 tornillos lo que representa una aproximación del 96%

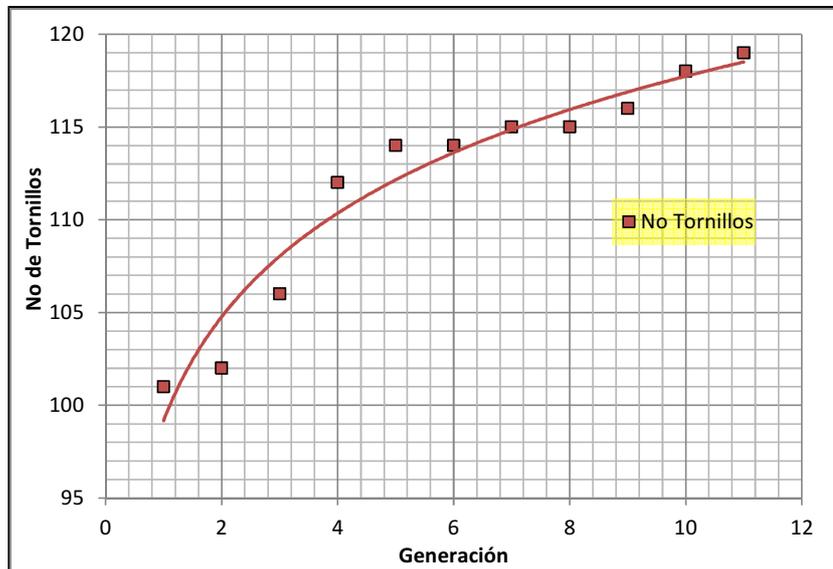


Figura 5-14 Evolución del Número de Tornillos

5.3.4 Espesores de las Bridas

La Figura 5-15 muestra los comportamientos típicos de la convergencia de los espesores de las bridas. Llama la atención que, aún que la junta es simétrica y hecha del mismo material, una de ellas muestre continuamente espesores mayores comparado con la otra. En este caso se muestra una brida izquierda más robusta que la derecha, sin embargo, el comportamiento fue similar en distintas corridas. El valor del mejor individuo correspondió al comportamiento esperado de espesores iguales para las dos bridas, el cual fue de 0.2145". Como se puede observar al final de la convergencia, la brida derecha con un espesor de aproximadamente 0.22" representa un 2.5% más que el valor óptimo, mientras que la brida izquierda, con un valor aproximado de 0.26", un 21% más que el valor óptimo.

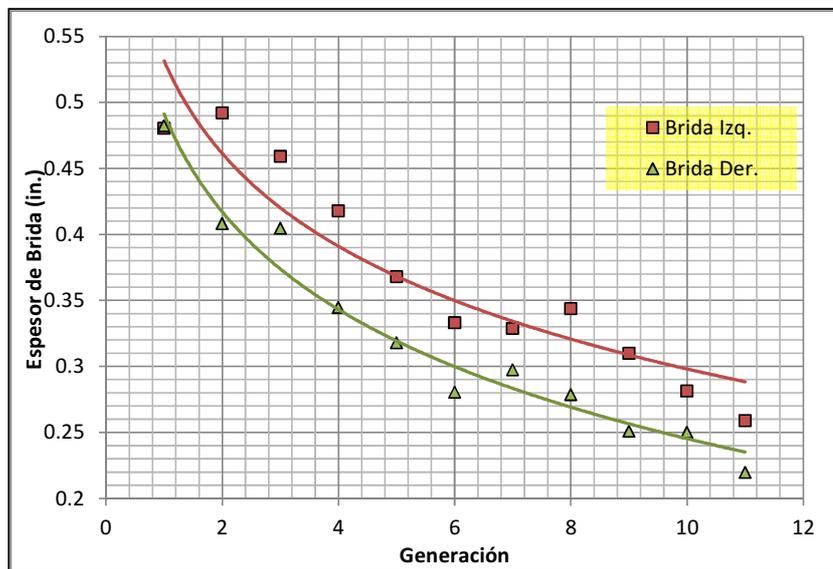


Figura 5-15 Evolución del Espesor de las Bridas

5.3.5 Torque Aplicado

En la Figura 5-16 se muestra el comportamiento del torque aplicado. Como se recordará, los valores para el torque se definieron para el torque corresponden a aquellos que logren una precarga de 30, 50, 60 o 90% del esfuerzo de cedencia en el cuerpo del tornillo (Sección 4.2.8). Se puede observar que, al igual que en la evolución del tipo de tornillos, conforme se opta por tornillos de 3/8" sobre los de 7/16", el porcentaje promedio de torque va aumentando paulatinamente hasta estabilizarse después de la 5ta generación. El valor del individuo mejor evaluado corresponde al 90% de esfuerzo de cedencia como valor de precarga.

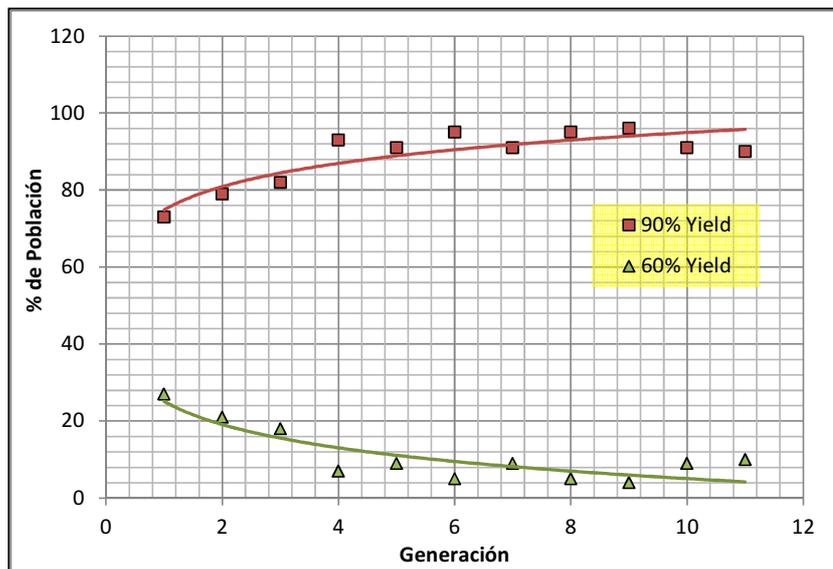


Figura 5-16 Evolución del Torque Aplicado

5.4 Comparación de Resultados del AG contra Método Tradicional

El mismo caso de estudio fue además analizado y optimizado por un diseñador calificado utilizando el método de diseño convencional. Después de múltiples iteraciones y aproximadamente 5 horas se logró el primer diseño válido, lo cual indica un conjunto de parámetros que forman un diseño geoméricamente válido y que cumple con todos los requerimientos de diseño. Esto sin contar el tiempo necesario para crear una hoja de cálculo conteniendo los parámetros de entrada, ecuaciones de diseño y cálculo de márgenes de seguridad y el tiempo necesario para instruir a un ingeniero en el cálculo de juntas atornilladas.

Después de aproximadamente 3 horas adicionales se logró un diseño optimizado que añadió 58 pulgadas cúbicas de material. Esto contrasta con los resultados mostrados anteriormente ya que con un algoritmo cuya población consiste en 100 individuos y el método de cruce por característica, se logró la convergencia en 15 minutos (Figura 5-9) con un volumen añadido de 19.4 pulgadas cúbicas (Figura 5-10).

El resultado es contrastante, mientras que el método tradicional requiere un 3100% extra de tiempo ($8 \times 60 / 15 - 1 = 31$) para lograr un diseño optimizado, la calidad de este difiere notablemente con la alcanzada por los algoritmos genéticos, ya que representa un 200% más de volumen. Estos

resultados permiten constatar la viabilidad que los algoritmos genéticos pueden presentar en campos restringidos, como el caso de estudio seleccionado.

6. CONCLUSIONES

La situación actual de la industria aeroespacial, en la cual los altos precios de combustibles, requerimientos de diseño cada vez más estrictos, competencia mercantil intensa, incrementos en precios de manufactura y nuevos materiales más costosos juegan un rol sustancial en el diseño de aviones y motores, requiere de técnicas novedosas de optimización que puedan ser aplicadas en etapas tempranas del diseño.

A pesar de que ha habido distintos esfuerzos para aplicar las técnicas evolutivas computacionales en el diseño de componentes aeroespaciales, estas técnicas son más exploradas desde un punto de vista científico y no tecnológico a pesar de mostrar un potencial enorme en la industria.

Como se mostró en el capítulo 4 y confirmando la hipótesis de este trabajo, la aplicación de los algoritmos genéticos como técnica cognoscitiva para la optimización de elementos estructurales es viable aún a pesar de tener una gran cantidad de requerimientos y necesitar de genomas extensos para el correcto modelado del diseño. Esta viabilidad queda demostrada al comparar los resultados en calidad al lograr diseños más ligeros en sólo una fracción del tiempo comparado con los métodos tradicionales de diseño.

Sin embargo, las técnicas tradicionales mostradas en la mayoría de las publicaciones científicas no son 100% aplicables a casos de estudios sobre-restringidos y es necesario adaptar la información existente en la literatura y en algunos casos crear procesos nuevos.

Como ejemplo de esta adaptación de las técnicas existentes se puede citar el método de reproducción explorado. Mientras que la aplicación directa de los métodos en la literatura no mostró resultados satisfactorios, la modificación de estos a puntos de cruce variables por característica y reproducción selectiva logró un algoritmo robusto que, a pesar de su limitado campo de búsqueda, logra convergencias tempranas con precisiones mayores a las logradas por métodos tradicionales.

Otro ejemplo fue la introducción del método de elitismo, el cual elimina cualquier diseño del algoritmo no importa en qué generación se llegue a dar. Como se mostró en los resultados, este elitismo generó que el algoritmo necesitara gran cantidad de recursos e iteraciones para lograr la primera generación, sin embargo, una vez que la primera generación fue creada, el tiempo de cómputo en las siguientes generaciones fue mucho más corto.

En cuanto a los resultados comparados con los métodos tradicionales, estos muestran resultados claramente promisorios al encontrar diseños que reducen el peso del

sistema en solamente fracciones del tiempo necesario por un diseñador. Sin embargo, hay que aclarar que el algoritmo genético propuesto no trabaja al 100% por sí mismo y el juicio de ingeniería es determinante, ya que se requiere de un conocimiento del diseñador sobre los parámetros aproximados del diseño. Esto debido a que parte de las variables a calcular, como son los espesores de las bridas y el torque aplicado, son optimizadas entre campos de búsqueda dados por el usuario.

Otra potencial desventaja de los algoritmos genéticos es que trabajan en intervalos discretos definidos por la cantidad de genes asociada a cada fenotipo. Por ejemplo, con un genotipo de 4 genes asociado al espesor de una brida, los intervalos entre el espacio de búsqueda serán $2^4=16$, así que si el intervalo de búsqueda es demasiado grande, el espacio entre los intervalos también lo será.

Este inconveniente puede disminuirse al correr el algoritmo de forma escalonada, en la cual en un primer paso se corre bajo un intervalo relativamente grande, y una vez lograda la convergencia, se definen nuevamente los intervalos para una segunda corrida en función de los resultados de la primer corrida.

A forma de resumen, se mencionan a continuación las aportaciones logradas por el presente trabajo:

- En la búsqueda de trabajo del arte, aunque las técnicas cognoscitivas han sido utilizadas para la optimización aerodinámica de un avión, sólo se encontró un trabajo de optimización estructural, que fue el trabajo exhaustivo del Dr. Xie y su grupo de investigación al diseñar los espesores de un Ala de Avión (Ref. 11). El presente trabajo muestra una investigación tecnológica en un campo prácticamente virgen.
- Se logró una Aplicación de un algoritmo evolutivo computacional usando Algoritmos Genéticos enfocado a resolver el problema de optimización de un sistema altamente restringido usando un genoma en la población adecuada a los parámetros de diseño. Este algoritmo fue diseñando utilizando funciones de elitismo, reproducciones de cruce múltiple y funciones selectivas de reproducción.
- Este algoritmo fue adaptado exitosamente en la optimización estructural de partes aeroespaciales considerando el procedimiento de diseño que enfrentan los diseñadores de una compañía comercial.
- La aplicación cognoscitiva se utilizó con los mismos parámetros de diseño de un procedimiento estructurado. Sus resultados, tanto en tiempo y calidad de optimización, son superiores a las que se obtienen regularmente por un diseñador experimentado.

Los resultados obtenidos en este trabajo han sido publicados en la revista internacional arbitrada "International Journal of Mechanical Engineering Research" [Ref. 46].

7. TRABAJO FUTURO

A pesar de los resultados positivos presentados en este trabajo en un caso de estudio de la industria aeroespacial, aún existe mucho camino por recorrer para llegar a una optimización que cumpla con todas las regulaciones de esta industria ya que, dependiendo de la zona en que se encuentre la junta atornillada (o cualquier otro componente estructural), habrá otros factores que entren en juego para la definición del diseño, como lo son el análisis de pandeo, efectos térmicos, tolerancia al daño, fatiga, vibraciones, capacidad de contención de impacto y otros requerimientos no incluidos en este trabajo.

Otro tipo de restricción no incluida en el presente trabajo corresponde al efecto multidisciplinario del diseño. Por ejemplo, la junta atornillada analizada en este trabajo fue optimizada desde el punto de vista únicamente estructural, sin embargo, frecuentemente estas tienen que ser rediseñadas localmente para dar paso a funciones de otros componentes, como pudiera ser dejar espacio suficiente para el sistema anti-hielo de la carcasa frontal del motor.

El presente trabajo da pie para seguir explorando las técnicas cognoscitivas incorporando el efecto multidisciplinario del diseño y multiobjetivo (por ejemplo optimizar bajo una relación peso/costo).

A su vez es posible explorar la adaptabilidad de estos métodos incluyendo funciones evaluadores más complejas, por ejemplo en lugar modelar la evaluación de los diseños por medio de ecuaciones, utilizar métodos complejos como los elementos finitos, lo cual requeriría de una interacción entre el algoritmo y la paquetería de análisis para, iterativamente, evaluar los diseños comprendidos en las distintas generaciones.

Mientras que el presente trabajo adoptó el caso de estudio de una junta atornillada por considerarse un ejemplo complejo de diseño pero que se repite a lo largo de toda la turbina, existen otros casos que presentan el mismo nivel de reto a la viabilidad de estas técnicas, como lo pueden ser, en el caso de los aviones, el diseño de paneles, elementos rigidizantes como marcos y largueros para el fuselaje y el ala.

8. REFERENCIAS

- Ref. 1 Federal Aviation Regulations FAR- Title 14 Aeronautics and Space - Part 33 Airworthiness Standards: Aircraft Engines; Federal Aviation Administration (FAA]
- Ref. 2 Joint Aviation Regulations JAR- Part 25 Large Aeroplanes -; Joint Aviation Authorities.
- Ref. 3 Canadian Aviation Regulations CAR; Transport Canada
- Ref. 4 Reglamentos Brasileños de Aviación Civil RBAC; Agencia Nacional de Aviación Civil, Brasil
- Ref. 5 Michael Chung-Yung Niu, (1989). Airframe Structural Design. Comilit Press Ltd.
- Ref. 6 Haupt, Randy y Sue Ellen Haupt (1998). Practical Genetic Algorithms. John Wiley & Sons.
- Ref. 7 Renner G.1; Ekart A.(2003), "Genetic algorithms in computer aided design", Computer-Aided Design, Volume 35, Number 8, , pp. 709-726
- Ref. 8 Wang, S.Y., Tai, K. and Wang, M.Y. (2006) "An Enhanced Genetic Algorithm for Structural Topology Optimization", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.65, No.1, pp.18-44
- Ref. 9 Yoshida, Shigeo (2006) "Wind Turbine Tower Optimization Method Using a Genetic Algorithm",

- Wind Engineering, Volume 30, Number 6, pp. 453-469
- Ref. 10 Murray B. Anderson, "Genetic Algorithms in Aerospace Design, Substantial Progress, Tremendous Potential"; RTV AVT Course on Intelligent Systems for Aeronautics, 2002
- Ref. 11 "Aircraft Wing Design Automation with ESO and GESO"; Algis Lencus, Osvaldo Querin, Grant Steven y Y.M. Xie, International Journal of Vehicle Design, Vol 28 No 3, 2001
- Ref. 12 "Conceptual Aircraft Design - A Genetic Search and Optimization Approach"; Nicholas Ali, Kamran Behdinan, ICAS 2002 Congress
- Ref. 13 "Parametric Study of a Genetic Algorithm using an Aircraft Design Optimization Problem"; Andre C. Marta, 2003.
- Ref. 14 Rechenberg I. (1965) "Cybernetic Solution Path of an Experimental Problem". Ministry of Aviation, Royal Aircraft Establishment (U.K.)
- Ref. 15 Fogel D. B., Owens A. J., Walsh M. J. (1966) "Artificial Intelligence through Simulated Evolution". Ed Wiley.
- Ref. 16 Holland, J. H. (1975), "Adaptation in Natural and Artificial Systems". University of Michigan Press. Second Edition MIT Press, 1992
- Ref. 17 D. E. Goldberg (1989); ".Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning". Ed. Addison-Wesley.s

- Ref. 18 James Baker (1987); "Reducing bias and Inefficiency in the Selection Algorithm". Ed. Grefenstette, Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications.
- Ref. 19 Melanie Mitchell (1998); "An Introduction to Genetic Algorithms". MIT Press.
- Ref. 20 Goldberg, D. E. (1989); "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning". Addison Wesley Longman Press.
- Ref. 21 Whitley D. (2002); "Genetic Algorithms and Evolutionary Computing". Van Nostrand's Scientific Encyclopedia.
- Ref. 22 Whitley D. (2001); "An Overview of Evolutionary Algorithms, Practical Issues and Common Pitfalls". Journal of Information and Software Technology.
- Ref. 23 Sivanandam S. N., Deepa S. N. (2008); "Introduction to genetic Algorithms". Springer Press.
- Ref. 24 John H. Bickford (2008); "An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints"; IV Edition; CRC Press.
- Ref. 25 C. Junker, J. Newnham (1998); "Sistematic Calculation of High Duty Bolted Joints with one Cylindrical Bolt"; Verein Deutscher Ingenieure VDI2 230.

- Ref. 26 G. Meyer, D. Strelow (1972); "Simple diagrams Aid in Analyzing Forces in Bolted Joints"; Assembly Engineering, January 1972.
- Ref. 27 G. L. Kulak, J. W. Fischer, J. H. A. Struik (1972); "Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints"; 2nd Edition, AISC Press, 2001.
- Ref. 28 Code of Federal Regulations - Title 14 Aeronautics and Space - Part 33 Airworthiness Standards: Aircraft Engines; Federal Aviation Administration (FAA) [2012]
- Ref. 29 ANSI B18.2.1-1981; "Square and Hex Bolts and Screws (Inch Series)"; ASME Press.
- Ref. 30 ANSI B18.2.2-1987; "Square and Hex Nuts (Inch Series)"; ASME Press.
- Ref. 31 "Aeronautical Drafting Manual"; SAE Press.
- Ref. 32 R. P. Pohanish, C. J. McCauley; "Machinery's Handbook"; 2000 Industrial Press.
- Ref. 33 D. Whitley; "A Genetic Algorithm Tutorial"; 1994 Statistics and Computer Journal. 1994, Vol 4.
- Ref. 34 E. K. Burke, G. Kendall; "Search Methodologies, Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques"; Chapter 4 Genetic Algorithms, 2005 Ed Springer
- Ref. 35 G. Syswerda; "Uniform Crossover in Genetic Algorithms"; Proc. 3rd Int. Conference on Genetic Algorithms, 1989.

- Ref. 36 L. Davis; "Applying Algorithms to Epistatic Domains"; Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence. 1985.
- Ref. 37 J. M. Oliver, D. J. Smith, J. R. C. Holland; "A Study of Permutation Crossover Operators on the Traveling Salesman Problem"; Proc. 2nd Int. Joint Conf. on Genetic Algorithms. 1987.
- Ref. 38 A. Vicini, D. Quagliarella; "Inverse and Direct Airfoil Design Using a Multiobjective Genetic Algorithm"; AIAA Journal, Vol. 35, No. 9 (1997).
- Ref. 39 I. Kroo, S. Altus, R. Braun, P. Gage, I. Sobieski; "Multidisciplinary Optimization Methods for Aircraft Preliminary Design"; NASA Langley Technical Report Server . 1994.
- Ref. 40 B R. Jones, W A. Crossley, A S. Lyrintzis. "Aerodynamic and Aeroacoustic Optimization of Rotorcraft Airfoils via a Parallel Genetic Algorithm", Journal of Aircraft, Vol. 37, No. 6 (2000).
- Ref. 41 H. Xiao-Bing, E. Di Paolo. " Binary-Representation-Based Genetic Algorithm for Aircraft Arrival Sequencing and Scheduling", Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on (Volume:9 , Issue: 2) (2008).
- Ref. 42 A. Bolat; "Models and a Genetic Algorithm for a Static Aircraft Gate Assignment Problem", The Journal of the Operational Research Society (2001).

- Ref. 43 J. Lee, P. Hajela; "Parallel genetic algorithm implementation in multidisciplinary rotor blade design", Journal of Aircraft, Vol. 33, No. 5 (1996)
- Ref. 44 B. Pesic , N. Durand , JM. Alliot; "Parallel genetic algorithm implementation in multidisciplinary rotor blade design", Journal of Aircraft, Vol. 33, No. 5 (1996)
- Ref. 45 "Genetic Algorithm Library"; Mathematica - Wolfram, <http://library.wolfram.com/>
- Ref. 46 J.C. Barbosa, S.D. Santillan, F. Velazquez; "Optimization of Bolted Joints for Aircraft Engine using Genetic Algorithms", International Journal of Modern Engineering Research, Vol 4. Iss. 5, Mayo 2014