



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TÍTULO:

DISEÑO A FLEXOCOMPRESIÓN BIAIXIAL DE COLUMNAS DE ACERO RELLENAS DE HORMIGÓN BASADO EN LA NORMATIVA DEL AISC UTILIZANDO EL MÉTODO DEL LRFD CON LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS.

AUTORES:

Andrés Stalin Donoso Gómez

Stalin Vicente Parreño Quisnancela

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Javier Palacios.

2013

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de título: **“DISEÑO A FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL DE COLUMNAS DE ACERO RELLENAS DE HORMIGON BASADO EN LA NORMATIVA DEL AISC APLICANDO EL MÉTODO DEL LRFD CON LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS”**, presentando por: Andrés Stalin Donoso Gómez, Stalin Vicente Parreño Quisnancela y dirigida por: Ing. Javier Palacios.

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final de investigación con fines de graduación escrito en la cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la UNACH.

Para constancia de lo expuesto firman:

Ing. Ángel Paredes.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Firma

Ing. Javier Palacios

DIRECTOR DEL PROYECTO

Firma

Ing. Diego Barahona

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Firma

**AUTORÍA DE LA
INVESTIGACIÓN**

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Graduación, nos corresponde exclusivamente a: Andrés Stalin Donoso Gómez, Stalin Vicente Parreño Quisnancela y del Director del Proyecto: Ing. Javier Palacios y el patrimonio intelectual a la Universidad Nacional de Chimborazo

”.

AGRADECIMIENTO.

A nuestro Dios por permitirnos cumplir con esta meta, a los docentes de la escuela de Ingeniería Civil de la UNACH por compartir sus conocimientos, a los miembros de nuestro tribunal: Ing. Javier Palacios, Ing. Diego Barahona, Ing. Ángel Paredes, por la guía en este proyecto, y un agradecimiento especial al Ing. Edison Tapia por su colaboración y tiempo entregado a esta investigación.

DEDICATORIA

A mi Dios mi guía y fortaleza, que me permite disfrutar de sus bendiciones, gracias por tu amor Papá Dios. A mis amados padres que han dejado su esfuerzo plasmado en mí, gracias por darme la vida, ayudarme y cuidarme siempre, para ellos va este logro. A la alegría de mi vida Laurita Pino gracias por compartir tu vida conmigo, a Stalin Parreño gracias pana por tu tiempo y paciencia, y a todos mis amigos que se han convertido en una familia grande y han estado pendientes de la culminación de este proyecto.

Andrés Stalin Donoso Gómez.

DEDICATORIA

A Dios por tenerme con vida, a la memoria de mi Abuelito Jesús Quisnancela que desde el cielo me brinda sus bendiciones, a mi padre Vicente Parreño y a toda mi familia, a Andrés Donoso que fue con quien empezamos y logramos culminar esta meta y a todos mis amigos, pero principalmente a mi madre Luz Quisnancela quien es la persona que me dio la vida, la sabiduría, la fortaleza para llegar a cumplir este sueño que hoy es realidad, este triunfo es tuyo madre querida, felicidades.

Stalin Vicente Parreño Quisnancela.

2.3	COLUMNAS RELLENAS DE HORMIGÓN.	32
2.3.1.1	PANDEO LOCAL DE ELEMENTOS DE ACERO.	34
2.3.1.2	LIMITACIONES DE ACUERDO AL LRFD.	35
2.3.1.3	RESISTENCIA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL FRENTE A CARGAS AXIALES CONFORME AL LRFD.	36
2.3.1.4	ESBELTEZ DE LA COLUMNA COMPUESTA CONFORME AL LRFD	37
2.3.1.5	RESISTENCIA A PANDEO DE UNA PIEZA COMPRIMIDA CONFORME AL LRFD.	38
2.3.1.5.1	FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL DE ACUERDO AL LRFD.	39
2.4	ALGORITMOS GENÉTICOS (AG)	41
2.4.1	INTRODUCCIÓN A LOS AG.	41
2.4.2	DEFINICIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS (AG)	42
2.4.3	ALGORITMOS GENÉTICOS EN LA OPTIMIZACIÓN	43
2.4.4	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS AG	44
2.4.5	LIMITACIONES DE LOS AG	44
2.4.6	CONDICIONES PARA LA APLICACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO.	45
2.4.7	MARCO DE DESARROLLO DE LOS AG.....	46
2.4.8	COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN	48
2.4.8.1	ALGORITMOS GENÉTICOS Y MÉTODOS ENUMERATIVOS	48
2.4.8.2	ALGORITMOS GENÉTICOS Y SISTEMAS EXPERTOS	49
2.4.8.3	ALGORITMOS GENÉTICOS Y REDES NEURONALES	49
2.4.8.4	EL ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE	51
2.4.8.4.1	CODIFICACIÓN	52
2.4.8.4.2	POBLACIÓN	55
2.4.8.4.2.1	TAMAÑO DE LA POBLACIÓN	55
2.4.8.4.2.2	POBLACIÓN INICIAL	56
2.4.8.4.3	FUNCIÓN OBJETIVO.....	56
2.4.8.4.4	SELECCIÓN	58
2.4.8.4.5	CRUCE.....	59
2.4.8.4.6	MUTACIÓN	60
CAPÍTULO III	62
3	MARCO METODOLÓGICO	62
3.1	SISTEMATIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA A EMPLEARSE.....	62

3.1.1 ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL MÉTODO DE DISEÑO DE COLUMNAS MIXTAS SOMETIDAS A FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL, CONDICIONES DE DISEÑO Y ECUACIONES.	62
3.1.2 INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE ALGORITMO GENÉTICO.....	63
3.1.3 DETERMINACIÓN DE VARIABLES DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE COLUMNAS MIXTAS SOMETIDAS A FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL.	63
3.1.4 DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO DEL ALGORITMO GENÉTICO DIRIGIDA AL DISEÑO DE COLUMNAS MIXTAS SOMETIDAS A FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL.	63
3.1.5 ESTABLECER LIMITACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE COLUMNAS MIXTAS.....	64
3.1.6 FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO QUE RIGE EL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE COLUMNAS MIXTAS.	64
3.3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	78
3.4 OPERACIONALIZACION DE VARIABLES.....	79
3.5 HIPÓTESIS.....	80
3.5.1. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.....	80
3.5.1.1. VARIABLE INDEPENDIENTE:.....	80
3.5.1.2 VARIABLE DEPENDIENTE:.....	80
3.6.- PROCEDIMIENTOS.....	80
3.6.1 PLANTEAMIENTO DE LOS EJERCICIOS DE DISEÑO A FLEXOCOMPRESION DE LAS COLUMNAS MIXTAS DE ACERO RELLENAS DE HORMIGÓN.	81
3.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS.....	86
3.7.1 DISEÑO A FLEXOCOMPRESION BIAxIAL DE COLUMNAS MIXTAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENETICOS.	86
3.7.1.1 EXPLICACIÓN GLOBAL DEL PROCESO QUE SIGUE EL ALGORITMO GENÉTICO APLICADO AL DISEÑO A FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL DE COLUMNAS MIXTAS DE ACERO RELLENAS DE HORMIGÓN.....	86
3.7.1.2. EXPLICACIÓN PASO A PASO DEL PROCESO QUE SIGUE EL ALGORITMO GENÉTICO APLICADO AL DISEÑO A FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL DE COLUMNAS MIXTAS DE ACERO RELLENAS DE HORMIGÓN. .	87
3.7.1.2.1. PROCESO 1.....	87
3.7.1.2.2. PROCESO 2.....	88
3.7.1.2.2.1 GENERAR LA POBLACIÓN INICIAL.....	90
3.7.1.2.2.2 CODIFICACIÓN DE INDIVIDUOS.....	93
3.7.1.2.2.3 GENERAR PAREJAS Y POSICIÓN DE CRUCE.....	96

3.7.1.2.2.4 ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN BINARIA.....	99
3.7.1.2.2.5 REALIZAR CRUCE DE INDIVIDUOS.....	100
3.7.1.2.2.6.-REALIZAR MUTACIÓN.....	103
3.7.1.2.2.7.- TRANSFORMAR DE BINARIO A DECIMAL	105
3.7.1.2.2.8.- EVALUAR LA FUNCIÓN DE APTITUD.....	109
3.7.1.2.2.9 REALIZAR SELECCIÓN DE INDIVIDUOS MEJOR ADAPTADOS ...	110
3.7.1.2.2.10.- PASAR LA POBLACIÓN SELECCIONADA COMO NUEVA POBLACIÓN.....	112
3.9 ANALISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS.....	116
CAPÍTULO IV	117
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	117
CAPITULO V.....	125
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	125
5.1 CONCLUSIONES.....	125
5.2 RECOMENDACIONES.....	127
CAPÍTULO VI	128
6 PROPUESTA.....	128
6.1 TÍTULO DE LA PROPUESTA	128
6.2 INTRODUCCIÓN.....	128
6.3 OBJETIVO GENERAL.....	128
6.3.1 GENERAL.....	128
6.3.2 ESPECÍFICOS.....	129
6.4 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA.....	129
6.4.1 PROGRAMA COMPUTACIONAL DEAC 1.0 PARA EL DISEÑO DE DISEÑO A FLEXOCOMPRESIÓN BIAXIAL DE COLUMNAS DE ACERO RELLENAS DE HORMIGÓN BASADO EN LA NORMATIVA DEL AISC APLICANDO EL MÉTODO DEL LRFD CON LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS.	129
6.4.1.1 PROCESO LÓGICO DEL SOFTWARE DEAC 1.0.....	130
6.4.2 ESTRUCTURACIÓN DEL SOFTWARE DEAC 1.0.....	131
6.4.2.1 PÁGINA DE CONTROL DE DATOS.....	132
6.4.2.2 PÁGINA ALGORITMO GENÉTICO	137
6.5 MONITOREO Y EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA	143
7 BIBLIOGRAFÍA	144
8 APÉNDICES Y ANEXOS.....	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Elemento a compresión.....	10
Figura 2 Hipérbola de Euler.....	11
Figura 3 Condiciones de vinculación del elemento.....	12
Figura4 Curva tensión de compresión – deformación.....	15
Figura 5 Pandeo local de la sección transversal.	16
Figura6 Elementos solicitados por flexión y carga axial de compresión.	22
Figura 7 Comportamiento de viga-columna, efecto P-d	23
Figura 8 Comportamiento de viga-columna, efecto P-d	23
Figura 9 Columna empotrada solicitada por carga axial y horizontal.....	25
Figura 10 Modelo para la evaluación de MNtMLt. a) Pórtico original; b) Pórtico sin desplazamientos laterales para MNt y c) Pórtico con desplazamientos y sin cargas verticales para MLt.	28
Figura 11 Modelo para evaluar $\Delta 0$ a) Columna que forma parte de un pórtico, b) y c) Modelos equivalentes.....	29
Figura 12 Columnas compuestas rellenas de hormigón.....	33
Figura 13 Secciones de acero rellenas de hormigón con nomenclatura de símbolos.....	34
Figura 14 Codificación de individuos en AG	46
Figura 15 Esquema de una red neuronal.....	50
Figura 16 Esquema de un algoritmo genético básico	52
Figura 17 Esquema de un cruce de un solo punto en un AG.....	54
Figura 18 Esquema de mutación de un individuo en AG.....	54
Figura 19 Diseño LRFD para columnas rectangulares mixtas de acero rellenas de hormigón sometidas a flexocompresión biaxial.....	66
Figura 20 Diseño LRFD para columnas circulares mixtas de acero rellenas de hormigón sometidas a flexocompresión biaxial.....	71
Figura 21 Esquema Del Diseño De La Investigación.	78

Figura 22 Modelo gráfico de cruce.	100
Figura 23 Esquema de mutación de los elementos de la posición 27 y 6 en la población de X1.	104
Figura 24 Esquema de mutación de los elementos de la posición 2 y 31 en la población de X2.	105
Figura 25 Esquema de mutación de los elementos de la posición 37 y 31 en la población de X3.	105
Figura 26 Comparación de carga axial ejercicio 1.	117
Figura 27 Comparación de carga axial ejercicio 2.....	118
Figura 28 Comparación de carga axial ejercicio 3.	118
Figura 29 Comparación de carga axial ejercicio 4.	119
Figura 30 Comparación de la ecuación de interacción ejercicio 1.....	119
Figura 31 Comparación de la ecuación de interacción ejercicio 3.	120
Figura 32 Comparación de métodos de diseño de columnas mixtas ejercicio 1.	121
Figura 33 Comparación de métodos de diseño de columnas mixtas ejercicio 3.	122
Figura 34 Proceso lógico del software DEAC 1.0.....	130
Figura 35 Pantalla principal del programa DEAC 1.0 Algoritmos Genéticos.....	131
Figura 36.-Grupo de Selección	132
Figura 37.-Página Control de Datos.....	132
Figura 38 Ajuste de secciones del perfil de acero rectangular.....	133
Figura 39 Ajuste de secciones del perfil de acero circular.....	133
Figura 40. Datos de costo de materiales.....	133
Figura 41.- Características de la estructura.....	134
Figura 42.- Datos de materiales utilizados.....	134
Figura 43.- Datos de cargas y momentos.....	135
Figura 44.- Armadura interna	135
Figura 45.- Generar.	136
Figura 46.- Visualización de resultados.....	136
Figura 47.-Página Algoritmo Genético.	137

Figura 48.- Ajuste del rango de generación de poblaciones rectangular	138
Figura 49- Ajuste del rango de generación de poblaciones circular.....	138
Figura 50.- Características de la estructura..	138
Figura 51.- Datos de materiales utilizados.	139
Figura 52.- Datos de cargas y momentos.	139
Figura 53.- Armadura interna.	140
Figura 54.- Relación base altura.	140
Figura 55.- Número de individuos.	141
Figura 56.- Porcentaje de mutación.	141
Figura 57.- Datos de costo de materiales.	141
Figura 58.- Botón Generar.	142
Figura 59.- Visualización de resultados.....	142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Condiciones de vinculación de los bordes.....	17
Tabla 2 Relación ancho/espesor limite λ_r , elementos rigidizados.....	18
Tabla 3 Valores de los coeficientes ψ y C_m	31
Tabla 4 Cuadro de Operacionalización de Variables.....	79
Tabla 5. Población inicial para x_1	90
Tabla 6. Población inicial para x_2	91
Tabla 7. Población inicial para x_3	92
Tabla 8. Población inicial x_1 transformada en binario.....	94
Tabla 9. Población inicial x_2 transformada en binario.....	95
Tabla 10. Población inicial x_3 transformada en binario.....	96
Tabla 11. Genotipo pareja y posición de cruce para x_1	97
Tabla 12. Genotipo pareja y posición de cruce para x_2	98
Tabla 13. Genotipo pareja y posición de cruce para x_3	99
Tabla 14. Generación de nuevos individuos mediante cruce para x_1	101
Tabla 15. Generación de nuevos individuos mediante cruce para x_2	102
Tabla 16. Generación de nuevos individuos mediante cruce para x_3	103
Tabla 17. Individuos después del proceso de mutación en binario y decimal para x_1	106
Tabla 18. Individuos después del proceso de mutación en binario y decimal para x_2	107
Tabla 19. Individuos después del proceso de mutación en binario y decimal para x_3	108
Tabla 20. Individuos mejor adaptados evaluados con la función objetivo.....	111
Tabla 21. Individuos de la tercera generación.....	113
Tabla 22. Individuos de la séptima generación.....	114
Tabla 23. Individuos de la novena generación.....	115

RESUMEN

El presente trabajo es una investigación de carácter teórico práctico, en la que se sistematiza el proceso de aplicación de un algoritmo genético en el diseño a flexocompresión biaxial de columnas mixtas de acero rellenas de hormigón, basado en la normativa del AISC-LRFD.

Se establecen los parámetros tanto de la técnica de algoritmos genéticos como el diseño de columnas mixtas, y de las dos en conjunto, obteniéndose como resultado un proceso de optimización.

Para la comprobación de la hipótesis, se analizan dos procesos; el primero en el cual se verifica la eficacia del diseño y en segundo lugar la eficiencia estructural y económica.

Se efectúa un análisis comparativo de los resultados generados por el software DEAG 1.0 creado como propuesta de esta investigación, entre el método de diseño de control tradicional con el diseño que aplica algoritmos genéticos, alcanzando un alto grado de eficiencia de esta técnica de optimización en los aspectos estructural y económico, consiguiendo como conclusión general que los algoritmos genéticos aplicados en forma adecuada al diseño AISC-LRFD de columnas mixtas, dan como resultado elementos óptimos de dimensiones económicas y que cumplen con la normativa establecida.

CAPÍTULO I

1 MARCO REFERENCIAL

1.1 INTRODUCCIÓN

La práctica del sistema de diseño estructural en la actualidad, en la mayor parte de calculistas está basado por lo general y principalmente en el cumplimiento de las normas establecidas por los códigos correspondientes, lo cual no significa que no exista un cierto criterio de economía y ciertos aspectos que tienen influencia directa en la mayor proporción de la experiencia individual, y tampoco, el hecho de que se cumplan las normas significa que los elementos diseñados son los más convenientes económicamente hablando. Esto tiene sustento en varios estudios previos de otros autores, en los cuales se refleja que en nuestro medio aun el cumplimiento de las normas no es una práctica común. El presente estudio pretende demostrar que cumpliendo las requisitos de diseño impuestos en los códigos y mediante la aplicación de técnicas no convencionales es posible obtener elementos eficientes en el aspecto estructural y económico, ya que el diseño estructural y en la mayoría de problemas de diseño se pueden obtener mediante la variación combinatoria de sus dimensiones una diversidad de soluciones validas en el aspecto estructural pero de todas ellas solo pocas o en ciertos casos solo una es la que genera la solución a menor costo. Esto es fundamental en un mundo competitivo y de creciente desarrollo como en el que nos desarrollamos, en el que el ahorro de recursos cumple un papel importante y al explorar y experimentar nuevas técnicas y otras poco difundidas, se fomenta la innovación y el desarrollo, en este caso de la ingeniería, que es el campo desde donde se aportan a la sociedad.

1.2 PROBLEMATIZACIÓN

1.2.1 IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

En la actualidad en el Ecuador, la implementación de columnas compuestas para el diseño en edificaciones no se ha perfeccionado como una solución para edificaciones con cargas y luces de importancia. El diseño de columnas compuestas se desarrolla a

través de un método iterativo, en el cual se parte seleccionando las dimensiones básicas de la columna ancho, largo, espesor, se seleccionan las propiedades del acero y del hormigón, se selecciona el tamaño de la columna, se calcula las longitudes efectivas respecto a ambos ejes principales, a continuación se efectúa la revisión de cada caso de diseño y se analiza si está dentro del rango establecido, de lo contrario existen dos casos, el primero en el cual el elemento está sobredimensionado y el segundo en el cual esta sub dimensionado para lo cual se debe regresar al proceso inicial redimensionando la sección aumentando o disminuyendo la misma según sea el caso, en este tipo de diseño tradicional no se considera el diseño óptimo. Los métodos clásicos de diseño estructural para columnas compuestas no permiten realizar un análisis multiobjetivo para entregar un elemento óptimo tanto en las secciones de los materiales utilizados como en el costo que conllevaría el uso de dicho dimensionamiento.

1.2.2 LIMITACIONES.

El proyecto de investigación se centrará en el cálculo de columnas de acero de doble simetría de eje recto, sección constante, cuadrada rectangular y circular rellenas de hormigón, sujetas a Flexocompresión Biaxial.

Basado en la normativa impuesta por el Load and Resistance Factor Design for structural Steel Building (LRFD) de la AISC (American Institute of Steel Construction).

Dentro de las limitaciones marcadas por el LRFD para este tipo de columnas se presentan las siguientes:

- El área de la sección transversal del elemento de acero es, cuando menos, el cuatro por ciento del área de la sección transversal compuesta total.

$$A_s > 0.04A_g$$

- Si el concreto es de peso volumétrico normal, su resistencia especificada en compresión, $f'c$ no será menor de 200 Kg/cm² ni mayor de 550 Kg/cm²; si es ligero tendrá una resistencia no menor de 300 Kg/cm².
- Si el límite de fluencia del acero estructural es mayor de 4 200 Kg/cm², en el cálculo de resistencia se tomará ese valor.
- El grueso t de las paredes de las secciones tubulares de acero estructural rellenas debe cumplir con:

$$t > b \sqrt{\frac{Fy}{3E}}$$

Para cada cara de ancho b en secciones rectangulares o cuadradas,

Y para secciones circulares de diámetro exterior D :

$$t > D \sqrt{\frac{Fy}{8E}}$$

Para secciones circulares de diámetro exterior D .

Se empleará la técnica de optimización del algoritmo genético simple.

El ingreso de dimensiones de perfiles y propiedades de los materiales se los realiza en unidades SI.

Se trabajará con secciones de perfiles soldados.

1.2.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es posible optimizar el diseño estructural a través de técnicas de computación evolutiva?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Diseñar a flexocompresión biaxial columnas de acero rellenas de hormigón basado en la normativa del AISC utilizando el método del LRFD con la aplicación de algoritmos genéticos.

1.3.2 ESPECÍFICOS

- Analizar el proceso que establece el LRFD para el diseño a flexocompresión biaxial de columnas compuestas.
- Estudiar los fundamentos conceptuales de los algoritmos genéticos y sus aplicaciones.
- Investigar los parámetros necesarios para la aplicación de un algoritmo genético en el diseño a flexocompresión biaxial de columnas de acero rellenas de hormigón.
- Desarrollar el proceso requerido para la implementación del algoritmo genético en el diseño a flexocompresión biaxial de columnas rellenas de hormigón.
- Comparar los resultados obtenidos mediante la aplicación del diseño por el método tradicional LRFD con el diseño que aplica algoritmos genéticos.

1.4 JUSTIFICACIÓN.

El avance tecnológico, el desarrollo de la ciencia y la globalización entre otros eventos que crecen aceleradamente en la actualidad, nos obligan a ser cada vez más competitivos, el diseño estructural además de cumplir con los requisitos de establecidos por las normas deberían garantizar su economía.

La rama de la inteligencia artificial y en particular la técnica basada en la teoría de la evolución llamada Algoritmos Genéticos, es una herramienta para la búsqueda de soluciones óptimas, en las mismas que se puede maximizar o minimizar funciones multiobjetivo, buscar una solución en la cual concurren varios o todos los campos que intervienen en cualquier ámbito en las cuales se las aplique.

Con el desarrollo de esta investigación se pretende diseñar columnas de acero rellenas de hormigón con mejor estructuración de sus elementos, mejores características geométricas y menos costosas, en las cuales se podrá maximizar el desempeño estructural, el cumplimiento de la normativa y se minimizarán factores tales como el peso y el costo.

Se aplicará la teoría de los algoritmos genéticos al diseño de columnas compuestas sujetas a flexocompresión biaxial siguiendo la normativa impuesta por la AISC método del LRFD.

Con la introducción en nuestro medio de este tipo de técnicas al diseño estructural, se abrirá la puerta a futuras investigaciones en este campo, y no solo en el diseño estructural sino que además en diferentes ramas en las que la ingeniería demanda técnicas que garanticen eficiencia y eficacia.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO.

2.1 ANTECEDENTES

El diseño estructural en las últimas décadas se ha desarrollado aceleradamente, gracias al avance tecnológico así como de las normativas, la informática ha sido un aporte fundamental ya que mediante la misma se ha reducido el tiempo invertido en el diseño y se ha incrementado considerablemente productos finales de mayor calidad.

La combinación de materiales de construcción más importante y más frecuentemente empleada tanto en diseño como en la construcción es la de acero y hormigón. A pesar de ser muy diferentes en su naturaleza estos dos materiales se complementan dado que:

- El hormigón es eficiente en compresión y el acero en tracción.
- Los componentes de acero son relativamente delgados y propensos a pandear, el hormigón puede arriostrar dichos componentes evitando su pandeo.
- El hormigón también proporciona protección contra la corrosión y aislamiento térmico a altas temperaturas provocadas por incendios.
- El acero proporciona mayor ductilidad a la estructura.¹

Estrictamente pieza compuesta significa la interacción de dos materiales en un elemento estructural, por ejemplo, una columna de acero tubular relleno de hormigón.

Las columnas compuestas son una combinación de las columnas de hormigón y las de acero, reuniendo las ventajas de ambos tipos de columnas. Los miembros resultantes son capaces de soportar cargas considerablemente mayores que las columnas de concreto reforzado de las mismas dimensiones.²

Los algoritmos genéticos son métodos adaptativos que puede usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización los cuales están basados en el proceso genético de los organismos vivos, utilizan una analogía directa del fenómeno de

¹BORJA, Esteban – VALLEJO, Vicente. Diseño de Columnas. ...atas. Escuela Politécnica Nacional, 1986.

²Mccormac.Diseño de Estructuras de Acero 2da Edición. México, 2002

evolución en la naturaleza. Trabajan con una población de individuos, cada uno representado una posible solución a un problema dado. A los más aptos se les da la oportunidad de reproducirse mediante cruzamientos con otros individuos de la población, produciendo descendiente con características de ambos padres.

En la Universidad Nacional de Chimborazo, en la Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, se ha desarrollado con anterioridad una investigación para el diseño de vigas con la aplicación de Algoritmos Genéticos propuesta por el Ing. Armando Ashqui en el año 2011, en la cual se propone obtener a través de esta técnica resultados económicamente óptimos y que cumplan con los requerimiento del Código Ecuatoriano de la Construcción, generando un interés muy especial para el desarrollo de esta técnica de optimización en muchos temas de ingeniería.

El presente estudio retoma esta idea y pretende demostrar que cumpliendo los requisitos de diseño impuestos por el LRFD y mediante la aplicación de técnicas no convencionales como son los algoritmos genéticos se pueden obtener columnas de acero rellenas de hormigón eficaces en el aspecto estructural y optimas en el aspecto económico.

2.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

2.2.1 ESTUDIO TEÓRICO DE LA FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL

En este punto es importante aclarar que la presente tesis se guiará en base a la norma del código del AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **Manual of Steel Construction, Load &Resistance Factor Design**. Que en adelante se denominará especificación LRFD.

2.2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LAS SECCIONES

Una condición básica para que los cálculos efectuados en una estructura se adapten a su comportamiento real consiste en que ésta se aproxime en la mayor medida de lo posible a las hipótesis con las que se efectúa el mismo. Cuando se utilice un análisis

elástico, se podrá considerar cualquier tipo de sección transversal siempre y cuando en el cálculo de los diferentes elementos se consideren las posibles limitaciones de la resistencia de la sección transversal debida a su pandeo local.

Las normas establecen una clasificación de las secciones transversales en función de su capacidad para adaptarse a las hipótesis básicas de cálculo, empleando de esta forma, por ejemplo, las especificaciones del AISC, diferencia entre *secciones compactas*, *no compactas* y *secciones de elementos esbeltos*, entendiéndose que una sección es compacta si es capaz de desarrollar en su totalidad una articulación plástica.

La sección se considerará *compacta* cuando, estando conectadas las alas continuamente al alma, las relaciones ancho - espesor de todos los elementos son iguales o menores que el valor límite λ_p dado por la tabla 2.2.1

Si la relación ancho-espesor de al menos un elemento es mayor que λ_p pero en todos los elementos a compresión son iguales o menores que el valor límite λ_r que para los diferentes tipos de perfiles, se define en la tabla 2.2.2 de acuerdo a la notación de la figura 2.2.1, la sección se dice que *no es compacta*, y si esta limitación no se cumple el elemento se dice que es *esbelto a compresión* y que la sección transversal es de elemento esbelto y pandeará elásticamente antes de que cualquier parte de la sección entre en fluencia.³

2.2.2 ESBELTEZ DE LAS PIEZAS

La esbeltez efectiva o mecánica de las piezas es:

$$\lambda = \frac{L}{r} \quad (2.2.1)$$

³VALENCIA, Gabriel. **Estructuras de Acero Diseño con Factores de Carga y Resistencia**. 2da. Edición, Colombia 2004,p. 392-394.

Dónde:

$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$ radio de giro de mínimo de la sección transversal.

I = momento de inercia de cualquier eje que contenga al centro de gravedad de la sección.

A = área bruta de la sección.

L = longitud ideal de la pieza obtenida multiplicando su longitud geométrica por un coeficiente que depende de las condiciones de vinculación de sus extremos, es una magnitud fundamental para el diseño del miembro a compresión.

El AISC establece que en las piezas comprimidas se debe verificar que:

$$\lambda \leq 200 \quad (2.2.2)$$

2.2.3 COMPRESIÓN

2.2.3.1 PANDEO ELÁSTICO DE EULER

Cuando un elemento se encuentra sujeto a un esfuerzo de compresión axial, que se va incrementando, si antes no se produce su agotamiento por algún otro motivo como aplastamiento, la carga alcanza un valor crítico denominado carga crítica de pandeo, que producirá el fallo del elemento.

El primer estudio teórico de la pieza simple comprimida fue realizado por Euler, basándose en un modelo matemático en el que implícitamente se realizaban las siguientes hipótesis simplificadoras⁴:

1. Las deformaciones son lo suficientemente pequeñas (Teoría de Tensiones de Orden II).
2. El material cumple indefinidamente la Ley de Hooke así como la hipótesis de Navier.
3. El eje de la pieza es matemáticamente recto y la carga P de compresión está exactamente centrada, aplicándose lentamente.

⁴TIMOSHENKO S. **Resistencia de Materiales**, Decimocuarta Edición

4. La pieza se encuentra en sus extremos perfectamente articulada, sin rozamientos y con los desplazamientos impedidos en la dirección perpendicular a la directriz de la barra que es de sección constante en toda su longitud, cuadrada o circular.
5. La pieza se encuentra en un estado tensional neutro, sin tensiones residuales o de cualquier tipo.

De este estudio se obtiene la *Carga de pandeo de Euler*, cuya ecuación es:

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2} (2.2.3)$$

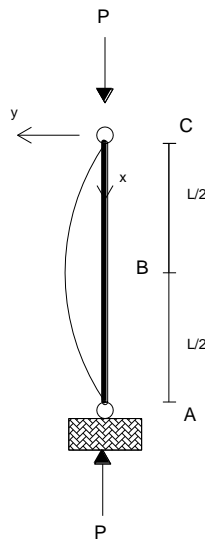


Figura 1 Elemento a compresión

Fuente: TIMOSHENKO S. Resistencia de Materiales, Decimocuarta Edición.

Si ambos lados de la ecuación (2.2.3) se divide entre A y se introduce la relación $I = Ar^2$, en que r es el radio de giro de la sección transversal, la carga de pandeo se expresa en términos del esfuerzo de pandeo F_e

$$F_e = \frac{P_e}{A} = \frac{\pi^2 EI}{AL^2} = \frac{\pi^2 E}{(\lambda)^2}$$

La ecuación de una hipérbola denominada de Euler, será:

$$\lambda = \pi \sqrt{\frac{E}{F_e}} (2.2.3)$$

El valor de la hipérbola de Euler estará limitada por el límite elástico del acero S_e que prácticamente coincide con la tensión de fluencia F_y de éste. A la esbeltez correspondiente se la denomina Esbeltez de Euler (ecuación 2.2.4), que establece la forma de fallo de la columna en cuanto que, suponiendo válidas las hipótesis consideradas, para esbelteces inferiores a λ_E , piezas cortas, la tensión crítica de Euler es superior al límite elástico, por tanto, el soporte fallará por aplastamiento, mientras que si éste es superior, se producirá por pandeo, piezas largas.

$$\lambda_E = \pi \sqrt{\frac{E}{F_e}} \quad (2.2.4)$$

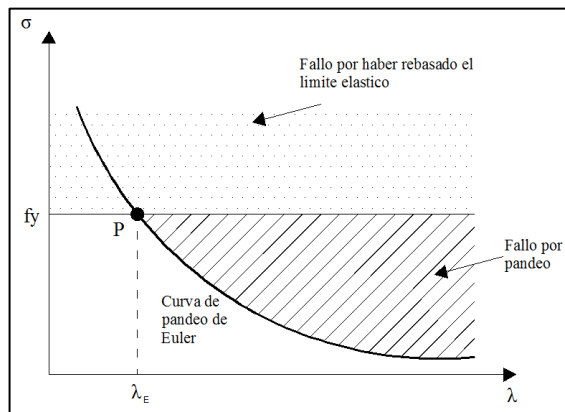


Figura 2 Hipérbola de Euler

Fuente: GALAMBOS, Theodore V. Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999

Debido a que la fórmula de Euler es sólo válida para valores de $S_E = S_p$, (siendo $S_E = \text{tension critica de Eules o } P_E$ y $S_p = \text{limite de proporcionalidad}$) para que sea aplicable ha de ser:

$$\lambda \geq \pi \sqrt{E/F_p}$$

Para valores menores de λ se entra en el campo elastoplástico del acero correspondiente y hay que aplicar teorías que consideren este efecto.

Los enlaces extremos de la pieza comprimida presenta una influencia muy importante en la capacidad resistente del miembro a pandeo; como se mencionó anteriormente, en la teoría de Euler se establece la hipótesis de que el miembro se

encuentra en sus extremos perfectamente articulado, sin rozamientos y con los desplazamientos impedidos en la dirección perpendicular a la directriz de la barra.

Para otras condiciones de vinculación se debe sustituir la longitud mecánica real de la pieza L, por la distancia entre los puntos de inflexión de la curva de pandeo, KL, de manera que la carga de Euler se convierte en:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{KL^2} \quad (2.2.5)$$

En la figura 2.2.3⁵ se indican tanto los valores teóricos como los recomendados del coeficiente K, cuando las condiciones de diseño son aproximadas, para el caso de la columna aislada con distintas condiciones de vinculación de sus extremos.

En el caso de que la sección del elemento comprimido no presente planos preferenciales para que se efectúe en ellos el pandeo, éste se producirá indiscutiblemente sobre el más débil.

Forma de pandeo de la curva según vínculos							
	K (Teórico)	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
	K (Práctico)	0.65	0.8	1.2	1.0	2.1	2.0
Rotacion fija y traslación fija		Rotacion fija y traslación libre		Rotacion libre y traslación fija		Rotacion libre y traslación libre	

Figura 3 Condiciones de vinculación del elemento.

Fuente: GALAMBOS, Theodore V. Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999.

⁵Theodore V. Galambos. **Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999**

2.2.3.2 EFECTO DE LA CURVATURA INICIAL DE LA COLUMNA EN SU COMPORTAMIENTO A PANDEO SEGÚN EL LRFD

En la realidad la columna perfectamente recta es imposible de elaborar, en el proceso de laminación se obtienen curvas iniciales que se pueden medir por el valor máximo que presentan, e , respecto a la directriz ideal. Por lo general para que un elemento recto de longitud L sea admisible debe presentar la siguiente relación $e = L/1500$ ⁶.

El LRFD, basándose en la investigación experimental y teórica, en los que la sección transversal presenta pandeo por flexión sin torsión, en el que se asume que la máxima deformación de la curvatura inicial es $e = L/1500$, considera que la curva que representa la situación de pandeo para esbelteces reducidas tales que:

$\lambda_c \geq 1,5$ es:

$$F_{cr} = 0,877 \frac{F_y}{\lambda_c^2} \quad (2.2.6)$$

$F_y = \text{limite elastico del acero.}$

$\lambda_c = \text{esbeltez reducida, esbeltez de columnas.}$

$$\lambda_c = \frac{KL}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (2.2.7)$$

Para $\lambda_c \geq 1,5$, el pandeo se denomina pandeo elástico, ya que éste se produce manteniéndose todas las fibras de la sección transversal dentro del campo elástico.

Para el intervalo $\lambda_c < 1,5$ el pandeo se denomina pandeo inelástico, en éste se originan tensiones dentro del campo elastoplástico.

En el LRFD para una columna que se mantiene dentro del campo elástico se establece como relación de diseño:

$$\phi_c P_n = P_u$$

⁶Theodore V. Galambos. **Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999**

$$\phi_c P_n = 0,85 A_g F_{cr} (2.2.8)$$

Dónde:

$\phi_c P_n =$ resistencia de diseño de la columna.

$P_n =$ resistencia nominal de la columna.

$\phi_c = 0,85 =$ factor reductor de la resistencia de la columna.

$A_g =$ área bruta de la sección de acero.

$P_u =$ Resistencia requerida de la columna obtenida por las cargas factorizadas en el análisis estructural.

Por lo tanto, se tiene:

$$\phi_c P_n = 0,85 A_g * 0,877 \frac{F_y}{\lambda_c^2} (2.2.9)$$

2.2.3.3 PANDEO INELÁSTICO DE COLUMNAS SEGÚN EL LRFD.

Si el elemento es perfectamente recto y no se produce su pandeo por flexotorsión, hasta alcanzar el pandeo por flexión, se inicia el pandeo elástico cuando la suma de las tensiones residuales de compresión más la inducida por la acción de la carga P de compresión axial, se mantienen por debajo del límite elástico F_y del acero. Si las condiciones del soporte son tales que, para prevenir su pandeo elástico, se construye con una esbeltez λ_c lo suficientemente pequeña, la curva tensión de compresión-deformación, (figura 4), para una sección de viga en doble T, que contiene tensiones residuales pasa a ser no lineal cuando los extremos de las alas comienzan a fluir y se produce el pandeo inelástico.

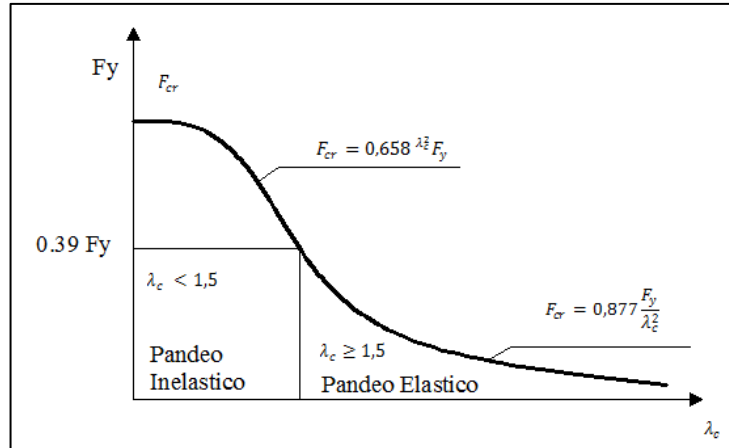


Fig. 4 Curva tensión de compresión – deformación.

Fuente: VALENCIA, Gabriel. Estructuras de Acero. Diseño con Factores de Carga y de Resistencia. 2ª. Edición, Colombia 2004, p. 102

En el rango inelástico, esto es para $\lambda_c < 1,5$, según el LRFD se tiene:

$$F_{cr} = 0,658 \lambda_c^2 F_y \quad (2.2.10)$$

Para la columna que presenta pandeo dentro del intervalo inelástico el LRFD establece como relación de diseño a:

$$\phi_c P_n = P_u$$

$$\phi_c P_n = 0,85 A_g F_{cr}$$

Dónde:

$$\phi_c P_n = \text{resistencia de diseño de la columna.}$$

$$P_n = \text{resistencia nominal de la columna.}$$

$$\phi_c = 0,85 = \text{factor reductor de la resistencia de la columna.}$$

$$A_g = \text{Área bruta de la sección de acero.}$$

$$P_u = \text{Resistencia requerida de la columna obtenida por las cargas factorizadas en el análisis estructural.}$$

Por lo tanto, se tiene:

$$\phi_c P_n = 0,85 A_g * 0,658 \lambda_c^2 F_y (2.2.11)$$

2.2.3.4 PANDEO LOCAL.

2.2.3.4.1 PANDEO LOCAL DE LOS ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA COLUMNA SEGÚN EL LRFD⁷

La condición necesaria para que sean aplicables las relaciones, es que antes que se origine el pandeo de la columna no lo hará ninguno de los elementos con los que se encuentra constituida su sección transversal.

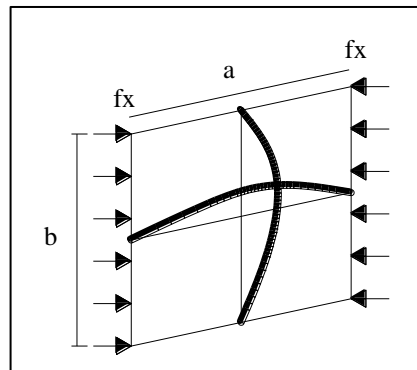


Figura 5 Pandeo local de la sección transversal.

Fuente: VALENCIA, Gabriel. Estructuras de Acero. Diseño con Factores de Carga y Resistencia. 2da. Edición, Colombia 2004.

La tensión crítica de una placa a pandeo elástico F_{cr} , sometida a una distribución uniforme de cargas a compresión según dos lados de la misma y que se encuentra simplemente apoyada en sus dos bordes es:

$$F_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/a)^2} (2.2.12)$$

⁷VALENCIA, Gabriel. Estructuras de Acero. Diseño con Factores de Carga y Resistencia. 2da. Edición, Colombia 2004.

Dónde:

k = constante que depende de la relación a/b y de las condiciones de vinculación de los bordes, tabla 2.2.5

E = módulo de elasticidad del acero.





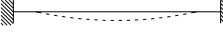
$\nu = 0.3$, módulo de Poisson.

a/b = relación de la longitud de la placa a su ancho (bordes cargados).

b/t = relación del ancho de la placa a su espesor.

La tensión de crítica (F_{cr}) es inversamente proporcional a (b/t) y análoga a la relación de esbeltez (L/r) para el pandeo de columnas. No debe descuidarse el hecho de que para relaciones pequeñas de b/t y L/t se puede producir pandeo local inelástico de los elementos que configuran la sección transversal del soporte.

Tabla 1. Condiciones de vinculación de los bordes

Caso	Condiciones de apoyo de los bordes cargados	K	
1	Un borde simplemente apoyado y el otro libre	0.425	
2	Un borde empotrado y el otro libre	1.277	
3	Ambos bordes simplemente apoyados	4.00	
4	Un borde empotrado y el otro simplemente apoyado	5.42	
5	Ambos bordes empotrados	6.97	

Fuente: AISC-LRFD

A efectos prácticos, en la tabla 2.2.6 se presentan los valores límite de las relaciones ancho/espesor, especificados en el código AISC-LRFD, de los elementos de acero que se han evaluado partiendo de la teoría del pandeo de placas, dentro del

rango inelástico, basándose en la ecuación 2.2.12 y suponiendo que $k = 5.0$, para elementos simplemente apoyados a lo largo de los dos bordes.⁸

En el caso de b/t de cada elemento comprimido de la sección transversal de una columna sea inferior a λ_r (figura 9), no se produce pandeo local de ninguno de sus elementos antes que se origine el pandeo de la pieza y la capacidad resistente de la pieza viene establecida por las relaciones antes mencionadas.

$b/t < \lambda_r$ entonces no se produce pandeo local.

Tabla 2. Relación ancho/espesor límite λ_r , elementos rigidizados.

Elemento de columna	Relación ancho/espesor	Relación ancho/espesor límite λ_r
Alas de secciones rectangulares	b/t	$\lambda_r = \frac{2000}{\sqrt{F_y}}$
Todo tipo de elementos rigidizados, soportados a lo largo de los bordes, solicitados por compresión.	b/t	$\lambda_r = \frac{2120}{\sqrt{F_y}}$
Secciones circulares huecas	D/t	$\lambda_r = \frac{232000}{\sqrt{F_y}}$

F_y está en Kg/cm^2

Fuente: SILVA CRUZ, Dayana Gabriela, Programa Para El Diseño De Columnas Compuestas Sujetas A Flexocompresión Biaxial Por Los Métodos: LRFD, ACI Y EUROCÓDIGO.

⁸VALENCIA, Gabriel. **Estructuras de Acero Diseño con Factores de Carga y Resistencia.** 2da. Edición, Colombia 2004, p. 369

Pero si las relaciones b/t , de los elementos comprimidos de la sección transversal, son mayores que λ_r , pandean con anterioridad a que lo haga el soporte en su conjunto y la capacidad de éste se verá reducida.

$b/t > \lambda_r$ se produce pandeo local, la capacidad de éste se verá reducida

Para esta situación se pueden diferenciar tres casos diferentes, detallados a continuación:

Caso 1. La sección transversal de la columna contiene únicamente elementos sin rigidizar.

Caso 2. La sección transversal de la columna se encuentra formada por elementos que son todos ellos rigidizados.

Caso 3. La sección transversal de la pieza comprimida se encuentra formada por unos elementos que están rigidizados y otros que no.

Cabe aclarar que las secciones de columnas en estudio son: rectangulares, cuadradas y circulares, por lo tanto, se detallará el Caso 2 al cual pertenecen dichas secciones.

Caso 2

La sección transversal de la columna contiene únicamente elementos rigidizados, en este caso, se debe considerar en los cálculos un factor de minoración de área, Q_a , debida a los elementos rigidizados que tengan una relación $b/t > \lambda_r$.

En las especificaciones del LRFD se considera, de la ecuación (2.2.8), como resistencia de diseño del elemento comprimido a:

$$FP_n = 0,85A_gF_{cr}$$

Dónde:

Si es $\lambda_c \sqrt{Q_a} \leq 1,5$

$$F_{cr} = Q_a * 0,658 Q_a \lambda_c^2 F_y (2.2.13)$$

Y para $\lambda_c \sqrt{Q_a} > 1,5$

$$F_{cr} = 0,877 \frac{F_y}{\lambda_c^2} (2.2.14)$$

Q_a = factor de minoración de área se obtiene de la siguiente manera:

a) Para todo tipo de elementos rigidizados, soportados a lo largo de los bordes, solicitados por compresión.

Si $b/t \geq \frac{2120}{\sqrt{F_y}}$

$$Q_a = \frac{A_e}{A_g} = \frac{A_g - \sum(b - b_e) \cdot t}{A_g}$$

A_e = suma de las áreas efectivas de la sección transversal

A_g = área bruta de la sección transversal.

b = ancho real del elemento

b_e = ancho efectivo reducido

t = espesor del elemento

El área ineficaz de los elementos de la sección para los que $b/t > \lambda_r$ se obtiene a través del ancho efectivo reducido b_e que se puede considerar como el único que ayuda a efectos resistentes.

El ancho efectivo reducido b_e se obtiene:

$$b_e = \frac{2730t}{\sqrt{F_y}} \left[1 - \frac{480}{(b/t)\sqrt{F_y}} \right] \leq b (2.2.15)$$

En cualquier caso: $b_e = b$

a) En secciones circulares cargadas axialmente:

$$\text{Si } \frac{232000}{F_y} < \frac{D}{t} < \frac{914000}{F_y}$$

$$Q_a = \frac{1100}{F_y(D/t)} + \frac{2}{3} (2.2.15)$$

Dónde:

D = diámetro exterior.

t = espesor del elemento.

F_y = límite elástico del acero.

2.2.3.5 LONGITUD EFECTIVA DEL ELEMENTO⁹

La longitud efectiva del elemento, KL , se usa como la longitud modificada de la columna para considerar restricciones en los extremos diferentes a las articulaciones. Por otra parte, es la distancia entre los puntos de inflexión del miembro pandeado.

Se puede determinar el valor real de K , a partir de los nomogramas de Jackson y Moreland, los cuales se encuentran detallados en la sección R10.12 del ACI. Para la obtención del coeficiente de longitud efectiva, K , se debe tener en cuenta a qué clase de pórtico pertenece el elemento, siendo así:

Para columnas de pórticos translacionales, donde los movimientos laterales se encuentran permitidos, los valores de $K > 1$, para el pandeo elástico de la columna en el plano del pórtico.

Para columnas de pórticos intranslacionales, en los que los movimientos laterales se encuentran impedidos, se puede emplear el mismo nomograma para obtener valores $K < 1$, o utilizar de manera conservadora $K = 1$.

⁹Theodore V. Galambos. **Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999.**

2.2.4 FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL

En la realidad, es usual que no se presenten aisladas las diferentes solicitaciones sobre una barra, sino que actúen combinadas; tales barras suelen denominarse viga-columna. Existiendo así, situaciones en las cuales la compresión axial está acompañada por flexión simultánea con respecto a los dos ejes principales de la sección. Éste es el caso, por ejemplo, de las columnas esquineras de edificios donde las vigas principales y las secundarias llegan hasta estas columnas en las direcciones de los dos muros y transfieren sus momentos extremos a la columna en dos planos perpendiculares. Situaciones similares de carga pueden ocurrir en columnas interiores, en particular, si la planta de columnas es irregular.

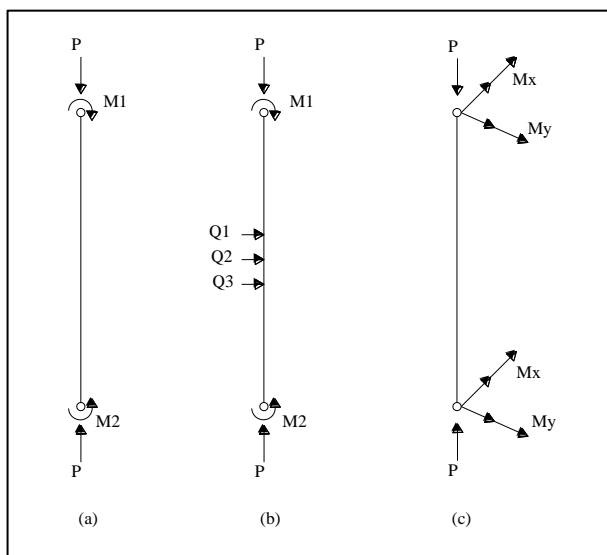


Figura6 Elementos solicitados por flexión y carga axial de compresión.

Fuente: GALAMBOS, Theodore V. Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999

Se muestra en la figura 6 algunos de los casos representativos de barras solicitadas por flexión y carga axial de compresión. En la figura 6 (a), caso típico de columnas que forman parte de pórticos planos, se consideran únicamente momentos en los extremos y éstos están aplicados en uno de los planos principales de la sección transversal. En la figura 6 (b), elemento solicitado por fuerzas transversales además de la fuerza axial y los momentos en los extremos. El elemento de la figura 6 (c), es el caso más general de cargas con momentos flectores en los dos planos principales.

El diseño de piezas flexocomprimidas debe tener en cuenta no únicamente los esfuerzos primarios debidos a la carga combinada, sino también los efectos secundarios, los cuales por lo general se denominan efectos **P – delta**, que resultan de dos principios:

1.- Un incremento en los momentos de flexión, ocasionado por el pandeo del miembro que crea una excentricidad d de la carga de compresión axial con respecto al eje neutro (Figura 7 Y Figura 8).

2.- Los momentos secundarios producidos en un miembro de un pórtico rígido, debido al desplazamiento lateral del pórtico que crea una excentricidad d de la carga de compresión axial con respecto al eje neutro.

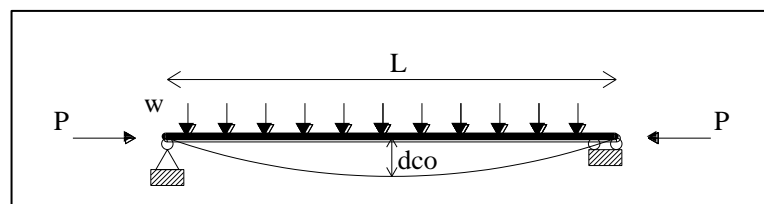


Figura 7 Comportamiento de viga-columna, efecto P-d

Fuente: GALAMBOS, Theodore V. Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999

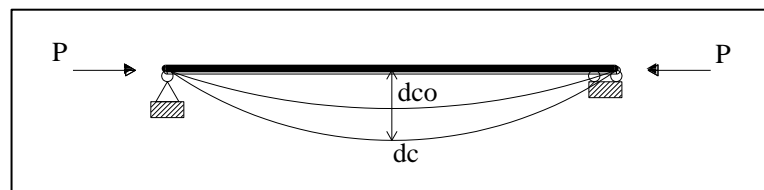


Figura 8 Comportamiento de viga-columna, efecto P-d

Fuente: GALAMBOS, Theodore V. Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999

Siendo:

d_{co} = desplazamiento en el punto medio de la viga, como consecuencia de la acción de la carga w .

P = carga axial de compresión.

d_c = desplazamiento final en el centro de la viga, debido a la acción de P .

A continuación se resumen las ecuaciones para el diseño de un miembro estructural bajo la acción de carga axial y flexión biaxial combinadas:

2.2.4.1 Carga axial y Flexión Biaxial Combinadas, de acuerdo al LRFD

El diseño de los miembros sometidos a compresión y flexión con respecto a uno o dos ejes de acuerdo al AISC – LRFD, sección H1.2. Miembros con simetría doble o simple en flexión y compresión, se basa en las siguientes ecuaciones de interacción:

$$\text{Si } \frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0,2 \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1,0 \quad (2.2.15)$$

$$\text{Si } \frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0,2 \frac{P_u}{\phi_c P_n} + \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1,0 \quad (2.2.16)$$

Dónde:

P_u = resistencia requerida a compresión.

P_n = resistencia normal a compresión¹⁰, (ver sección. 2.2.3).

M_u = resistencia requerida a flexión¹¹.

M_n = resistencia nominal a flexión¹².

ϕ_c = coeficiente de seguridad a la compresión = 0.85.

ϕ_b = coeficiente de seguridad a la flexión = 0.90.

¹⁰ AISC -LRFD. Sección E2.

¹¹ AISC -LRFD. Sección C1

¹² AISC -LRFD. Sección F1.

2.2.4.1.1 OBTENCIÓN DE M_u

El momento máximo presente en el miembro, M_u , en su obtención puede incluir los efectos de segundo orden para cargas mayoradas. Si no se efectúa el análisis de segundo orden, se puede calcular, M_u , con coeficientes de amplificación como se deduce en el siguiente análisis.

En la figura 2.2.13 se observa una columna en voladizo deformada debido a la acción de una carga vertical P y una horizontal H aplicadas en el extremo superior, el momento total a una distancia y del extremo, considerando los momentos primarios y secundarios por la carga P , será:

$$M = H \cdot y + H' \cdot y + P \cdot \delta$$

La fuerza horizontal que equilibrará el momento $P \cdot \delta$ es H' generada en el extremo, de este modo, se tiene $H' = P \cdot \delta / h$. El momento máximo en la columna vale, $H \cdot h + P \cdot \delta$

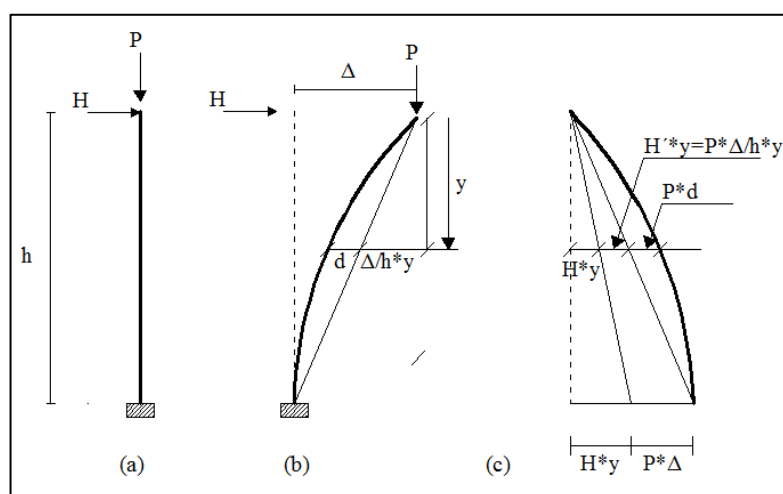


Figura 9 Columna empotrada solicitada por carga axial y horizontal

Fuente: GALAMBOS, Theodore V. Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999

Este análisis es aplicable a un pórtico completo, con lo cual en vez de realizar un análisis de segundo orden se puede hacer uno de primer orden, y amplificar los

momentos así calculados para considerar los efectos de segundo orden, de esta forma se tiene Mu en función de momentos M_{Nt} y M_{Lt} .

$$M_u = B_1 \cdot M_{Nt} + B_2 \cdot M_{Lt} \quad (2.2.17)$$

Siendo:

M_{Nt} = resistencia a la flexión del miembro requerida con base en el supuesto de que no existe desplazamiento lateral del pórtico, y por tanto incluyen momentos de primer orden resultantes de las cargas gravitacionales.

M_{Lt} = resistencia a la flexión del miembro requerida como resultado únicamente de los desplazamientos laterales del pórtico.

B_1, B_2 = factores de amplificación del momento.

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{P_E}} \geq 1 \quad (2.2.18)$$

$$P_E = \frac{A_g F_y}{\lambda_c^2}; \text{ carga crítica de Euler.}$$

λ_c = esbeltez de la pieza¹³.

A_g = área bruta de la sección.

P_u = resistencia requerida a compresión.

C_m = coeficiente definido en la ecuación (2.2.32)

$$B_2 = \frac{1}{1 - \sum P_u (\Delta_{oh}/L \sum H)} \quad (2.2.19)$$

O

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u}{\sum P_E}} \quad (2.2.20)$$

¹³Ver sección 2.2.3.2

$\sum P_u$ = sumatoria de las resistencias axiales requeridas de todas las columnas de un piso.

Δ_{oh} = desplazamiento traslacional piso en cuestión.

$\sum H$ = sumatoria de todas las fuerzas horizontales en piso que inducen el desplazamiento Δ_{oh} .

L = altura del piso.

$\sum P_E$ = sumatoria de las cargas críticas de Euler de todas las columnas del piso.

En la figura 10 (a) se muestra un pórtico de 3 pisos con cargas gravitacionales y cargas horizontales. En la figura 10 (b) se han retirado las cargas horizontales y se han colocado en cada piso una restricción horizontal R_i para que así el pórtico no presente desplazamientos horizontales. Los momentos obtenidos mediante un análisis de primer orden del pórtico en estas condiciones son los M_{Nt} .

En un pórtico sin arriostramiento lateral, M_{Lt} es producto de las cargas laterales, en el caso de que el pórtico y las cargas verticales son simétricas, para las cargas verticales, $M_{Lt} = 0$. Sin embargo, si bien las cargas verticales o la geometría del pórtico son asimétricas, y el pórtico no está contraventeado, M_{Lt} es diferente de cero. En el caso de un pórtico arriostrado, $M_{Lt} = 0$. Para obtener su valor, se aplican fuerzas de igual magnitud a las R_i (figura 10 (c)) requeridas para hallar M_{Nt} sumadas a las fuerzas horizontales H_i que se habían retirado.

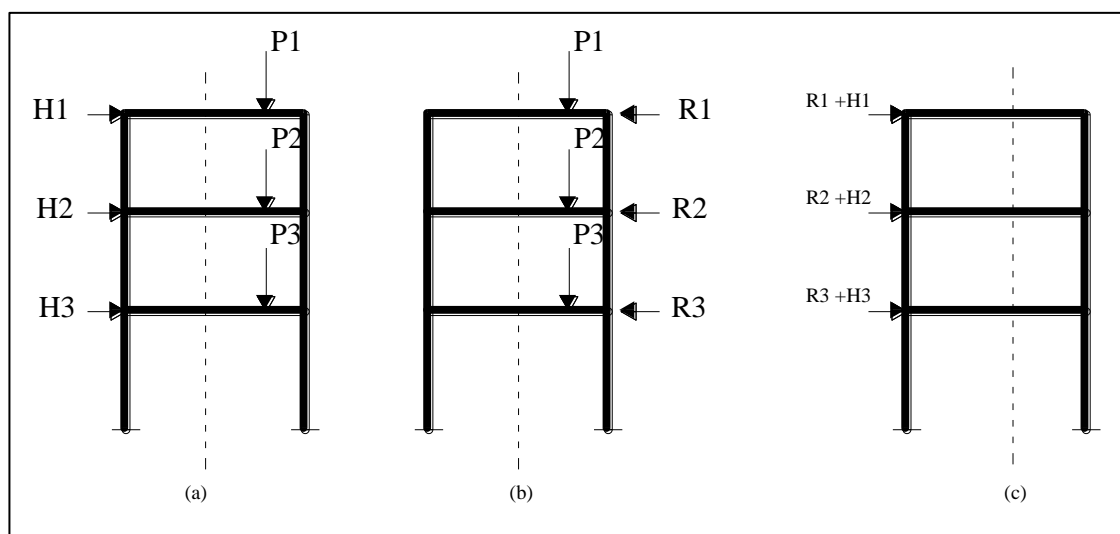


Figura 10 Modelo para la evaluación de M_{Nt} y M_{Lt} . a) Pórtico original; b) Pórtico sin desplazamientos laterales para M_{Nt} y c) Pórtico con desplazamientos y sin cargas verticales para M_{Lt} .

Fuente: GALAMBOS, Theodore V. Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999

Para tomar en cuenta el efecto P-d en los puntos intermedios de las columnas (ver figura 9), es necesario amplificar los momentos obtenidos en los extremos M_{Nt} y M_{Lt} con los factores $B1$ y $B2$ respectivamente.

$B1$ (ecuación 2.2.28), es el factor de amplificación que determina el efecto P-d en columnas sin desplazamiento relativo de sus extremos. En la que, para calcular P_E , el factor de longitud efectiva K será menor o igual a la unidad ya que el pórtico es contraventado.

Así mismo, $B2$ amplifica el momento M_{Lt} con la ecuación 2.2.29, donde $\sum P_u$ corresponde a la resistencia axial requerida por todas las columnas en un piso y $\sum P_E$ es la sumatoria de la carga crítica de Euler para tales columnas; en este caso K es mayor que la unidad, pues hay desplazamiento relativo de los extremos de la columna. Se trabaja con todas las columnas, porque se contempla el pandeo de todo el piso.

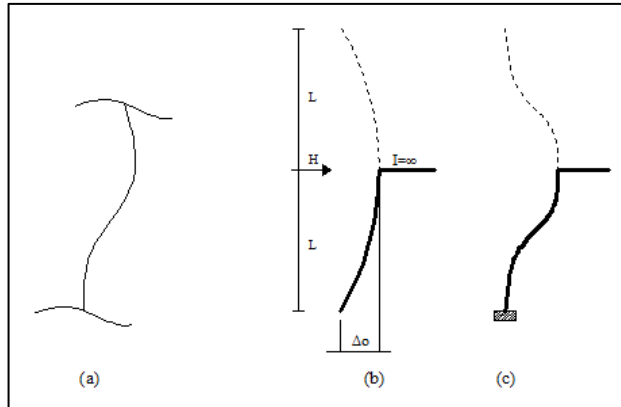


Figura 11 Modelo para evaluar Δ_0 a) Columna que forma parte de un pórtico, b) y c) Modelos equivalentes.

Fuente: GALAMBOS, Theodore V. Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999

Suponiendo que una columna que forma parte de un pórtico de varios pisos se comporta como se muestra en la figura 11 (b), se encuentra articulada en el extremo inferior y empotrada en el superior (suponiendo que la viga tuviera una rigidez infinita), la deflexión que sufrirá por una carga H puede evaluarse imaginando que la columna en cuestión es la mitad de una viga de luz $2L$ con una carga aplicada en el centro, esto es:

$$\Delta_0 = \frac{H(2L)^3}{48EI} = \frac{HL^3}{6EI}$$

Si estuviese empotrada en los dos extremos, figura 15 (c):

$$\Delta_0 = \frac{H(2L)^3}{192EI} = \frac{HL^3}{24EI}$$

Un valor intermedio entre las dos situaciones anteriores puede ser:

$$\Delta_0 = \frac{HL^3}{10EI}$$

Y considerando que $\pi^2 = 10$, puede convertirse en:

$$\Delta_0 = \frac{HL^3}{\pi^2 EI} = \frac{HL}{\pi^2 EI/L^2} = \frac{HL}{P_E}$$

$$\Delta_0 = \frac{HL}{P_E} (2.2.21)$$

Entonces $P_E = \frac{HL}{\Delta_0}$, y para todo un piso: $\sum P_E = \sum \frac{HL}{\Delta_0}$. Llevando este valor a la ecuación 2.2.20, se tendrá un nuevo valor de B_2 , que será aplicado únicamente a los momentos causados por fuerzas que producen tal desplazamiento en un piso completo.

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u}{\sum P_E}} = \frac{1}{1 - \frac{\sum P_u}{\sum \frac{HL}{\Delta_0}}}$$

El coeficiente C_m analizado suponiendo que no hay traslación lateral del pórtico, cuyo valor se lo obtiene en la siguiente ecuación:

- Para elementos en compresión no solicitados por cargas transversales entre sus soportes en el plano de la flexión:

$$C_m = 0,6 - 0,4 \frac{M_1}{M_2} (2.2.22)$$

Donde $\frac{M_1}{M_2}$ es la relación entre el momento menor y el mayor del tramo del elemento sin arriostrar, en el plano de la flexión considerado. $\frac{M_1}{M_2}$ es positivo cuando la flexión produce doble curvatura en el elemento y negativo cuando la curvatura es simple.

- Para elementos en compresión, solicitados por cargas transversales entre sus soportes se tiene:

$C_m = 0.85$ para elementos cuyos extremos se encuentran restringidos.

$C_m = 1$ para elementos cuyos extremos no se encuentran restringidos.

Además, C_m puede ser determinado por un análisis racional, (ver tabla 2.2.7), con la ecuación:

$$C_m = 1 + \psi \frac{P_u}{P_E} (2.2.23)$$

Siendo:

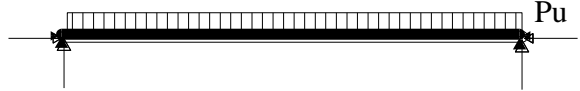
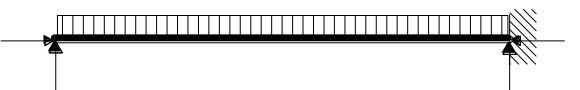

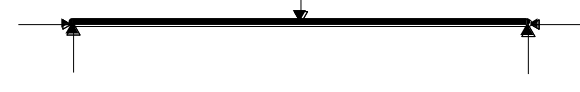
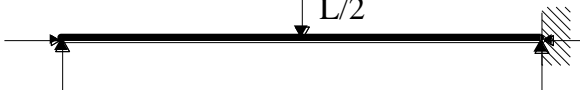
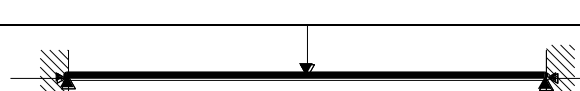
$$\psi = \frac{P_E \delta_0 EI}{M_0 L^2} - 1$$

δ_0 = deflexión máxima debida a la actuación de las cargas transversales.

M_0 = máximo momento flector de diseño factorizado entre soportes debido a la acción de las cargas transversales.

En la tabla 2.2.7 se ofrecen valores correspondientes de ψ y C_m para algunos casos de vigas con los extremos restringidos al desplazamiento y dos casos de vigas-columnas simplemente apoyadas.

Tabla 3 Valores de los coeficientes ψ y C_m

Caso	ψ	C_m
	0	1.0
	-0,4	1-0,4Pu/PE
	-0,4	1-0,4Pu/PE
	-0,2	1-0,2Pu/PE
	-0,3	1-0,3Pu/PE
	-0,2	1-0,2Pu/PE

Fuente: AISC-LRFD

2.2.4.1.2 Obtención de M_n .¹⁴

¹⁴ Theodore V. Galambos. **Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999**

La resistencia nominal a la flexión, M_n , se determina de acuerdo a la sección F1 del AISC – LRFD, no obstante, este desarrollo está fuera del objetivo de estudio de la presente tesis, ya que M_n de una columna compuesta se determina por medio de la distribución plástica de esfuerzos sobre la sección compuesta. Para secciones compactas:

$$M_n = M_p$$

$$M_p = Z * F_y$$

Donde

$$M_n = \text{momento nominal}$$

$$Z = \text{módulo de sección plástico}$$

$$F_y = \text{esfuerzo de fluencia}$$

Para el cálculo en secciones compuestas cambiamos:

$$F_y \text{ por } F_{my}$$

$$F_{my} = \text{esfuerzo de fluencia modificado}^{15}$$

2.3 COLUMNAS RELLENAS DE HORMIGÓN.

Las columnas rellenas de hormigón no sólo proporcionan una capacidad de soportar cargas mayores que la de las columnas de acero. En lo referente a la ductilidad y a la capacidad de rotación, las columnas de secciones de acero rellenas de hormigón ofrecen un funcionamiento óptimo al compararlas con otros tipos de columnas compuestas. Junto a la posibilidad de construir columnas sólo de acero o de hormigón, la respuesta a compresión de las columnas compuestas está básicamente gobernado por la cantidad de acero estructural dispuesta.

Para la sección de acero son adecuadas secciones huecas tubulares o rectangulares, o perfiles soldados ente sí. Las columnas compuestas rellenas tienen la ventaja de no precisar un encofrado adicional para el hormigonado.

¹⁵Sección 2.3.1.3

Una relación de los tipos de columnas compuestas rellenas empleadas en la práctica se muestra en la figura 2.3.1.¹⁶

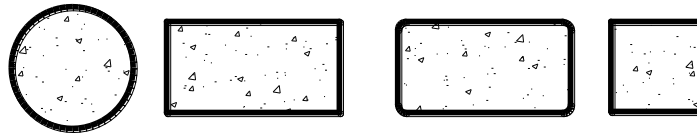


Figura 12 Columnas compuestas rellenas de hormigón

Elaborado por: Andrés Donoso y Stalin Parreño

2.3.1 Flexocompresión Biaxial.

En este punto es necesario anotar que los códigos empleados para el diseño de las columnas compuestas son los ofrecidos por el AISC-LRFD, ACI y el EUROCÓDIGO, con el método simplificado. Basándonos para este trabajo en el AISC-LRFD.

“El cálculo de las columnas compuestas se debe hacer para los estados límites últimos. Bajo las más desfavorables combinaciones de acciones, el cálculo tiene que demostrar que la resistencia de la sección no supera su límite y que la estabilidad global queda asegurada. El análisis de la capacidad resistente frente a cargas deberá incluir las imperfecciones, la influencia de las deformaciones en el equilibrio (teoría de segundo orden) y las pérdidas de rigidez en el caso de que partes del perfil se plastifiquen (zonas parcialmente plastificadas)”¹⁷

A partir de lo anterior, se analizan columnas compuestas formadas por tubos de acero y miembros de sección transversal rectangular de acero rellenos de concreto, que cumplen las condiciones que se indican a continuación:

¹⁶BORJA, Esteban – VALLEJO, Vicente. Diseño de Columnas Mixtas. Escuela Politécnica Nacional, 1986.

¹⁷ <http://www.ing.unlp.edu.ar/cmydm/MixtasEC4.pdf>

2.3.1.1 PANDEO LOCAL DE ELEMENTOS DE ACERO.

En el estado límite último se supone que la sección ha alcanzado toda su capacidad resistente, por lo que habrá que asegurar que esto sea posible sin que se produzca ningún fallo previo por causa de una inestabilidad local de las zonas delgadas de la sección transversal. Se puede cumplir limitando la relación entre el canto y el espesor en la sección.

Para secciones cerradas rellenas de hormigón con sección de acero deberán satisfacer las condiciones de esbeltez.

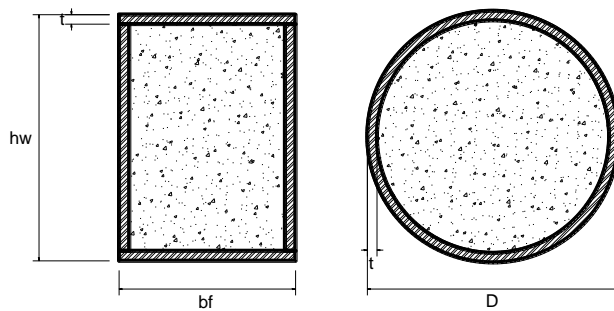


Figura 13 Secciones de acero rellenas de hormigón con nomenclatura de símbolos.

Elaborad por: Andrés Donoso y Stalin Parreño

Para el caso del LRFD:

$$\frac{b}{t} < 2120\sqrt{F_y}$$

Fórmula aplicada a todo tipo de elementos rigidizados, soportados a lo largo de los bordes, solicitados por compresión, de ancho $b = bf - 2t$, F_y es la resistencia de la sección de acero, en Kg/cm², y:

$$\frac{D}{t} < 232000/F_y$$

Para secciones circulares huecas, de diámetro D , F_y es la resistencia de la sección de acero, en Kg/cm²

Cuando se vayan a emplear elementos cuyas dimensiones sobrepasen los límites establecidos se tomará en cuenta la reducción de la resistencia por efecto del pandeo local. Ver sección 2.3.1.4

2.3.1.2 LIMITACIONES DE ACUERDO AL LRFD.

Las limitaciones presentadas en las especificaciones del LRFD¹⁸ son las siguientes:

- El área de la sección transversal del elemento de acero es, cuando menos, el cuatro por ciento del área de la sección transversal compuesta total.

$$A_s > 0.04A_g(2.3.1)$$

- Si el concreto es de peso volumétrico normal, su resistencia especificada en compresión, f'_c no será menor de 200 Kg/cm² ni mayor de 550 Kg/cm²; si es ligero tendrá una resistencia no menor de 300 Kg/cm².
- Si el límite de fluencia del acero estructural, es mayor de 4 200 Kg/cm², en el cálculo de resistencia se tomará ese valor.
- El grueso t de las paredes de las secciones tubulares de acero estructural rellenas debe cumplir con:

$$t > b \sqrt{\frac{F_y}{3E}}(2.3.2)$$

Para cada cara de ancho b en secciones rectangulares o cuadradas,
y que:

¹⁸AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. Manual of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design.

$$t > D \sqrt{\frac{F_y}{8E}} \quad (2.3.3)$$

para secciones circulares de diámetro exterior D .

- Si se desea emplear varillas longitudinales, localizadas dentro del núcleo de concreto confinado, pueden considerarse en el cálculo del área de la sección de acero estructural.

2.3.1.3 RESISTENCIA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL FRENTE A CARGAS AXIALES CONFORME AL LRFD.

El Load and Resistance Factor Design del AISC, plantea las siguientes especificaciones con respecto a la resistencia de diseño $F_c P_n$ de las columnas compuestas comprimidas axialmente, a partir de la ecuación 2.2.8:

$$\phi_c P_n = 0,85 A_g F_{cr}$$

1. A_s = área total de la sección transversal del elemento de acero estructural (reemplaza a A_g).

r_m = radio de giro del elemento de acero estructural, no se tomará menor que 0.3 veces la dimensión total de la sección compuesta, en el plano en que se estudie el pandeo (reemplaza a r).

2. F_y y E se sustituyen por los valores modificados F_{my} y E_m :

$$F_{my} = F_y + C_2 f_c (A_c / A_s) \quad (2.3.4)$$

$$E_m = E + C_3 E_c (A_c / A_s) \quad (2.3.5)$$

Dónde:

A_c = área de hormigón.

A_s = área del elemento de acero estructural.

E = módulo de elasticidad del acero.

E_c = módulo de elasticidad del hormigón. E_c puede ser calculado según el Código ACI de la ecuación:

$$E_c = wc^{1.5}0.14\sqrt{f_c}$$

Donde wc está comprendido entre 1400 y 2480 Kg/m^3 , para concreto de peso normal; f_c está en valores de (Kg/cm^2)

F_y = esfuerzo de fluencia de la sección de acero.

f_c = esfuerzo de compresión del concreto.

c_2, c_3 coeficientes numéricos, en el caso de secciones tubulares rellenas de concreto:
 $c_2 = 0.85; c_3 = 0.4$.

Con lo cual la resistencia de diseño de las columnas compuestas comprimidas axialmente se establece por:

$$\phi_c P_n = 0,85 A_s F_{cr}$$

F_{cr} se determina en base a :

$$\lambda_c \leq 1,5$$

$$F_{cr} = 0,658 \lambda_c^2 F_{my} \quad (2.3.6)$$

$$\lambda_c > 1,5$$

$$F_{cr} = 0,877 \frac{F_{my}}{\lambda_c^2} \quad (2.3.7)$$

2.3.1.4 ESBELTEZ DE LA COLUMNA COMPUESTA CONFORME AL LRFD

La carga crítica elástica de la columna compuesta se calcula mediante la ecuación de pandeo de Euler, con las siguientes modificaciones:

$$P_e = A_s F_{my} / \lambda_c^2 (2.3.7)$$

Dónde:

λ_c = esbeltez de la columna compuesta, definida de la siguiente manera:

$$\lambda_c = \frac{KL}{\pi * r_m} \sqrt{\frac{F_{my}}{E_m}}$$

F_{my} = tensión modificada para el diseño de la columna compuesta.

E_m = módulo modificado para el diseño de la columna compuesta.

KL = longitud efectiva de la columna.

2.3.1.5 RESISTENCIA A PANDEO DE UNA PIEZA COMPRIMIDA CONFORME AL LRFD

La resistencia a pandeo de una pieza comprimida conforme al LRFD, además de ser verificada para los límites de pandeo elástico e inelástico, se debe verificar el pandeo local, donde, si la sección transversal de la pieza comprimida contiene únicamente elementos rigidizados, se deberá considerar en los cálculos un factor de minoración de área, Q_a , debido a los elementos rigidizados que tengan una relación $b/t > \lambda_r$.

En el LRFD se considera, como resistencia de diseño del elemento comprimido compuesto a:

$$\phi_c P_n = 0,85 A_s F_{cr}$$

Dónde:

$$\text{Si es } \lambda_c \sqrt{Q_a} \leq 1,5$$

$$F_{cr} = Q_a * 0,658 Q_a \lambda_c^2 F_{my} (2.3.8)$$

Y para $\lambda_c \sqrt{Q_a} > 1,5$

$$F_{cr} = 0,877 \frac{F_{my}}{\lambda_c^2} (2.3.9)$$

El factor de minoración de área se define como:

$$Q_a = \frac{A_e}{A_s}$$

$$Q_a = \frac{A_e}{A_s} = \frac{A_g - \sum(b - b_e).t}{A_s}$$

Dónde:

A_e = suma de las áreas efectivas de la sección transversal

A_g = área bruta de la sección transversal.

b = ancho real del elemento

b_e = ancho efectivo reducido

t = espesor del elemento

Q_a se lo obtiene para los mismos límites expuestos en la sección 2.2.3.4.1

2.3.1.5.1 FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL DE ACUERDO AL LRFD.

Puede emplearse la fórmula de interacción de la AISC. Esta proporciona una transición empírica en la selección del miembro de acuerdo a requisitos de la AISC, desde la viga (cuando la carga de la columna tiende a cero) hasta la columna cargada axialmente (cuando el momento flexionante tiende a cero).

Una ecuación de interacción es la manera más sencilla de diseñar una viga-columna. Tal miembro está sometido a una fuerza axial P_u y a los momentos M_{ux} y M_{uy} . Cuando solo uno de estos efectos está presente, la capacidad última es la capacidad

correspondiente nominal individual P_n , M_{nx} o M_{ny} , respectivamente. La siguiente relación de interacción lineal ha sido empleada durante muchos años por la AISC.¹⁹

El diseño de miembros compuestos flexocomprimidos, según el AISC-LRFD Sección H1-1.

Si es

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} \geq 0.2$$

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right) \leq 1.0$$

Si es

$$\frac{P_u}{\phi_c P_n} < 0.2$$

$$\frac{P_u}{2\phi_c P_n} + \frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \leq 1.0$$

Tomando en cuenta que:

P_u = resistencia requerida a la compresión.

P_n = resistencia nominal a la compresión

M_u = resistencia requerida a la flexión, ver sección 2.2.4.1.1, con la modificación de la carga crítica de pandeo elástico $P_e = A_s F_{my} / \lambda_c^2$ (2.3.7)

M_n = resistencia nominal en flexión, que incluye los efectos de pandeo local y del pandeo lateral torsional si es apropiado. Estos son los momentos que el miembro puede soportar si solo están presentes momentos flexionantes. Los valores se determinan con los métodos dados según la sección F de la AISC.

Los tubos cuadrados y rectangulares flectados en torno a su eje menor no están sujetos a pandeo lateral torsional²⁰

Los tubos redondos no están sujetos a pandeo lateral-torsional.²¹

¹⁹Theodore V. Galambos. **Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999**

²⁰ TUBOS CUADRADOS Y RECTANGULARES Sección F7 Comentario de la AISC.

2.4 ALGORITMOS GENÉTICOS (AG)²²

2.4.1 INTRODUCCIÓN A LOS AG.

La capacidad del ser humano para predecir el comportamiento de su entorno, se ha ido incrementando con el paso del tiempo. De igual modo, ha comprendido que, si bien era capaz de controlar muchos aspectos de su vida, y su interacción con lo que le rodeaba, no lo era para otros tantos.

La inteligencia artificial es responsable de muchos de esos logros. Los pioneros de esta ciencia estaban tan interesados en la electrónica, como en la biología, y por eso sus aplicaciones iban desde calcular trayectorias de misiles, a tratar de modelizar el cerebro, de imitar el proceso de aprendizaje humano, y de simular la evolución biológica.

Los años ochenta marcan el florecimiento del interés de la comunidad científica por estos temas computacionales inspirados en la biología, que han visto como su desarrollo les llevaba a cotas inimaginables, primero en el campo de las Redes Neuronales, luego en el del Aprendizaje, y por último en lo que ahora se conoce como “Computación Evolutiva”, de la que los algoritmos genéticos constituyen su máximo exponente.

La primera mención del término, y la primera publicación sobre una aplicación del mismo, se deben a Bagley (1967), que diseñó algoritmos genéticos para buscar conjuntos de parámetros en funciones de evaluación de juegos, y los comparó con los algoritmos de correlación, procedimientos de aprendizaje modelizados después de los algoritmos de pesos variantes de ese periodo. Pero es otro científico el considerado creador de los Algoritmos Genéticos: John Holland, que los desarrolló, junto a sus alumnos y colegas, durante las décadas de 1960 y 1970. En contraste con las estrategias evolutivas y la programación evolutiva, el propósito original de

²¹ TUBOS REDONDOS Sección F8 Comentario de la AISC.

²² GOLDBERG, David E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning

Holland no era diseñar algoritmos para resolver problemas concretos, sino estudiar, de un modo formal, el fenómeno de la adaptación tal y como ocurre en la naturaleza, y desarrollar vías de extrapolar esos mecanismos de adaptación natural a los sistemas computacionales. La mayor innovación de Holland fue la de introducir un algoritmo basado en poblaciones con cruces, mutaciones e inversiones. Es más, Holland fue el primero en intentar colocar la computación evolutiva sobre una base teórica firme (Holland, 1975).

Hasta hace poco, esta base teórica, fundamentada en la noción de “esquemas”, fue la estructura sobre la que se edificaron la mayoría de los trabajos teóricos sobre algoritmos genéticos en las décadas siguientes.

En estos últimos años se ha generado una amplia interacción entre los investigadores de varios métodos de computación evolutiva, rompiéndose las fronteras entre algoritmos genéticos, estrategias evolutivas y programación evolutiva.²³

Con estos antecedentes, es importante mencionar que su uso ha sido bastante difundido como herramienta de optimización en varios ámbitos como la economía, la medicina, la ingeniería y la Aeronáutica, entre los principales.

2.4.2 DEFINICIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS (AG)

Los AG son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están Basados en el proceso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acuerdo con los principios de la selección natural y la supervivencia de los adaptados, postulados por Darwin (1859). Por imitación de este proceso, los AG son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de las mismas.

²³RODRÍGUEZ PIÑERO, Piedad Tolmos, Introducción a los algoritmos genéticos y sus aplicaciones.

En la naturaleza los individuos de una población compiten entre si en la búsqueda de recursos tales como comida, agua y refugio. Incluso los miembros de una misma especie compiten a menudo en la búsqueda de un compañero. Aquellos individuos que tiene más éxito en sobrevivir y en atraer compañeros tienen mayor probabilidad de generar un gran número de descendientes. Por el contrario individuos poco dotados producirán un menor número de descendientes. Esto significa que los genes de los individuos mejor adaptados se propagaran en sucesivas generaciones hacia un número de individuos creciente. La combinación de buena características provenientes de diferentes ancestros, puede a veces producir súper-individuos, cuya adaptación es mucho mayor que la de cualquiera de sus ancestros. De esta manera, las especies evolucionaran logrando unas características cada ve mejor adaptadas al entorno en el que viven.

2.4.3 ALGORITMOS GENÉTICOS EN LA OPTIMIZACIÓN²⁴

La razón del creciente interés por los AG es que estos son un método global y robusto de búsqueda de las soluciones de problemas. La principal ventaja de estas características es el equilibrio alcanzado entre la eficiencia y eficacia para resolver diferentes y muy complejos problemas de grandes dimensiones.

Lo que aventaja a los AG frente a otros algoritmos tradicionales de búsqueda es que se diferencian de estos en los siguientes aspectos:

Trabajan con una codificación de un conjunto de parámetros, no con los parámetros mismos.

Trabajan con un conjunto de puntos, no con un único punto y su entorno (su técnica de búsqueda es global). Utilizan un subconjunto del espacio total, para obtener información de universo de búsqueda, a través de las evaluaciones de la función a optimizar. Esas evaluaciones se emplean de forma eficiente para clasificar los subconjuntos de acuerdo con su idoneidad.

No necesitan conocimientos sobre el problema a resolver; es decir, no están sujetos a restricciones. Por ejemplo, se pueden aplicar a funciones no continuas, lo cual abre

²⁴GOLDBERG, David E. Genetic Algorithms in Search. Optimization and Machine Learning. (1989)

un amplio campo de aplicaciones que no podrían ser tratadas por los métodos tradicionales.

Utilizan operadores probabilísticos, en vez de los típicos operadores determinísticos de las técnicas tradicionales.

Resulta sumamente fácil ejecutarlos en las modernas arquitecturas masivas en paralelo.

Cuando se usan para problemas de optimización, resultan menos afectados por los máximos locales de las técnicas tradicionales.

2.4.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS AG

- No necesitan conocimientos específicos sobre el problema que intentan resolver.
- Operan de forma simultánea con varias soluciones, en vez de trabajar de forma secuencial como las técnicas tradicionales.
- Cuando se usan para problemas de optimización maximizar una función objetivo resultan menos afectados por los máximos locales (falsas soluciones) que las técnicas tradicionales.
- Usan operadores probabilísticos, en vez de los típicos operadores determinísticos de las otras técnicas.
- Pueden tardar mucho en converger, o no converger en absoluto, dependiendo en cierta medida de los parámetros que se utilicen tamaño de la población, número de generaciones, etc.
- Pueden converger prematuramente debido a una serie de problemas de diversa índole.

2.4.5 LIMITACIONES DE LOS AG²⁵

²⁵GOLDBERG, David E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning

El poder de los Algoritmos Genéticos proviene del hecho de que se trata de una técnica robusta, y pueden tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas, incluyendo aquellos en los que otros métodos encuentran dificultades.

Si bien no se garantiza que el Algoritmo Genético encuentre la solución óptima, del problema, existe evidencia empírica de que se encuentran soluciones de un nivel aceptable, en un tiempo competitivo con el resto de algoritmos de optimización combinatoria. En el caso de que existan técnicas especializadas para resolver un determinado problema, lo más probable es que superen al Algoritmo Genético, tanto en rapidez como en eficacia. El gran campo de aplicación de los Algoritmos Genéticos se relaciona con aquellos problemas para los cuales no existen técnicas especializadas. Incluso en el caso en que dichas técnicas existan, y funcionen bien, pueden efectuarse mejoras de las mismas hibridándolas con los Algoritmos Genéticos.

2.4.6 CONDICIONES PARA LA APLICACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO.²⁶

La aplicación más común de los Algoritmos Genéticos ha sido la solución de problemas de optimización, en donde han demostrado ser muy eficientes y confiables. Sin embargo no todos los problemas pudieran ser más apropiados para la técnica, y se recomienda en general tomar en cuenta las siguientes características del mismo antes de intentar usarla:

- Su espacio de búsqueda debe estar delimitado dentro de un cierto rango.
- Debe poderse definir una función de aptitud de que indique que tan buena o mala es una cierta respuesta.
- Las soluciones debe codificarse de una forma que resulte relativamente fácil de implementar en la computadora.

El primer punto es más importante, y lo más recomendable es intentar resolver problemas que tengan espacios de búsqueda discretos aunque éstos sean muy

²⁶ ASHQUI LAGUA, Félix Armando, DISEÑO A FLEXIÓN DE VIGAS RECTANGULARES DE HORMIGÓN ARMADO BASADO EN LA NORMATIVA ECUATORIANA Y MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS , 2011.

grandes. Sin embargo, también podrá intentarse usar la técnica con espacios de búsqueda continuos, pero preferentemente cuando exista un rango de soluciones relativamente pequeño.

La **función de aptitud** no es más que la función objetivo de nuestro problema de optimización. El algoritmo genético únicamente maximiza, pero la minimización puede realizarse fácilmente utilizando el recíproco de la función maximizante (debe cuidarse, por supuesto, que el recíproco de la función no genere una división por cero). Una característica que debe tener esta función es que tiene que ser capaz de penalizar a las soluciones, y de gratificar a las buenas, de forma que sean estas últimas las que se propaguen con mayor rapidez.

La **codificación** más común de las soluciones es a través de cadenas binarias, aunque se han utilizado también números reales y letras. El primero de estos esquemas ha gozado de mucha popularidad debido a que es el que propuso originalmente Holland, y además porque resulta muy sencillo de implementar.

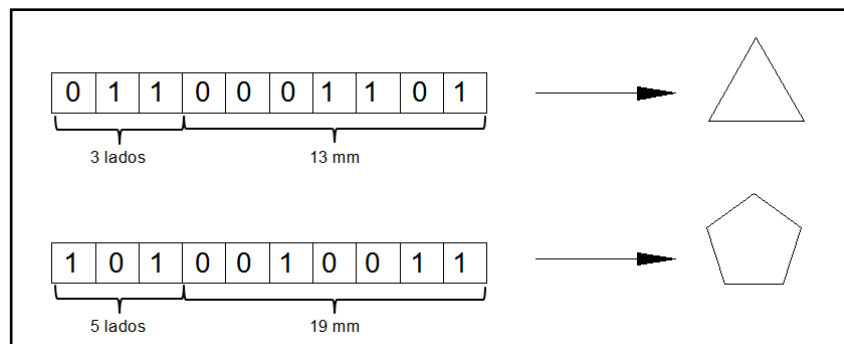


Figura 14 Codificación de individuos en AG

Fuente: “*Genetic Algorithms – in Search, Optimization and Machine Learning.*” De GOLDBERG, David E. (1989) pág. 85

2.4.7 MARCO DE DESARROLLO DE LOS AG²⁷

²⁷GOLDBERG, David E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning

Antes de continuar ahondando en la técnica de los Algoritmos Genéticos sería interesante dejarla situada dentro de un marco más amplio. Esto hace referencia a la rama de la inteligencia Artificial que se ha denominado computación evolutiva.

El término computación evolutiva se refiere al estudio de los fundamentos y aplicaciones de ciertas técnicas heurísticas de búsqueda basadas en los principios naturales de la evolución. Una gran variedad de algoritmos evolutivos han sido propuestos pero principalmente pueden clasificarse en: Algoritmos Genéticos, Programación Evolutiva, Estrategias Evolutivas, Sistemas Clasificadores y Programación Genética. Esta clasificación se basa sobre todo en detalles de desarrollo histórico más que en el hecho de un funcionamiento realmente diferente, de hecho las bases biológicas en las que se apoyan son esencialmente las mismas. Las diferencias entre ellos se centran en los operadores que se usan en cada caso y en general en la forma de implementar la selección, reproducción y sustitución de individuos en una población.

Aunque los detalles de la evolución no han sido completamente comprendidos, incluso hoy en día, existen algunos puntos en los que fundamentan:

- La evolución es un proceso que opera a nivel de cromosomas, y no a nivel de individuos. Cada individuo es codificado como un conjunto de cromosomas.
- La selección natural es el mecanismo mediante el cual los individuos mejor adaptados son los que tienen mayores probabilidades de reproducirse.
- El proceso evolutivo tiene lugar en la etapa de la reproducción. Es en esta etapa donde se reproduce la mutación, que es la causante de que los cromosomas de los hijos puedan ser diferentes a los de los padres, y el cruce, que combina los cromosomas de los padres para que los hijos tengan cromosomas diferentes.

De forma breve, pasamos a comentar cada una de los algoritmos mencionados anteriormente, para que el lector pueda tener una idea de las similitudes y diferencias entre ellas.

Los Algoritmos Genéticos.- resuelven los problemas generando poblaciones sucesivas a las que se aplican los operadores de mutación y cruce. Cada individuo

representa una solución al problema, y se trata de encontrar al individuo que represente la mejor solución.

La Programación Genética.- funciona igual que la técnica anterior pero se centra en el estudio de problemas cuya solución es un programa. De manera que los individuos de la población son programas que se acercan más o menos a realizar una tarea que es la solución.

La Programación Evolutiva.- es otro enfoque de los algoritmos genéticos que imiten lo mejor posible a la naturaleza, en cada caso, más que la relación de los padres son su descendencia. En este caso no se utiliza el operador de cruce, tomando la máxima importancia el operador de mutación.

Estrategias Evolutivas.- se centran en el estudio de problemas de optimización e incluyen una visión del aprendizaje en dos niveles: a nivel de genotipo, y a nivel de fenotipo.

Sistemas Clasificadores.- engloban el estudio de problemas en los que la solución buscada se corresponde con toda una población.

2.4.8 COMPARACIÓN CON OTROS MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN²⁸

2.4.8.1 ALGORITMOS GENÉTICOS Y MÉTODOS ENUMERATIVOS

Existe la posibilidad teórica de encontrar soluciones a problemas de optimización enumerando todas las soluciones posibles para todos los casos y posteriormente buscando la misma en la base de datos resultante. Los problemas se limitan entonces a un sistema de búsqueda eficiente de un caso en concreto. Por ejemplo los libros con tablas de logaritmos tradicionales constan de una larga serie de cálculos para todos los valores usuales. La solución consiste simplemente en buscar en la lista el número decimal y retornar el logaritmo dado.

La memorización de las tablas de multiplicar que se enseñan a los niños es otro ejemplo usual. Se espera que ante la pregunta ¿Cuánto es siete por cinco? Los niños

²⁸GOLDBERG, David E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning

respondan instantáneamente treinta y cinco si tener que estar calculando mentalmente la multiplicación.

Este método es factible siempre que el número de valores sea manejable. De otra manera el simple cálculo de los mismos se vuelve imposible.

La memorización de una serie de datos no es otra cosa que la construcción en la memoria del equivalente a una base de datos en donde se busca la pregunta y se encuentra automáticamente la respuesta.

Los Algoritmos genéticos usan heurística para la resolución del problema, lo cual limita drásticamente en número de datos a utilizar.

2.4.8.2 ALGORITMOS GENÉTICOS Y SISTEMAS EXPERTOS

Un **Sistema Experto** es un programa de computadora que encuentra soluciones a problemas de del tipo condicional con la estructura.

Los Sistemas Expertos tuvieron su apogeo en la década de los ochenta, aproximadamente de 1979 a 1985. En esa época se los llegó a considerar verdaderas panaceas que resolverían muchos de los problemas cotidianos del hombre. Incluso se formaron en ese entonces varias compañías con el objetivo específico de realizarlos y comercializarlos. Algunos fueron exitosos y funcionaron bien, pero las dificultades planteadas anteriormente no tardaron en aparecer. En particular:

- Existen temas en los cuales el conocimiento no es estático, sino que la aparición de nueva información altera las pautas o reglas de inferencia de los resultados. La necesidad permanente de reevaluar las reglas por medio de expertos humanos lleva al sistema a una operatoria lenta y burocrática.

Cada conocimiento nuevo implica rentrenar manualmente el sistema. Los Sistemas Expertos demostraron no ser útiles en este campo.

- Existen temas en los cuales la interrelación de ciertas variables no es conocida. Si la información disponible de cierto asunto es limitada, y no se conoce el comportamiento de alguna de sus variables, el sistema experto tendrá grandes dificultades de programarse ya que sus reglas serán impresas.

2.4.8.3 ALGORITMOS GENÉTICOS Y REDES NEURONALES

Una **Red Neuronal** es el intento de poder realizar una simulación computacional del comportamiento de partes del cerebro humano mediante la réplica en pequeña escala de los patrones que éste desempeña para la formación de resultados a partir de los sucesos percibidos. El cerebro consta de unidades llamadas neuronas, las cuales están conectadas entre sí formando una red (de ahí la denominación red neuronal).

Concretamente, se trata de poder analizar y reproducir el mecanismo de aprendizaje de sucesos que poseen los animales más evolucionados.

La red simula grupos de neuronas, llamados capas las cuales están relacionadas unas con otras. Los datos se introducen en la primera capa, llamada capa de entradas, cada capa transfiere la información a sus vecinas, teniendo un peso o ponderación para los valores, lo que va modificando los mismos en su paso a través de la red.

Cuando los datos llegan a la última de las capas, llamada capa de salida el valor resultante es tomado como el resultado de la red. La red puede ser entrenada para diversos usos, entre ellos como mecanismo de optimización. En este sentido, se puede expresar que serían un modelo alternativo competitivo con los Algoritmos genéticos, si se las programa para este fin. En rigor de verdades, la literatura sugiere que se podrían hacer modelos mixtos o híbridos en donde se combinen las ventajas de las redes neuronales y los Algoritmos genéticos, aunque hay muy poco material disponible en este campo. Tal vez esto se deba al hecho que los AG y el estudio de las redes forman dos ramas o escuelas separadas dentro de la inteligencia artificial, por lo que existe una preferencia en los investigadores en perfeccionar alguno de los dos modelos antes que tratar de unirlos.

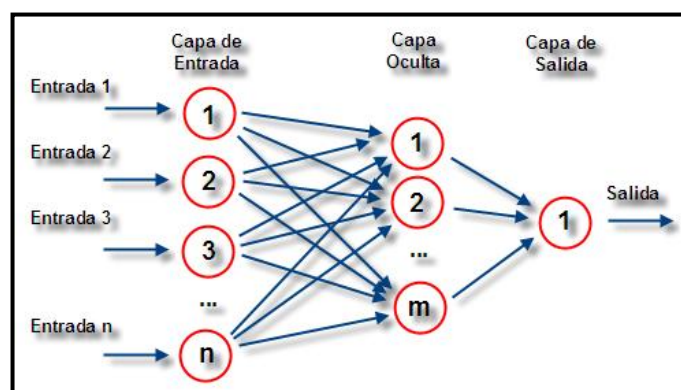


Figura 15 Esquema de una red neuronal

Fuente: "<http://jast1992.blogspot.com/>

2.4.8.4 EL ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE²⁹

El Algoritmo Genético Simple, también denominado Canónico se representa en la figura 2.4.3, como se verá a continuación, se necesita una codificación o representación del problema, que resulte adecuada al mismo. Además se requiere una función de ajuste ó adaptación al problema, la cual asigna un número real a cada posible solución codificada. Durante la ejecución del algoritmo los padres deben ser seleccionados para la reproducción, a continuación dichos padres seleccionados se cruzarán generando dos hijos, sobre cada uno de los cuales actuará un operador de mutación. El resultado de la combinación de las anteriores funciones será un conjunto de individuos (Posibles soluciones al problema), los cuales en la evolución del Algoritmo Genético formarán parte de la siguiente población.

Ahora bien; un esquema del funcionamiento general de un algoritmo genético podría ser el siguiente:

Algoritmo Genético

1. Genera una población inicial.
2. Iterar hasta un criterio de parada.
3. Evaluar cada individuo de la población.
4. Seleccionar los progenitores.
5. Aplicar el operador de cruce y mutación a estos progenitores.
6. Incluir la nueva descendencia para formar una nueva generación.

²⁹GOLDBERG, David E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning

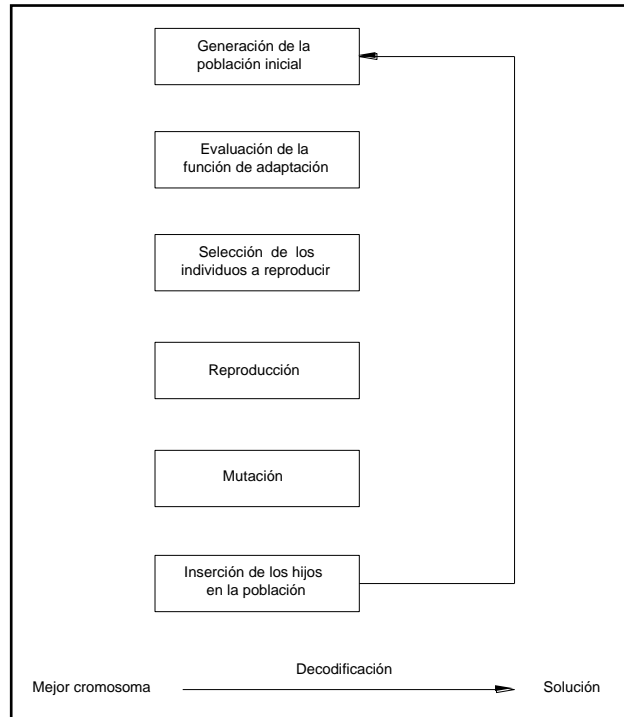


Figura 16 Esquema de un algoritmo genético básico

Fuente: “*Genetic Algorithms – in Search, Optimization and Machine Learning.*” De GOLDBERG, David E. (1989) pág. 118

2.4.8.4.1 CODIFICACIÓN

Se supone que los individuos (posibles soluciones del problema), pueden representarse como un conjunto de parámetros (que denominaremos genes), los cuales agrupados forman una ristra de valores (a menudo referida como cromosoma). Si bien el alfabeto utilizado para representar los individuos no debe necesariamente estar constituido por el (0,1), buena parte de la teoría en la que se fundamentan los Algoritmos Genéticos utilizad dicho alfabeto. En términos biológicos, el conjunto de parámetros representando un cromosoma particular denomina fenotipo. El fenotipo contiene la información requerida para construir un organismo, el cual se refiere como genotipo. Los mismos términos se utilizan en el campo de los Algoritmos Genéticos. La adaptación al problema de un individuo depende de la evaluación del genotipo. Esta última puede inferirse a partir del fenotipo, es decir puede se computada a partir del cromosoma, usando la función de evaluación. La función de adaptación debe ser diseñada para cada problema de manera específica. Dado un

cromosoma particular, la función de adaptación le asigna un número real que se supone refleja el nivel de adaptación al problema del individuo representado por el cromosoma.

Durante la fase reproductiva se seleccionan los individuos de la población para cruzarse y producir descendientes, que constituirán, una vez mutados, la siguiente generación de individuos. La selección de padres se efectúa al azar usando un procedimiento que favorezca a los individuos mejor adaptados, ya que a cada individuo se le asigna una probabilidad de ser seleccionado que es proporcional a su función de adaptación. Este procedimiento se dice que está basado en la ruleta sesgada. Según dicho esquema, los individuos bien adaptados se escogerán probablemente varias veces por generación, mientras que, los pobremente adaptados al problema, no se escogerán más que de vez en cuando.

Una vez seleccionados dos padres, sus cromosomas se combinan, utilizando habitualmente los operadores de cruce y mutación. Las formas básicas de dichos operadores se describen a continuación.

El operador de cruce.- coge dos padres seleccionados y corta sus ristas de cromosomas en una posición escogida al azar, para producir dos subristras iniciales y dos subristras finales. Después se intercambian las subristras finales, produciéndose dos nuevos cromosomas completos (véase la Figura 2.4.4). Ambos descendientes heredan genes de cada uno de los padres. Este operador se conoce como operador de cruce basado en un punto.

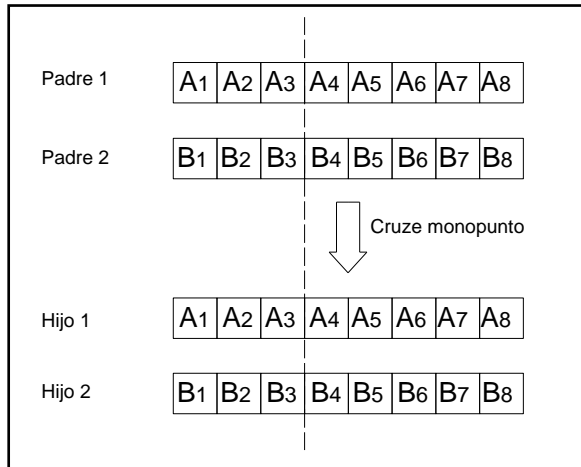


Figura 17 Esquema de un cruce de un solo punto en un AG

Fuente: “*Genetic Algorithms – in Search, Optimization and Machine Learning.*” De GOLDBERG, David E. (1989) pág. 85

Habitualmente el operador de cruce no se aplica a todos los pares de individuos que han sido seleccionados para emparejarse, sino que se aplica de manera aleatoria, normalmente con una probabilidad comprendida entre 0.5 y 1.0. En el caso en que el operador de cruce no se aplique, la descendencia se obtiene simplemente duplicando los padres.

El operador de mutación.- se aplica a cada hijo de manera individual, y consiste en la alteración aleatoria (normalmente con probabilidad pequeña) de cada gen componente del cromosoma. La Figura 18 muestra la mutación del octavo gen del cromosoma.

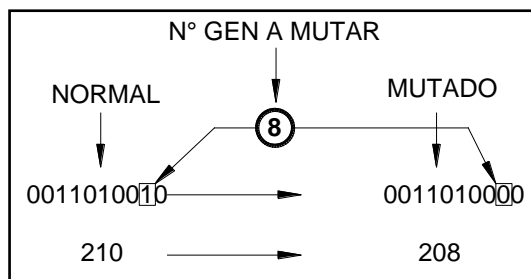


Figura 18 Esquema de mutación de un individuo en AG

Elaborado por: Andrés Donoso - Stalin Parreño

Sí bien puede en principio pensarse que el operador de cruce es más importante que el operador de mutación, ya que proporciona una exploración rápida del espacio de búsqueda, éste último asegura que ningún punto del espacio de búsqueda tenga probabilidad cero de ser examinado, y es de capital importancia para asegurar la convergencia de los Algoritmos Genéticos.

Si el Algoritmo Genético ha sido correctamente implementado, la población evolucionará a lo largo de las generaciones sucesivas de tal manera que la adaptación media extendida a todos los individuos de la población, así como la adaptación del mejor individuo se irán incrementando hacia el óptimo global. El concepto de convergencia está relacionado con la progresión hacia la uniformidad, un gen ha convergido cuando al menos el 95 % de los individuos de la población comparten el mismo valor para dicho gen. Se dice que la población converge cuando todos los genes han convergido. Se puede generalizar dicha definición al caso en que al menos un poco de los individuos de la población hayan convergido. A medida que el número de generaciones aumenta, es más probable que la adaptación media se aproxime a la del mejor individuo.

2.4.8.4.2 POBLACIÓN

2.4.8.4.2.1 TAMAÑO DE LA POBLACIÓN

Una cuestión que uno puede plantearse es lo relacionado con el tamaño idóneo de la población. Parece intuitivo que las poblaciones pequeñas corren el riesgo de no cubrir adecuadamente el espacio de búsqueda, mientras que el trabajar con poblaciones de gran tamaño puede acarrear problemas relacionados con el excesivo costo computacional.

Goldberg efectuó un estudio teórico, obteniendo como conclusión que el tamaño óptimo de la población para ristas de longitud l , con codificación binaria, crece exponencialmente con el tamaño de la rista³⁰.

Este resultado traería como consecuencia que la aplicabilidad de los Algoritmos Genéticos en problemas reales sería muy limitada, ya que resultarían no competitivos con otros métodos de optimización combinatoria. Alander, basándose en evidencia empírica sugiere que un tamaño de población comprendida entre 1 y 21 es suficiente para atacar con éxito los problemas por él, considerados.

2.4.8.4.2 POBLACIÓN INICIAL

Habitualmente la población inicial se escoge generando ristas al azar, pudiendo contener cada gen uno de los posibles valores del alfabeto con probabilidad uniforme. Se podría preguntar qué es lo que sucedería si los individuos de la población inicial se obtuviesen como resultado de alguna técnica heurística o de optimización local. En los pocos trabajos que existen sobre este aspecto, se constata que esta inicialización no aleatoria de la población inicial, puede acelerar la convergencia del algoritmo genético. Sin embargo en algunos casos la desventaja resulta ser la prematura convergencia del algoritmo, queriendo indicar con esto la convergencia hacia óptimos locales.

2.4.8.4.3 FUNCIÓN OBJETIVO

De acuerdo con el problema que se desea desarrollar, se debe definir la forma matemática de la función que debemos mejorar (ya sea maximizar o minimizar), y es el mecanismo de evolución de las generaciones.³¹

³⁰GOLDBERG, David E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning

³¹OTERO, Patricia Gómez. Estudio de los Algoritmos genéticos para el desarrollo de sistemas de control.

Dos aspectos que resultan cruciales en el comportamiento de los algoritmos genéticos son la determinación de una adecuada función de adaptación o función objetivo, así como la codificación utilizada.

Idealmente interesaría construir funciones objetivo con ciertas regularidades, es decir funciones objetivo que verifiquen que para dos individuos que se encuentren cercanos en el espacio de búsqueda, sus respectivos valores en las funciones objetivo sean similares. Por otra parte una dificultad en el comportamiento del algoritmo genético puede ser la existencia de gran cantidad de óptimos locales, así como el hecho de que el óptimo global se encuentre muy aislado.

La regla, general para construir una buena función objetivo es que ésta debe reflejar el valor del individuo de una manera real, pero en muchos problemas de optimización combinatoria, donde existe gran cantidad de restricciones, buena parte de los puntos del espacio de búsqueda representan individuos no válidos.

Para este planteamiento en el que los individuos están sometidos a restricciones, se han propuesto varias soluciones. La primera sería la que podríamos denominar absolutista, en la que aquellos individuos que no verifican las restricciones, no son considerados como tales, y se siguen efectuando cruces y mutaciones hasta obtener individuos válidos, o bien, a dichos individuos se les asigna una función objetivo igual a cero.

Otra posibilidad consiste en reconstruir aquellos individuos que no verifican las restricciones. Dicha reconstrucción suele llevarse a cabo por medio de un nuevo operador que se acostumbra a denominar reparador.

Otro enfoque está basado en la penalización de la función objetivo. La idea general consiste en dividir la función objetivo del individuo por una cantidad (la penalización) que guarda relación con las restricciones que dicho individuo viola.

Dicha cantidad puede simplemente tener en cuenta el número de restricciones violadas ó bien el denominado costo esperado de reconstrucción, es decir el coste asociado a la conversión de dicho individuo en otro que no viole ninguna restricción.

Otra técnica que se ha venido utilizando en el caso en que la computación de la función objetivo sea muy compleja, se la denomina evaluación aproximada de la función objetivo. En algunos casos la obtención de n funciones objetivo aproximadas puede resultar mejor que la evaluación exacta de una única función objetivo

(supuesto el caso de que la evaluación aproximada resulta como mínimo n veces más rápida que la, evaluación exacta).

Un problema habitual en las ejecuciones de los Algoritmos Genéticos surge debido a la velocidad con la que el algoritmo converge. En algunos casos la convergencia es muy rápida, lo que suele denominarse convergencia prematura, en la cual el algoritmo converge hacia óptimos locales, mientras que en otros casos el problema es justo lo contrario, es decir se produce una convergencia lenta del algoritmo. Una posible solución a estos problemas pasa por efectuar transformaciones en la función objetivo. El problema de la convergencia prematura, surge a menudo cuando la selección de individuos se realiza de manera proporcional a su función objetivo. En tal caso, pueden existir individuos con una adaptación al problema muy superior al resto, que a medida que avanza el algoritmo dominan a la población. Por medio de una transformación de la función objetivo, en este caso una comprensión del rango de variación de la función objetivo, se pretende que dichos súper-individuos no lleguen a dominar a la población.

El problema de la lenta convergencia del algoritmo, se resolvería de manera análoga, pero en este caso efectuando una expansión del rango de la función objetivo.

La idea de especies de organismos, ha sido imitada en el diseño de los algoritmos genéticos en un método propuesto por Goldberg y Richardson, utilizando una modificación de la función objetivo de cada individuo, de tal manera que individuos que estén muy cercanos entre sí devalúen su función objetivo, con objeto de que la población gane en diversidad.³²

2.4.8.4.4 SELECCIÓN

La función de selección de padres más utilizada, es la denominada función de selección proporcional a la función objetivo, en la cual cada individuo tiene una, probabilidad de ser seleccionado como padre que es proporcional al valor de su función objetivo.

³²ASHQUI LAGUA, Félix Armando, DISEÑO A FLEXIÓN DE VIGAS RECTANGULARES DE HORMIGÓN ARMADO BASADO EN LA NORMATIVA ECUATORIANA Y MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS , 2011.

Una de las maneras de superar el problema relacionado con la rápida convergencia proveniente de los súper-individuos, que surge al aplicar la anterior función de selección, es el efectuar la selección proporcional al rango del individuo, con lo cual se produce una repartición más uniforme de la probabilidad de selección.

2.4.8.4.5 CRUCE

El Algoritmo Genético Canónico descrito anteriormente utiliza el cruce basado en un punto, en el cual los dos individuos seleccionados para jugar el papel de padres, son recombinados por medio de la selección de un punto de corte, para posteriormente intercambiar las secciones que se encuentran a la derecha de dicho punto.

Se han investigado otros operadores de cruce, habitualmente teniendo en cuenta más de un punto de cruce. De Jong investigó el comportamiento del operador de cruce basado en múltiples puntos, concluyendo que el cruce basado en dos puntos, representaba una mejora mientras que añadir más puntos de cruce no beneficiaba el comportamiento del algoritmo. La ventaja de tener más de un punto de cruce radica en que el espacio de búsqueda puede ser explorado más fácilmente, siendo la principal desventaja el hecho de aumentar la probabilidad de ruptura de buenos esquemas. En el operador de cruce basado en dos puntos, los cromosomas (individuos) pueden contemplarse como un circuito en el cual se efectúa la selección aleatoria de dos puntos.

Desde este punto de vista, el cruce basado en un punto, puede verse como un caso particular del cruce basado en dos puntos, en el cual uno de los puntos de corte se encuentra fijo al comienzo de la ristra que representa al individuo.

En el denominado operador de cruce uniforme (Syswerda) cada gen, en la descendencia se crea copiando el correspondiente gen de uno de los dos padres, escogido de acuerdo a una máscara de cruce generada aleatoriamente. Cuando existe un 1 en la máscara de cruce, el gen es copiado del primer padre, mientras que cuando exista un 0 en la máscara de cruce, el gen se copia del segundo padre.

En la literatura, el término operador de cruce uniforme se relaciona con la obtención de la máscara de cruce uniforme, en el sentido de que cualquiera de los elementos del alfabeto tenga asociada la misma probabilidad. Hablando en términos de la teoría de la probabilidad la máscara de cruce está compuesta por una muestra aleatoria de tamaño A extraída de una distribución de probabilidad de Bernoulli de parámetro $1/2$.

Si tuviésemos en cuenta el valor de la función de adaptación de cada padre en el momento de generar la máscara de cruce, de tal manera que cuanto mayor sea la función de adaptación de un individuo, más probable sea heredar sus características, podríamos definir, un operador de cruce basado en la función objetivo, en el cual la máscara de cruce se interpreta como una muestra aleatoria de tamaño 1 proveniente de una distribución de Bernoulli de parámetro.

2.4.8.4.6 MUTACIÓN³³

La mutación se considera un operador básico, que proporciona un pequeño elemento de aleatoriedad en la vecindad (entorno) de los individuos de la población. Si bien se admite que el operador de cruce es el responsable de efectuar la búsqueda a lo largo del espacio de posibles soluciones, también parece desprenderse de los experimentos efectuados por varios investigadores que el operador de mutación va ganando en importancia a medida que la población de individuos va convergiendo (Davis).

Schaffer y col. encuentran que el efecto del cruce en la búsqueda es inferior al que previamente se esperaba. Utilizan la denominada evolución primitiva, en la cual, el proceso evolutivo consta tan sólo de selección y mutación. Encuentran que dicha evolución primitiva supera con creces a una evolución basada exclusivamente en la selección y el cruce. Otra conclusión de su trabajo es que la determinación del valor óptimo de la probabilidad de mutación es mucho más crucial que el relativo a la probabilidad de cruce.

³³GOLDBERG, David E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning

La búsqueda del valor óptimo para la probabilidad de mutación, es una cuestión que ha sido motivo de varios trabajos. Se recomienda la utilización de una probabilidad de mutación del bit de $(1/L)$, siendo L la longitud de la cadena.

Si bien en la mayoría de las implementaciones de Algoritmos Genéticos se asume que tanto la probabilidad de cruce como la de mutación permanecen constantes, algunos autores han obtenido mejores resultados experimentales modificando la probabilidad de mutación a medida que aumenta el número de iteraciones³⁴.

La mutación se encarga de modificar en forma aleatoria uno o más genes del cromosoma de un descendiente. De esta manera, la tasa de mutación indica el porcentaje de bits que se deben mutar (cambiar de 0 a 1 o viceversa en el caso binario). El valor típico de la tasa de mutación es de 0.05³⁵

³⁴GOLDBERG, David E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning

³⁵Estudio de los Algoritmos genéticos para el desarrollo de sistemas de control, Patricia Gómez Otero

CAPÍTULO III

3 MARCO METODOLÓGICO

3.1 SISTEMATIZACIÓN DE LA METODOLOGÍA A EMPLEARSE

Para el siguiente estudio se realizó un proceso sistemático, que se detalla a continuación:

1. Estudio y análisis del método de diseño de columnas mixtas sometidas a flexocompresión biaxial, condiciones de diseño y ecuaciones.
2. Investigación y análisis de la estructura de algoritmo genético.
3. Determinación de variables del algoritmo genético para el diseño columnas mixtas sometidas a flexocompresión biaxial.
4. Determinación de la función objetivo del algoritmo genético dirigida al diseño de columnas mixtas sometidas a flexocompresión biaxial.
5. Establecer limitación del algoritmo genético para el diseño de columnas mixtas.
6. Formulación del modelo matemático que rige el algoritmo genético para el diseño de columnas mixtas.
7. Implementación del algoritmo genético en el diseño de columnas mixtas.
8. Aplicación del algoritmo genético a columnas mixtas reales.
9. Comparación de resultados entre el método tradicional de cálculo y el algoritmo genético.

3.1.1 ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL MÉTODO DE DISEÑO DE COLUMNAS MIXTAS SOMETIDAS A FLEXOCOMPRESIÓN BIAXIAL, CONDICIONES DE DISEÑO Y ECUACIONES.

Esta es la primera etapa del estudio en la cual se analizara a fondo los fundamentos e hipótesis en las cuales se basara el diseño de columnas mixtas sometidas a flexocompresión biaxial.

En esta etapa se hizo imprescindible realizar de una forma detallada la deducción de ecuaciones que rigen el diseño de columnas mixtas de acero rellenas de hormigón sometidas a flexocompresión biaxial, las cuales fueron de gran importancia en la determinación del modelo matemático que va a regir el algoritmo genético y componentes tales como función objetivo y limitaciones.

3.1.2 INVESTIGACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE ALGORITMO GENÉTICO.

En esta fase se estudió la estructuración de un algoritmo genético y se considera como fundamental para el desarrollo de este proyecto. Posteriormente se programó un algoritmo genético mismo que después de haberlo sometido a suficientes pruebas se lo puede reconocer como método de optimización, lo cual es nuestro objetivo.

3.1.3 DETERMINACIÓN DE VARIABLES DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE COLUMNAS MIXTAS SOMETIDAS A FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL.

Posteriormente luego de haber analizado en forma teórica y puesto en práctica el algoritmo genético básico se procede a la determinación de variables tanto del diseño de columnas mixtas como las necesarias para el algoritmo genético que en nuestro caso fueron: Base (bf), ancho (hw) y espesor (t) de la columna.

3.1.4 DETERMINACIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO DEL ALGORITMO GENÉTICO DIRIGIDA AL DISEÑO DE COLUMNAS MIXTAS SOMETIDAS A FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL.

En esta etapa se determinara un sistema de evaluación que medirá el comportamiento de las variables que encontrara el algoritmo genético, y es responsable de la minimización de las funciones que se vaya a optimizar, esta es la encargada de regular los factores que forman parte de las ecuaciones de búsqueda.

3.1.5 ESTABLECER LIMITACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE COLUMNAS MIXTAS.

Se procedió a determinar las condiciones y restricciones que debían cumplir las variables que conforman la población obtenida en cada individuo y cada generación las misma que después de un proceso de selección de los individuos más aptos o los que mejor minimizan la función objetivo, pasan a la siguiente generación, concediéndoles el derecho de reproducirse, con lo cual garantizamos que el material genético o información se reproduzca en las siguientes generaciones, obviamente después de la combinación del material genético de otros individuos que igualmente fueron seleccionados por el algoritmo genético. Así sucesivamente los individuos por n generaciones van evolucionando hasta que los individuos llegan a su límite de convergencia, es decir hasta que no exista otra solución que produzca mejores resultados al aplicarlas en conjunto con todas las demás variables, mediante las restricciones se ha logrado controlar que las soluciones cumplan con la normativa para diseño de columnas mixtas que propone el AISC-LRFD.

3.1.6 FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO QUE RIGE EL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO DE COLUMNAS MIXTAS.

Luego de haber determinado variables, restricciones y función objetivo para poder aplicar el algoritmo genético, se posee todas las herramientas necesarias para poder formular nuestro modelo matemático, que servirá como la trayectoria a seguir para utilizar el algoritmo genético y su programación, este modelo matemático es el encargado de determinar la idoneidad o no de los individuos de cada población de acuerdo a su función de selección, las ecuación que servirá para evaluación tanto para columnas rectangulares como circulares son:

Para columnas rectangulares

$$Z = \left(\left(\frac{(X1-2X3)*(X2-2X3)}{100^3} \right) * 100 * P1 \right) + \left((X1 * X2) - ((X1 - 2X3) * (X2 - 2X3)) \right) * 100 * 0.00785 * P2$$

Para columnas circulares

$$Z = \left(\left(\frac{\pi*(X1-2X2)^2}{100^3} \right) * 100 * P1 \right) + \left((\pi * X1^2) - (\pi * (X1 - 2X2)^2) \right) * 100 * 0.00785 * P2$$

Donde

Z= costo por metro lineal de columna diseñada por el algoritmo genético.

X1= para columnas rectangulares y cuadradas es la base del perfil de acero, mientras que para columnas circulares es el diámetro exterior del perfil de acero.

X2= para columnas rectangulares y cuadradas es la altura del perfil de acero, mientras que para columnas circulares es el espesor del perfil de acero.

X3= para columnas rectangulares y cuadradas es el espesor del perfil de acero.

P1= costo de un metro cubico de hormigón en nuestro caso dólares.

P2= costo de un Kg de acero estructura en dólares

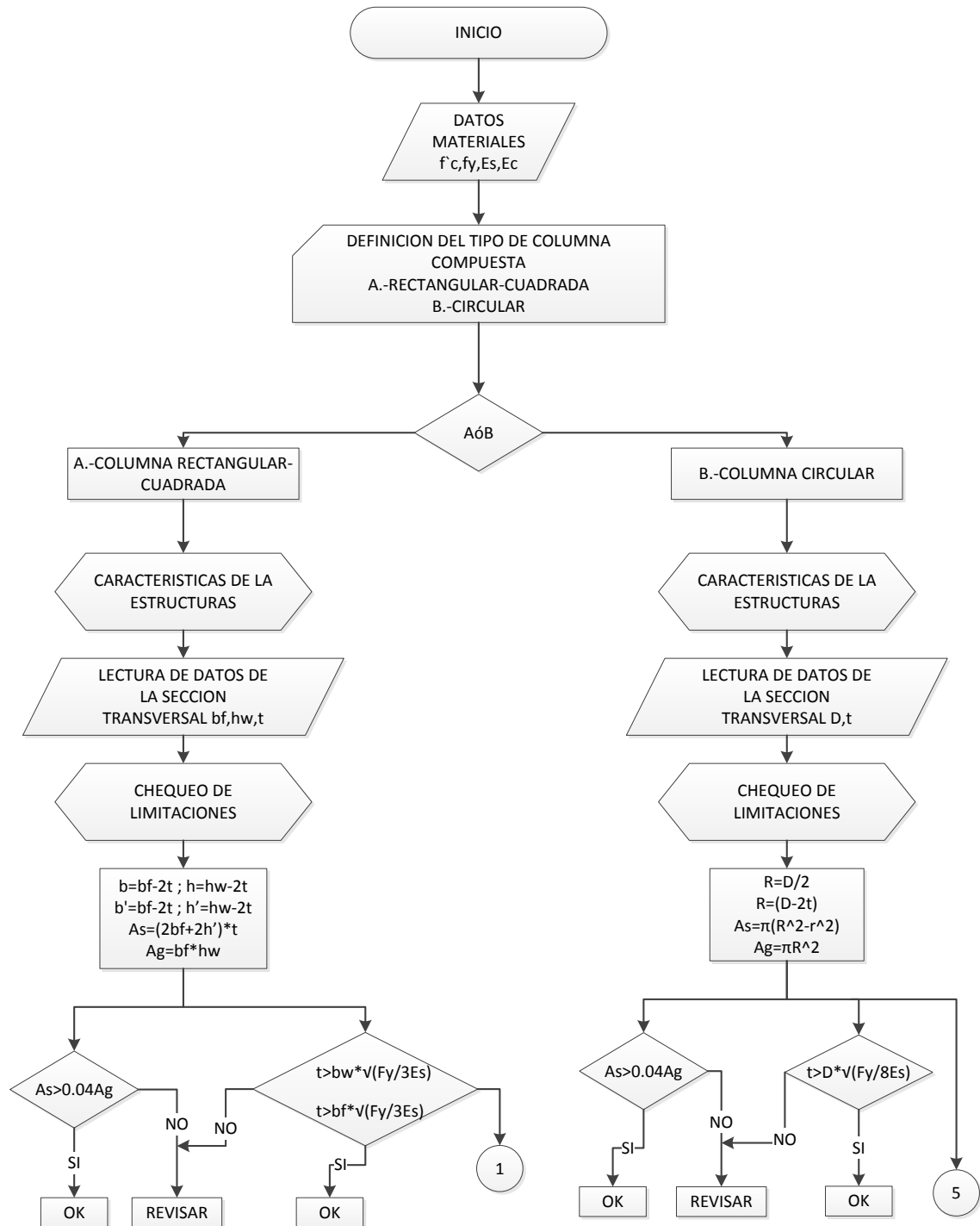
El factor $\frac{1}{100^3}$ transforma a dólares/cm³ las unidades de P1, y el factor 0,00785 Kg/cm³ es el peso específico del acero, ambos multiplicados por la longitud de 100 cm, con la que se transforma en volumen tanto el hormigón como el acero.

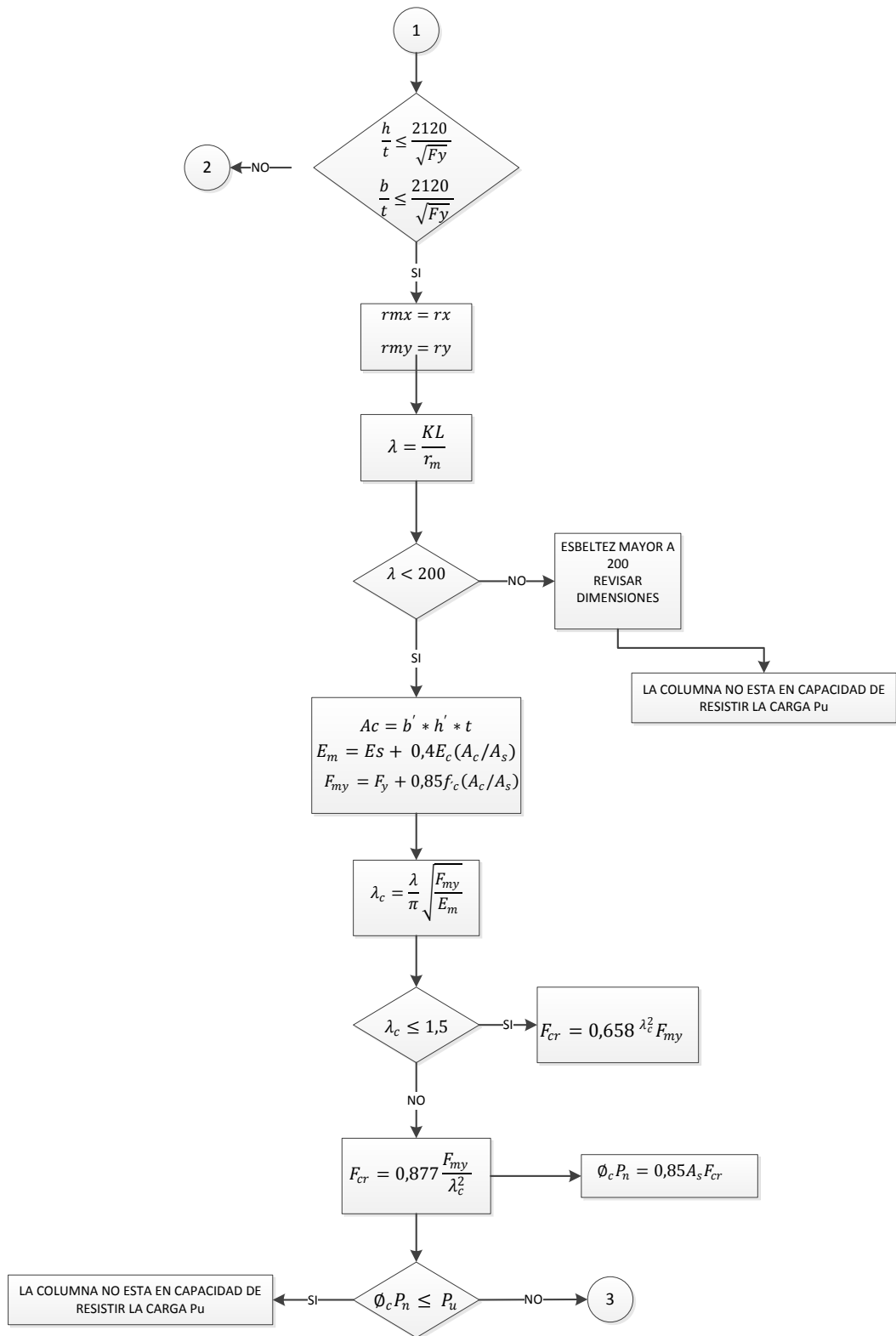
Uno de los principales objetivos al implementar un algoritmo genético al diseño a Flexocompresión biaxial de columnas mixtas es el de encontrar la columna más económica y esto se refleja en la ecuación de la función objetivo que es minimizar el costo total que implica la combinación eficiente de materiales.

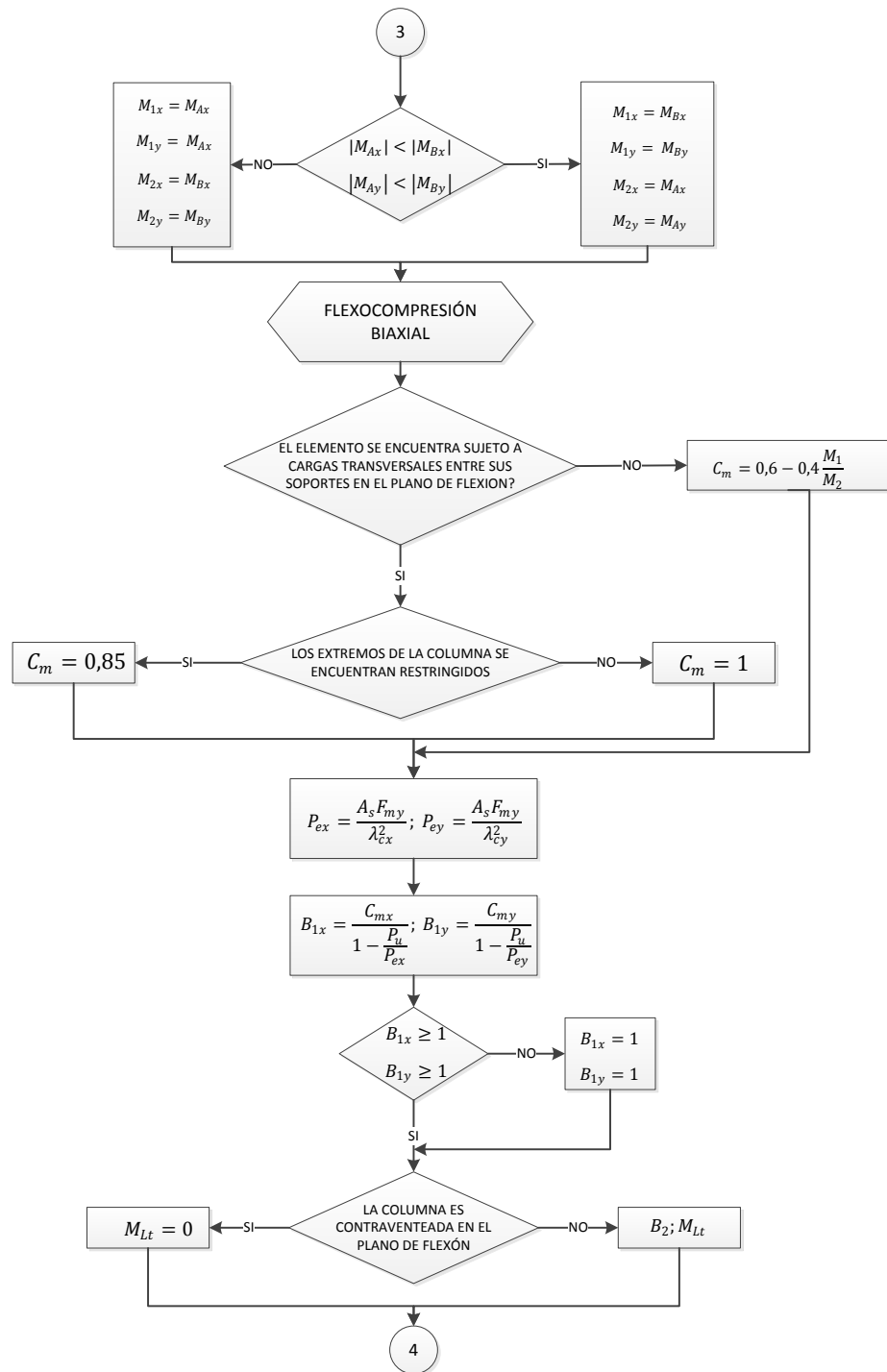
Estas funciones objetivo deben estar sujetas a restricciones es decir ecuaciones dadas por el LRFD para el diseño de columnas mixtas, el algoritmo ira evaluando cada generación para determinar las óptimas que brinden una minimización de costo, y que además cumplan con la normativa que a continuación mostramos en el siguiente diagrama de flujo:

Figura 19 Diseño LFRD para columnas rectangulares mixtas de acero rellenas de hormigón sometidas a flexocompresión biaxial.

Elaborado Por: Andrés Donoso-Stalin Parreño







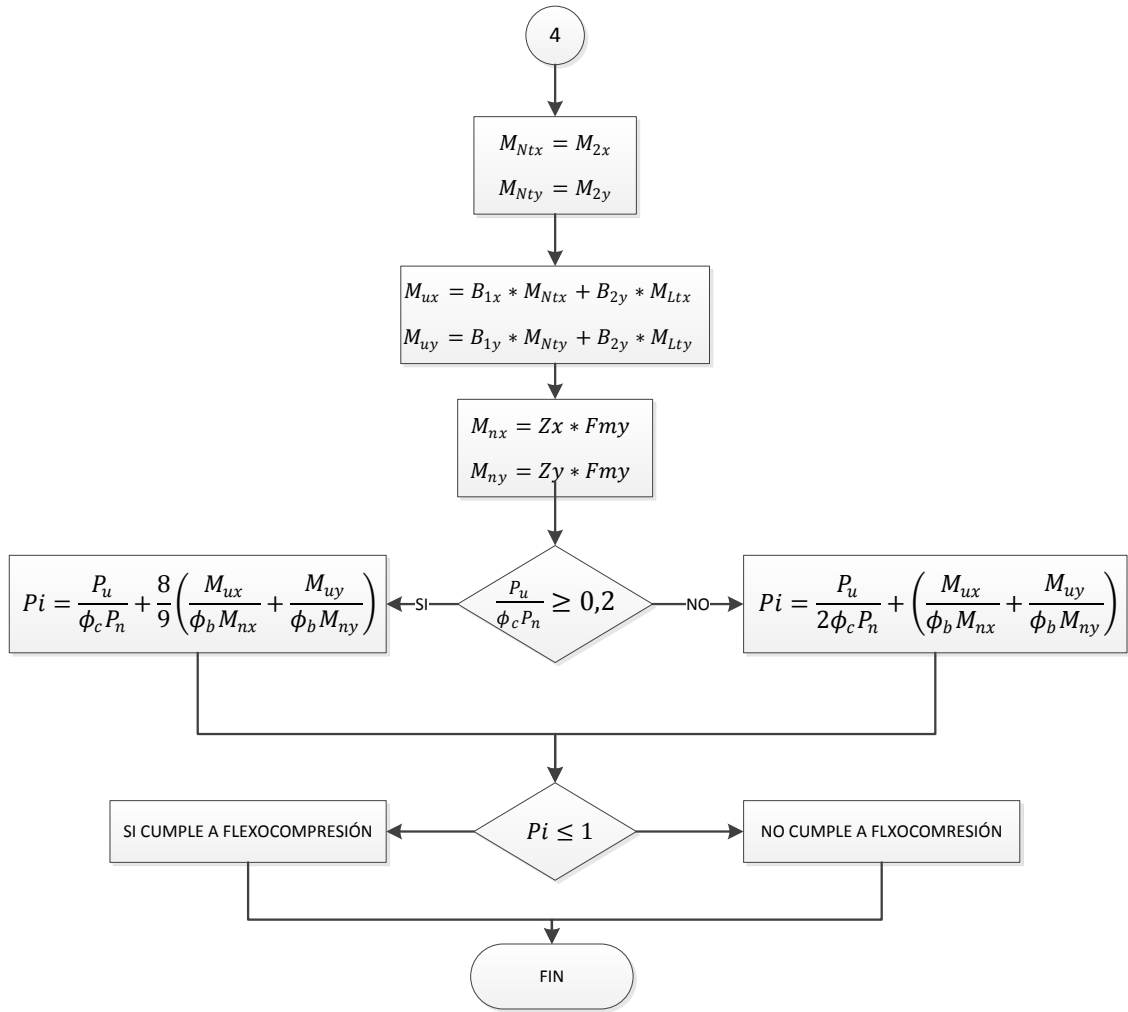
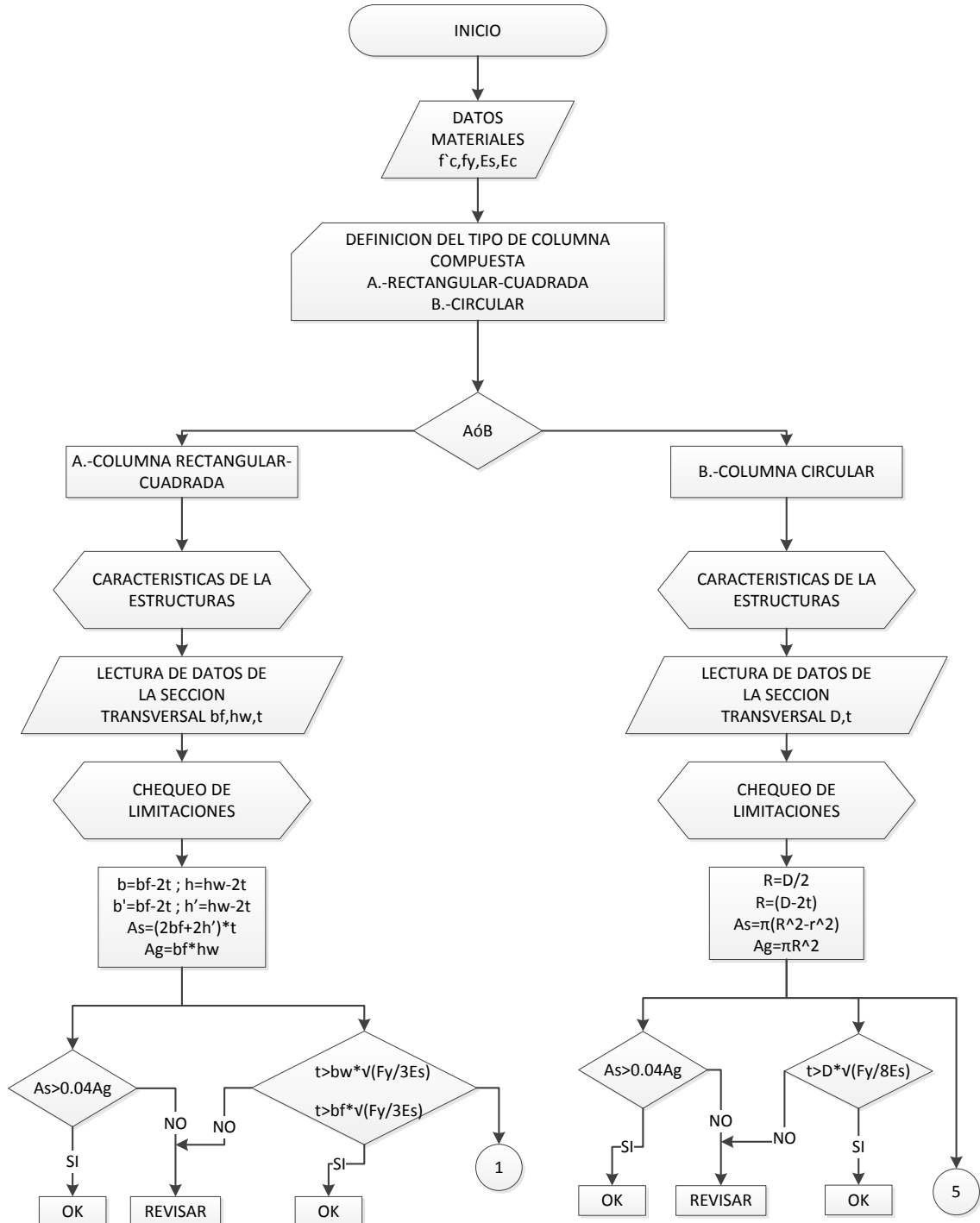
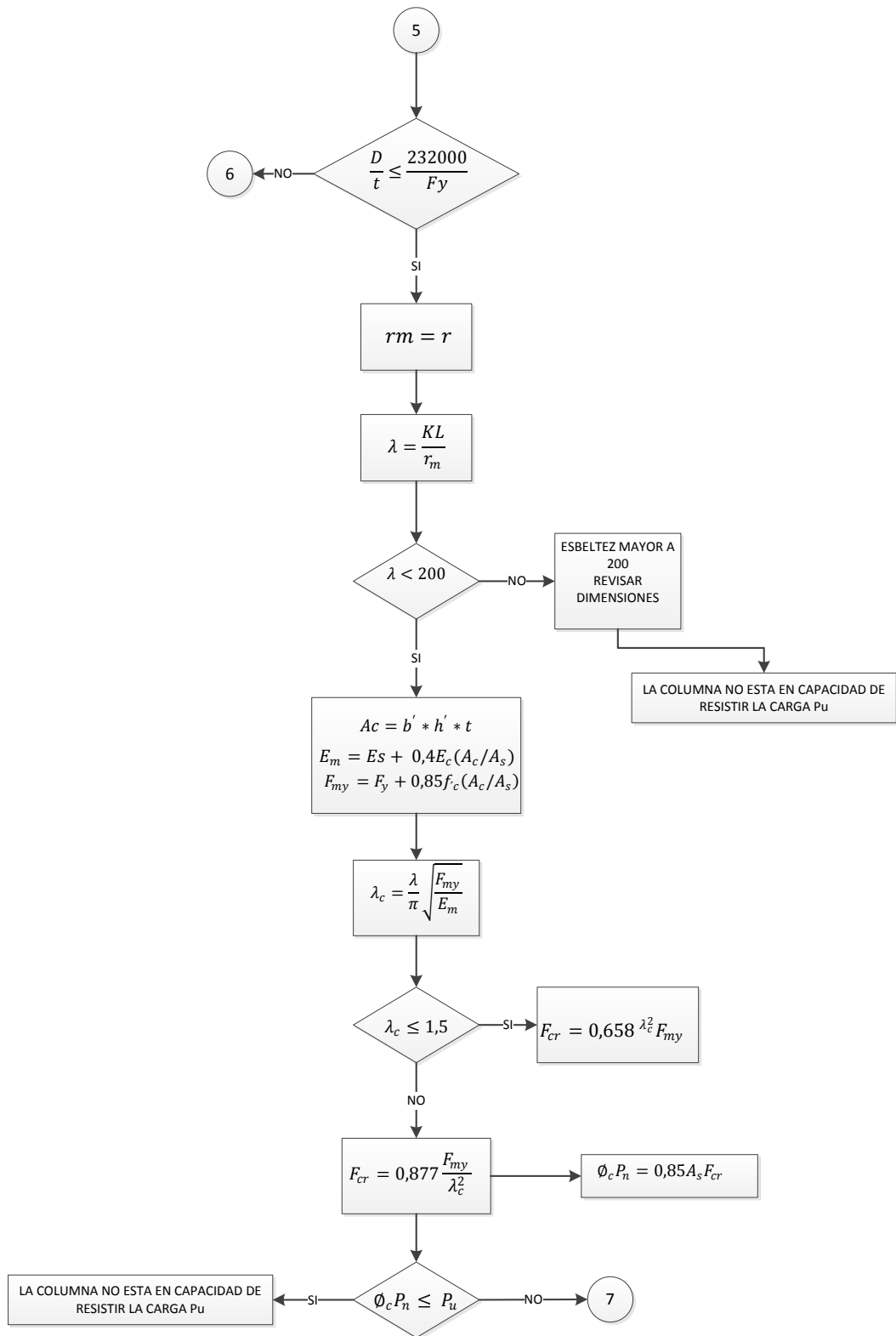
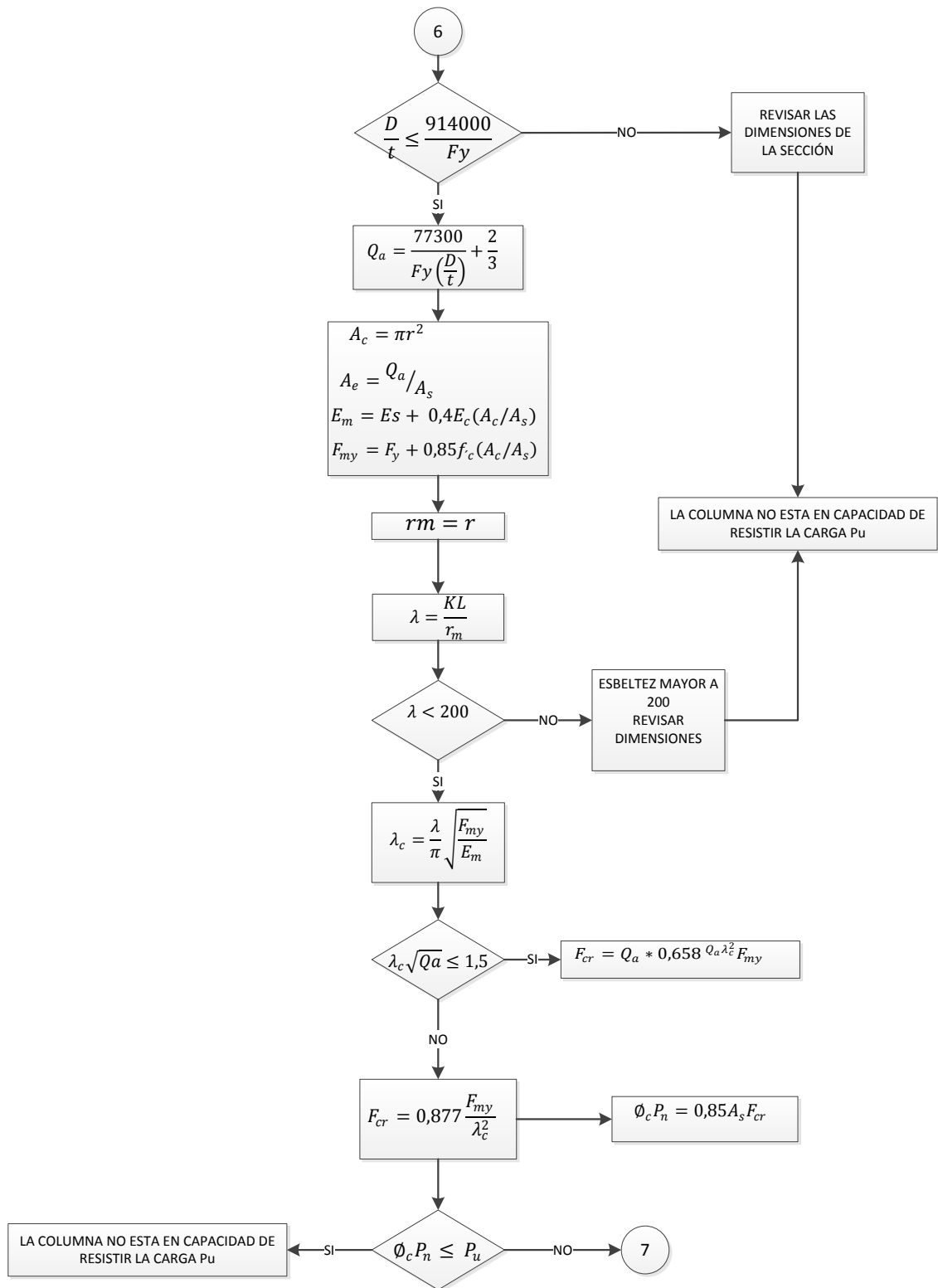


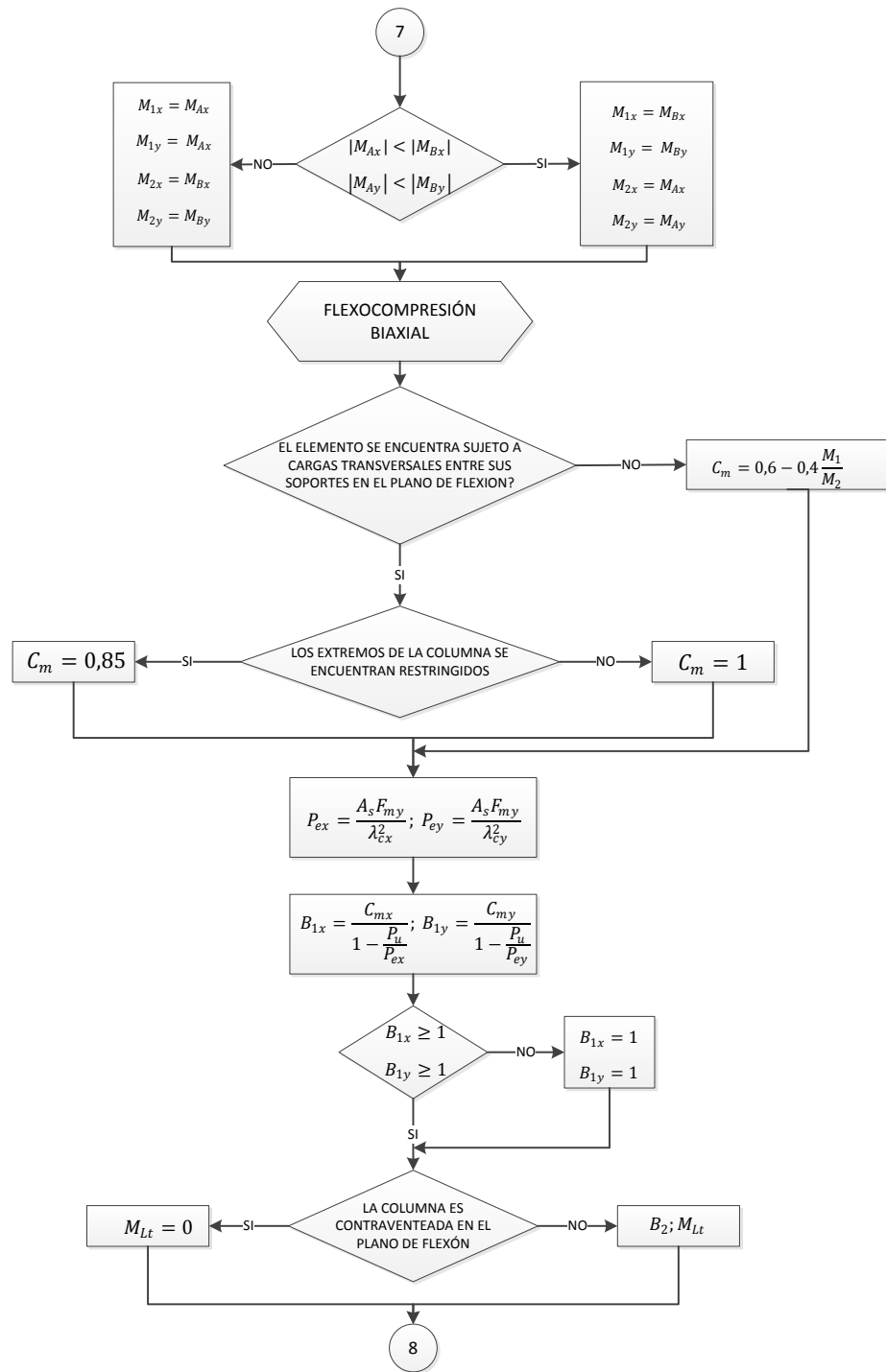
Figura 20 Diseño LRFD para columnas circulares mixtas de acero rellenas de hormigón sometidas a flexocompresión biaxial.

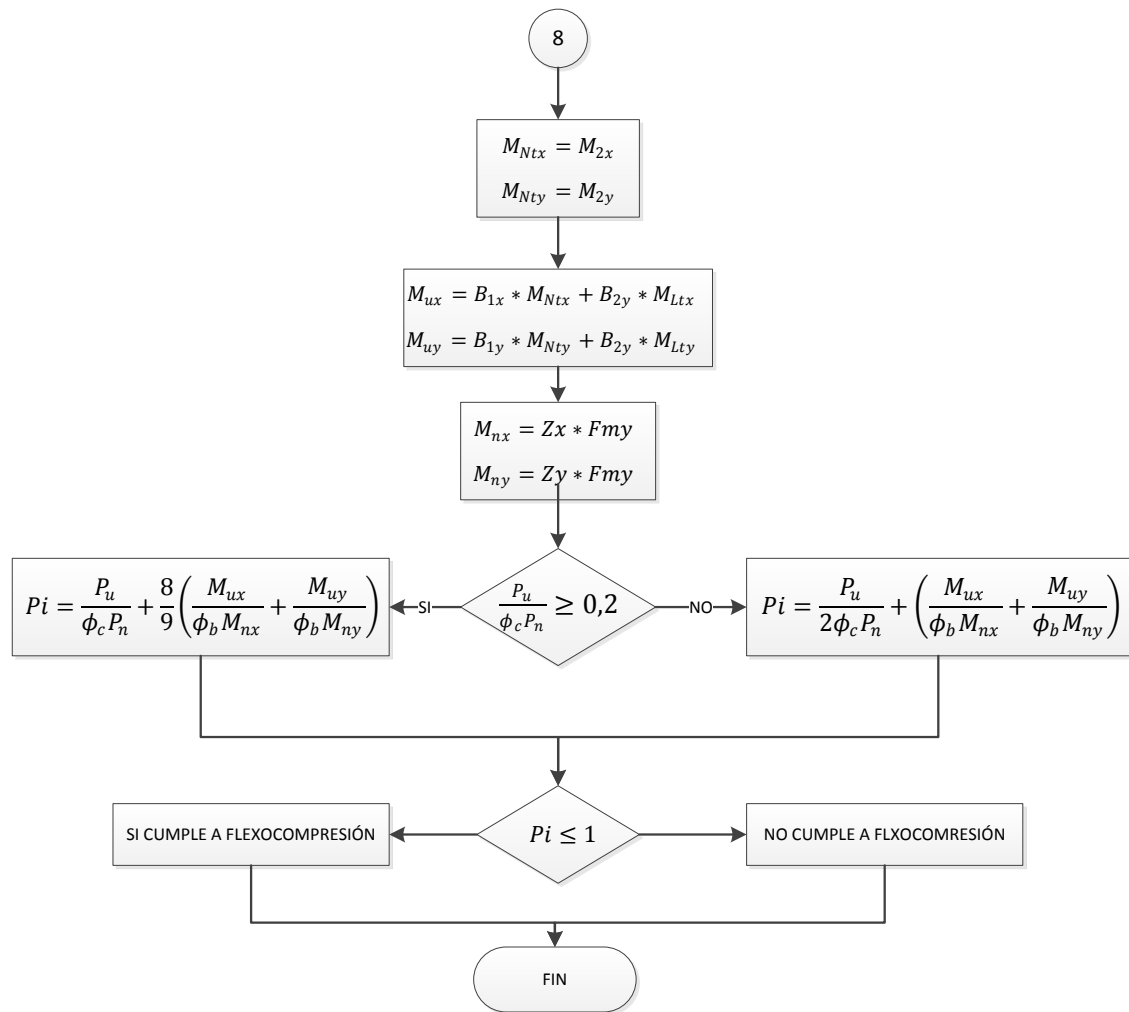
Elaborado Por: Andrés Donoso-Stalin Parreño











3.1.7 Implementación del Algoritmo Genético para el diseño de columnas mixtas sometidas a flexocompresión biaxial.

Al llegar a esta etapa ya hemos determinado nuestras funciones objetivas y nuestras ecuaciones de diseño, por lo cual empezamos a implementar el Algoritmo Genético que es totalmente programable utilizando el lenguaje de programación web a través del software Net Beans versión 7.3

Empezamos con un modelo básico del algoritmo genético, para cuequear columnas previamente diseñadas a mano, se realizaron varios cambios al Algoritmo básico ya que en primera instancia se usó una sola variable hasta llegar a programarla con las necesarias para nuestro caso, y por otro lado los cambio se hicieron ya que

inicialmente obteníamos resultados completamente fuera de la realidad sobre todo en lo que se refiere a dimensiones.

3.1.8 Aplicación del algoritmo genético a columnas mixtas reales.

Una vez programado el algoritmo genético para el diseño a flexocompresión de columnas mixtas, en forma obligatoria se pasa por una serie de pruebas que determinen la idoneidad del mismo, con lo cual se inicia el proceso de pruebas en ejemplos planteados de elementos reales, en este proceso se encontraron una serie de falencias que se fueron salvando al ir evolucionando el diseño de algoritmo entre los cuales resaltamos:

- Lógica del proceso del planteamiento del algoritmo.
- Pérdida del óptimo por degeneración.

3.1.9 Comparación de resultados entre el diseño tradicional y utilizando el Algoritmo genético.

En esta etapa analizamos los resultados de los diseños obtenidos mediante el método tradicional y mediante la aplicación del programa computarizado DEAC 1.0 desarrollado como propuesta en la presente investigación, con la finalidad de obtener resultados que nos ayuden a determinar similitudes y diferencias para así emitir juicios de valor con el objetivo de demostrar la idoneidad del Software realizado.

3.2 TIPO DE ESTUDIO.

Para el siguiente estudio fue necesaria la aplicación de varios tipos de investigación los cuales detallamos a continuación:

En primera instancia es una investigación de tipo descriptiva, ya que la aplicación del algoritmo genético es un campo poco difundido por lo cual se necesita una descripción del funcionamiento y las bases científicas para que el lector asimile de una forma total el estudio.

Al analizar el proyecto también se hace necesario una investigación experimental, pues cumple con las tres condiciones esenciales de este tipo, las mismas que son:

1. Se puede manipular las variables independientes.
2. Se puede medir el efecto que produce las variables independientes sobre las dependientes.
3. Se tiene un control interno de la situación experimental.

Cabe recalcar que sí, en forma física no se desarrolla la experimentación en un laboratorio convencional, los datos son procesados en un laboratorio virtual, pues al desarrollar un algoritmo genético se manipulan directamente variables para al final llegar a obtener conclusiones coherentes.

A así mismo, según la naturaleza del estudio, utilizamos un investigación cuantitativa, pues se maneja valore numéricos directos, lo cual se relaciona con la investigación de tipo experimental.

Al encontrarse este proyecto dentro de un campo innovador, el nivel de la investigación es aplicativo pues la innovación es una de las principales características de la misma.

3.3 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Para alcanzar los objetivos planteados se desplegó el siguiente plan investigativo en el cual se detalla la secuencia a seguir:

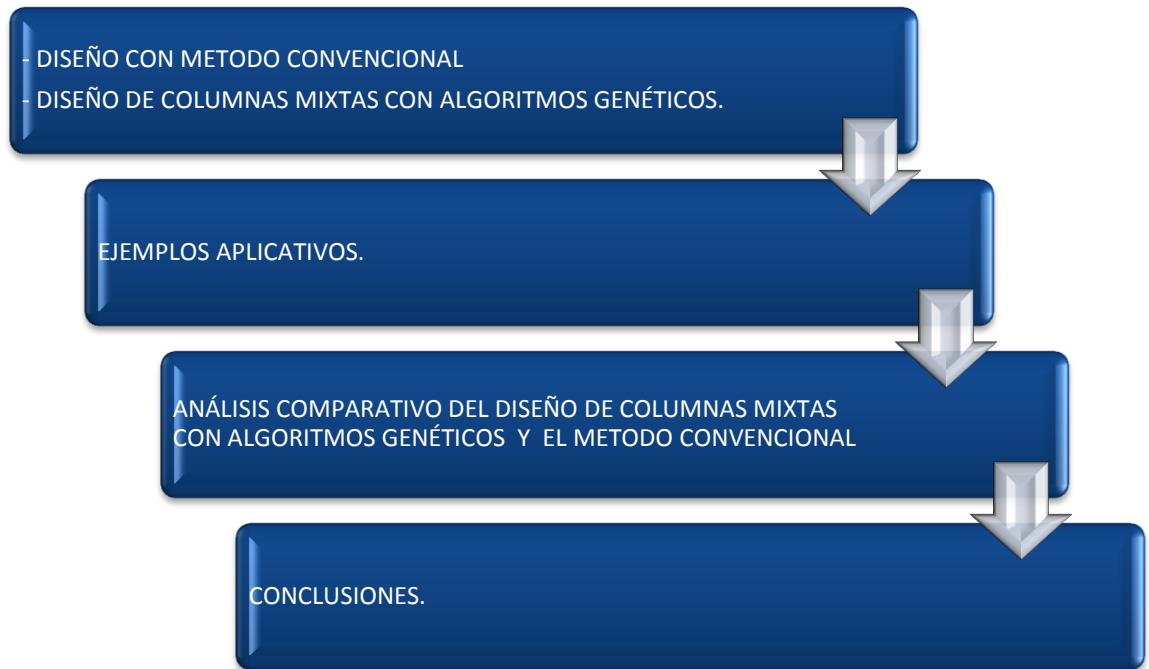


FIGURA 21- Esquema Del Diseño De La Investigación.

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño

3.4 OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

Tabla 4. Cuadro de Operacionalización de Variables

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	DEFINICION	OPERACIONALIZACION	DIMENSION	INDICADOR	INDICE
Algoritmos Genéticos	Independiente	Teoría que expone la optimización aplicada al diseño de columnas mixtas.	Forma en que opera el diseño con Algoritmos genéticos y su efectividad en la obtención de elementos de menor costo y que cumplan con la especificación AISC-LRFD	Desempeño de los Algoritmos genéticos en el diseño de vigas	Porcentaje de resultados coherentes	Índice de efectividad del algoritmo genético
Diseño a Flexocompresión Biaxial	Dependiente	Proceso para dimensionar un elemento sometido a carga de compresión y momentos flexionantes.	Forma en que se dimensionan los elementos de una columna mixta	Obtención de dimensiones de los elementos de una columna mixta diseñada a Flexocompresión biaxial.	Porcentaje de columnas mixtas diseñadas con costos mínimos y que cumplan con la especificación AISC-LRFD	Índice de columnas que cumplan un diseño aceptable a Flexocompresión biaxial
Columnas mixtas	Dependiente	Las columnas mixtas son elementos formados de acero estructural y hormigón, conectados entre sí para resistir conjuntamente las cargas de compresión y flexión.	Base altura espesor de la sección de acero estructural, área de hormigón y costo por metro lineal de la columna mixta diseñada	Cantidad de columnas mixtas obtenidas de mínimo costo y que cumplan con la especificación AISC-LRFD	Porcentaje de columnas mixtas en las cuales se puede aplicar algoritmos genéticos	Índice de columnas que cumplan con la especificación AISC-LRFD y que tengan el menor costo diseñados con algoritmos genéticos

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño.

3.5 HIPÓTESIS.

“Al aplicar Algoritmos Genéticos al diseño a Flexocompresión biaxial de columnas de acero rellenas de hormigón, se obtendrán resultados eficaces, eficientes en el aspecto estructural y económicos, cumpliendo la normativa establecida por la AISC-LRFD”.

3.5.1. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

3.5.1.1. VARIABLE INDEPENDIENTE:

- Algoritmos Genéticos

3.5.1.2 VARIABLE DEPENDIENTE:

- Diseño a Flexocompresión biaxial.
- Columnas mixtas de acero rellenas de hormigón.

3.6.- PROCEDIMIENTOS.

La recopilación de información de la presente investigación está centrada básicamente en la puesta en marcha de la aplicación del algoritmo genético aplicado al diseño a Flexocompresión biaxial de columnas mixtas de acero rellenas de hormigón, para sustentar la aplicabilidad del diseño de columnas mixtas se ejecutó la resolución de ejercicios de este tipo de columnas obtenidos de libros de diseño de estructuras y tesis de grado de diferentes autores aclarando que los mismos se encuentran dentro de los límites fijados al inicio de esta investigación, los cuales son para columnas mixtas de acero rellenas de hormigón de sección constante y de eje recto, rectangulares, cuadradas y circulares con límites de diseño normados por el AISC-LRFD procediendo a comparando resultados, para en lo posterior obtener datos con la aplicación del algoritmo genético en un caso práctico y consiguiendo conclusiones generales para cada caso. No hubo necesidad de personal de apoyo para la recopilación de datos, ya que se la realizó en forma directa entre el diseñador y los datos arrojados mediante el software, al ser una investigación de tipo experimental y

de nivel aplicativo, no fue necesaria la aplicación de técnicas de recolección de datos, tales como encuestas , entrevistas o alguna otra herramienta por tratarse de una aplicación comprobable por medios matemáticos, por lo cual no se necesita recolectar información a más de la bibliográfica y sugerencias que han procedido de apreciaciones y experiencias de personas que están relacionadas con este tema.

Se debe indicar en cuanto a la ubicación cronológica de la recopilación y procesamiento de información, que esta actividad se la aplicó una vez que se dio de alta el proceso y funcionamiento del algoritmo genético analizado a través de la fase de prueba, con la cual se certifica la idoneidad de la aplicación para el diseño de columnas mixtas de acero rellenas de hormigón.

3.6.1 PLANTEAMIENTO DE LOS EJERCICIOS DE DISEÑO A FLEXOCOMPRESION DE LAS COLUMNAS MIXTAS DE ACERO RELLENAS DE HORMIGÓN.

Los ejercicios que se detallan a continuación servirán para comprobar la idoneidad del diseño mediante la aplicación de Algoritmos Genéticos, los cuales son extraídos de libros de estructuras en acero los cuales se detallarán en cada ejercicio.

EJERCICIO N° 1 ³⁶

Comprobar si la sección presentada a continuación puede soportar las siguientes solicitaciones, de acuerdo a las especificaciones: LRFD

Datos:

Valores característicos de los materiales:

$$f'c = 210 \text{ Kg/cm}$$

$$Fy = 2530 \text{ Kg/cm}$$

³⁶Dayana Gabriela Silva Cruz; PROGRAMA PARA EL DISEÑO DE COLUMNAS COMPUESTAS SUJETAS A FLEXOCOMPRESIÓN BIAXIAL POR LOS MÉTODOS: LRFD, ACI Y EUROCÓDIGO ”

$$E_s = 2043000 \text{ Kg/cm}$$

$$E_c = 180000 \text{ Kg/cm}$$

Características de la estructura:

Extremos fijos linealmente.

No existen cargas aplicadas transversalmente.

$$L = 3.0 \text{ m.}$$

$$K = 1$$

Condición de cargas:

$$P_u = 115.0 \text{ Ton.}$$

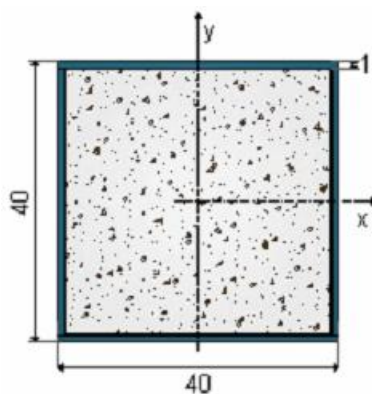
$$M_{Ax} = 20.0 \text{ Ton.m.}$$

$$M_{Ay} = 19.0 \text{ Ton.m.}$$

$$M_{Bx} = 15.0 \text{ Ton.m.}$$

$$M_{By} = 18.0 \text{ Ton.m.}$$

Propiedades geométricas de la sección compuesta en cm. :



Resultados principales:

$$\text{Resistencia nominal } \phi_c P_n = 541.837 \text{ Ton.}$$

$$\text{Ecuación de interacción} = 1.007$$

EJERCICIO N° 2 ³⁷

Determine la capacidad de diseño de un tubo de acero relleno de concreto de 6x6x3/16 $F_y=36\text{ksi}$, $f'_c=3\text{ksi}$ $L=14\text{ft}$

Resultados principales:

Resistencia nominal $\phi_c P_n = 147 \text{ kips}$

Cambio de unidades:

Dimensiones= 15cmx15cmx5mm

$F_y=2530\text{Kg/cm}^2$

$F'_c=210\text{Kg/cm}^2$

$L=427\text{cm}$

Resultados principales:

Resistencia nominal $\phi_c P_n$ 66.67 ton

EJERCICIO N°3³⁸

Comprobar si la sección presentada a continuación puede soportar las siguientes cargas, de acuerdo a las especificaciones: LRFD

Datos:

Valores característicos de los materiales:

$f'_c = 210 \text{ Kg/cm}$

³⁷ Theodore V. Galambos, DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO CON LRFD, Ejercicio 10.4 pag.274.

³⁸Dayana Gabriela Silva Cruz; PROGRAMA PARA EL DISEÑO DE COLUMNAS COMPUESTAS SUJETAS A FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL POR LOS MÉTODOS: LRFD, ACI Y EUROCÓDIGO. Pág. 326

$$F_y = 2530 \text{ Kg/cm}$$

$$E_s = 2043000 \text{ Kg/cm}$$

$$E_c = 180000 \text{ Kg/cm}$$

Características de la estructura:

Extremos fijos linealmente.

No existen cargas aplicadas transversalmente.

$$L = 2.9 \text{ m.}$$

$$K = 1$$

Condición de cargas:

$$P_u = 99.0 \text{ Ton.}$$

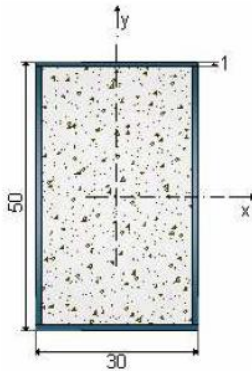
$$M_{Ax} = 18.0 \text{ Ton.m.}$$

$$M_{Ay} = 13.0 \text{ Ton.m.}$$

$$M_{Bx} = 14.0 \text{ Ton.m.}$$

$$M_{By} = 17.0 \text{ Ton.m.}$$

Propiedades geométricas de la sección compuesta en cm. :



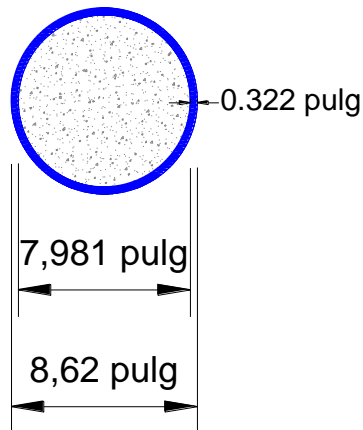
Resultados principales

Resistencia nominal $\phi_c P_n = 491,96$

Ecuación de interacción= 0.924

EJERCICIO 4.³⁹

Verifique si el siguiente tubo de acero A36 relleno de concreto de 3,5 ksi soporta una carga $P_u=320$ klb si $KL=12$ pie.



Cambio de unidades:

Diámetro externo=21,9 cm

Diámetro interno=20,27

Espesor=0,817

$F_y=2530$ Kg/cm²

$F'_c=246,085$ Kg/cm²

$L=365,76$ cm

³⁹ Jack C. McCormac; DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE ACERO Pág. 568

Resultados principales:

Resistencia nominal $\phi_c P_n = 330,6 \text{ klb} = 147,58 \text{ Ton.}$

3.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

A continuación se presentan los datos generados mediante el método de optimización del diseño de columnas mixtas de acero rellenas de hormigón a través de Algoritmos Genéticos.

3.7.1 DISEÑO A FLEXOCOMPRESION BIAxIAL DE COLUMNAS MIXTAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENETICOS.

Esta sección es el punto céntrico de la presente investigación, en la cual se desarrollará paso a paso la aplicación de un algoritmo genético para el diseño a Flexocompresión Biaxial de columnas mixtas de acero rellenas de hormigón.

3.7.1.1 EXPLICACIÓN GLOBAL DEL PROCESO QUE SIGUE EL ALGORITMO GENÉTICO APLICADO AL DISEÑO A FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL DE COLUMNAS MIXTAS DE ACERO RELLENAS DE HORMIGÓN.⁴⁰

Del marco teórico traemos a memoria que un algoritmo genético es un imitador del proceso evolutivo de los seres vivos, mencionado en la teoría de la evolución de Charles Darwin y aplicando procesos genéticos, en la cual a partir de una población inicial, en nuestro caso de ecuaciones formadas por las dimensiones, materiales, factores de reducción, variables de costo y geometría se van reproduciendo, imponiendo un porcentaje de mutación y bajo un modelo de cruce, con el propósito de que al llegar a la función de selección exista una población lo suficientemente variada para que la misma seleccione a los mejores individuos y pasen a la siguiente generación, simulando a la selección natural, sobreviviendo y reproduciéndose los

⁴⁰ ASHQUI, Armando. "DISEÑO A FLEXION DE VIGAS RECTANGULARES DE HORMIGÓN ARMADO BASADO EN LA NORMATIVA ECUATORINA Y MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENETICOS".

individuos cuyas características los han convertido en los más aptos, los individuos son variables que actúan en ecuaciones de evolución, las nuevas variables, que volverán a realizar el mismo proceso n generaciones, hasta cuando la población converja, esto quiere decir que es homogénea, o en otras palabras ha llegado al punto en donde la combinación de variables da como resultado el valor mínimo al evaluar la función objetivo y este valor empieza a repetirse indefinidamente, tanto en la función de evaluación como en la población de las últimas generaciones de cada ambiente.

3.7.1.2. EXPLICACIÓN PASO A PASO DEL PROCESO QUE SIGUE EL ALGORITMO GENÉTICO APLICADO AL DISEÑO A FLEXOCOMPRESIÓN BIAxIAL DE COLUMNAS MIXTAS DE ACERO RELLENAS DE HORMIGÓN.

Lo mencionado en el artículo anterior se describirá paso a paso en este punto, debido a la gran cantidad de información que opera el algoritmo genético es conveniente que el manejo se lo realice aplicando paquetes informáticos, lo cual se lo ha realizado en esta investigación.

3.7.1.2.1. PROCESO 1

La lógica del proceso comienza con la lectura de las variables de entrada, las cuales se las ha agrupado según su tipo, y según la sección de la columna, tanto para rectangulares como para circulares, dichos grupos y variables son:

Grupo1: datos de materiales y características de la columna:

Esfuerzo de compresión del hormigón= f_c

Esfuerzo fluencia del acero= f_y

Módulo de elasticidad del hormigón= E_c

Módulo de elasticidad del acero= E_S

Longitud = L

Constante k de longitud efectiva= K

Grupo2: Cargas y Momentos

Momento último en cabeza sentido XX=Max

Momento último en cabeza sentido YY=May

Momento último en pie sentido XX=Mbx

Momento último en pie sentido YY=Mby

Estos datos se los obtiene realizando previamente un análisis estructural de la edificación a la que pertenece la columna.

Grupo3: Rangos y relaciones

Rango de espesores: e

Relación base altura=R

El dato de la relación base altura, se lo maneja para dar la geometría de una columna rectangular o cuadrada, influenciado mayormente por el diseño arquitectónico, utilizado únicamente en las columnas rectangulares.

Grupo4: Costo de los materiales

Costo del hormigón por metro cubico,= P1

Costo del acero estructural por Kg =P2

3.7.1.2.2. PROCESO 2

Cabe aclarar que en el proceso anterior no se solicitó dimensiones de la sección, ya que éstas junto con otras adicionales son las que el algoritmo genético deberá encontrar.

Siguiendo la lógica del proceso se procedió a la inicialización de algoritmo genético, el mismo que está configurado de la siguiente manera:

- Generar la población inicial

- Codificación de individuos
- Generar parejas y posición de cruce
- Almacenamiento de información binaria.
- Realizar cruce de individuos
- Realizar mutación.
- Transformar de binario a decimal
- Evaluar la función de aptitud
- Realizar selección de individuos mejor adaptados
- Pasar la población seleccionada como nueva población inicial.

Este proceso trabaja para cada ambiente de la población, los cuales son:

- Población de búsqueda de X1, que es la base del perfil de la columna (bf)
- Población de búsqueda de X2, que es la altura del perfil de la columna (hw)
- Población de búsqueda de X3, que es el espesor del perfil de la columna (e)

Para el caso de columnas circulares se tiene:

- Población de búsqueda de X1, que es el diámetro exterior del perfil de la columna (D)
- Población de búsqueda de X2, que es el espesor del perfil de la columna (e)

Estas son las dimensiones del perfil de acero estructural para que conjuntamente con el hormigón en su interior producir una resistencia mayor o igual a las cargas últimas requeridas.

3.7.1.2.2.1 GENERAR LA POBLACIÓN INICIAL

En este paso se generan aleatoriamente 20 individuos para cada uno de los ambientes descritos anteriormente, de la siguiente manera didáctica para una columna rectangular.

Tabla 5. Población inicial para x1

No	X1
	Población
	inicial
	decimal
1	8
2	10
3	18
4	20
5	11
6	16
7	16
8	13
9	18
10	9
11	7
12	11
13	14
14	14
15	10
16	15
17	16
18	8
19	18
20	15

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño

Tabla 6. Población inicial para x2

No	X2
	Población
	inicial
	decimal
1	19
2	19
3	5
4	17
5	13
6	12
7	19
8	16
9	15
10	15
11	14
12	10
13	14
14	20
15	7
16	19
17	7
18	14
19	15
20	14

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño

Tabla 7. Población inicial para x3

No	X3
	Población
	inicial
decimal	
1	2
2	2
3	4
4	1
5	4
6	4
7	2
8	3
9	2
10	4
11	3
12	2
13	4
14	1
15	3
16	1
17	4
18	4
19	2
20	3

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño

La generación de la población inicial es aleatoria, esto se lo realiza con una función que genere al azar un número dentro de los rangos establecidos de: espesor, relación base-altura y secciones, y que para cada ambiente son las siguientes

X1: $X1_{min}=5$, $X1_{max}=20$

X2: $X2_{min}=5$, $X2_{max}=20$

X3: $X3_{min}=1$, $X1_{max}=4$

3.7.1.2.2.2 CODIFICACIÓN DE INDIVIDUOS

Este es el paso en el cual se procede a la transformación del número decimal almacenado en cada uno de los ambientes a número binario ya que a través de este proceso se realiza el cruce de información conocida como información genética y mutación. Al individuo en número binario se le conoce como genotipo, mientras que al individuo en número decimal se le conoce con el nombre de fenotipo, a cada componente del genotipo los cuales son valores únicamente de ceros y unos se les denomina alelos y con el nombre de gen a cada valor dentro del alelo. La transformación de la población inicial es la siguiente:

Tabla 8. Población inicialx1 transformada en binario

No	X1	X1
	Población	Población
	inicial	inicial
	decimal	binario
1	8	1000
2	10	1010
3	18	10010
4	20	10100
5	11	1011
6	16	10000
7	16	10000
8	13	1101
9	18	10010
10	9	1001
11	7	111
12	11	1011
13	14	1110
14	14	1110
15	10	1010
16	15	1111
17	16	10000
18	8	1000
19	18	10010
20	15	1111

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño

Tabla 9. Población inicial x2 transformada en binario

No	X2	X2
	Población	Población
	inicial	inicial
	decimal	binario
1	19	10011
2	19	10011
3	5	101
4	17	10001
5	13	1101
6	12	1100
7	19	10011
8	16	10000
9	15	1111
10	15	1111
11	14	1110
12	10	1010
13	14	1110
14	20	10100
15	7	111
16	19	10011
17	7	111
18	14	1110
19	15	1111
20	14	1110

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño

Tabla 10. Población inicial x3 transformada en binario

No	X3	X3
	Población	Población
	inicial	inicial
	decimal	binario
1	2	10
2	2	10
3	4	100
4	1	1
5	4	100
6	4	100
7	2	10
8	3	11
9	2	10
10	4	100
11	3	11
12	2	10
13	4	100
14	1	1
15	3	11
16	1	1
17	4	100
18	4	100
19	2	10
20	3	11

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño

3.7.1.2.2.3 GENERAR PAREJAS Y POSICIÓN DE CRUCE

La pareja de cruce se la genera aleatoriamente con valores que van de acuerdo a la cantidad total de individuos que se hayan generado, en este caso 20, cada valor

indica la pareja con la cual cada individuo combinará su información genética, para la posición de cruce se genera una lista teniendo su valor máximo la cantidad total de alelos de cada ambiente. De la siguiente manera:

Tabla 11. Genotipo pareja y posición de cruce para x1

No	X1	Pareja	Posición
	Población		
	inicial	cruce	cruce
	binario		
1	1000	1	1
2	1010	20	3
3	10010	13	4
4	10100	8	4
5	1011	14	1
6	10000	13	1
7	10000	16	2
8	1101	4	3
9	10010	3	1
10	1001	11	4
11	111	6	3
12	1011	9	1
13	1110	11	1
14	1110	12	1
15	1010	8	2
16	1111	3	1
17	10000	6	4
18	1000	16	4
19	10010	9	1
20	1111	10	3

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño

Tabla 12. Genotipo pareja y posición de cruce para x2

No	X2	Pareja	Posición
	Población		
	inicial	cruce	cruce
	binario		
1	10011	1	2
2	10011	20	1
3	101	7	4
4	10001	8	4
5	1101	6	4
6	1100	15	1
7	10011	4	2
8	10000	3	4
9	1111	20	1
10	1111	9	4
11	1110	19	1
12	1010	4	4
13	1110	8	1
14	10100	10	2
15	111	13	3
16	10011	14	1
17	111	4	4
18	1110	11	4
19	1111	1	1
20	1110	6	3

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño

Tabla 13. Genotipo pareja y posición de cruce para x3

No	X3	Pareja	Posición
	Población		
	inicial	cruce	cruce
	binario		
1	10	1	1
2	10	13	1
3	100	8	2
4	1	19	1
5	100	4	1
6	100	16	2
7	10	4	2
8	11	4	2
9	10	19	1
10	100	11	1
11	11	3	1
12	10	11	1
13	100	4	1
14	1	17	2
15	11	12	1
16	1	13	1
17	100	11	1
18	100	13	1
19	10	6	2
20	11	14	1

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño

3.7.1.2.2.4 ALMACENAMIENTO DE INFORMACIÓN BINARIA.

Cada gen es almacenado en una matriz con la cual nos permite en manejo individual de los datos del material genético de cada individuo.

3.7.1.2.2.5 REALIZAR CRUCE DE INDIVIDUOS.

Para explicar el proceso de cruce vamos a tomar el genotipo de la posición 3 del ambiente X1, es decir el elemento ubicado en la fila número 3 del ambiente X1.

Genotipo No.3 decimal: 18

Genotipo N3 binario: 10010

Pareja de cruce: 13

Posición de cruce: 4

Nuevo individuo 1 decimal: 30

Nuevo individuo 1 binario: 11110

Nuevo individuo 2 decimal: 2

Nuevo individuo 2 binario: 0010

Dado el cruce del material genético de los dos genotipos (a los cuales denominaremos padres) el resultado son dos nuevos individuos (llamados hijos), lo que da una población ya no de 20 sino de 40. A este proceso de intercambio de material genético o podemos graficar de la siguiente manera:

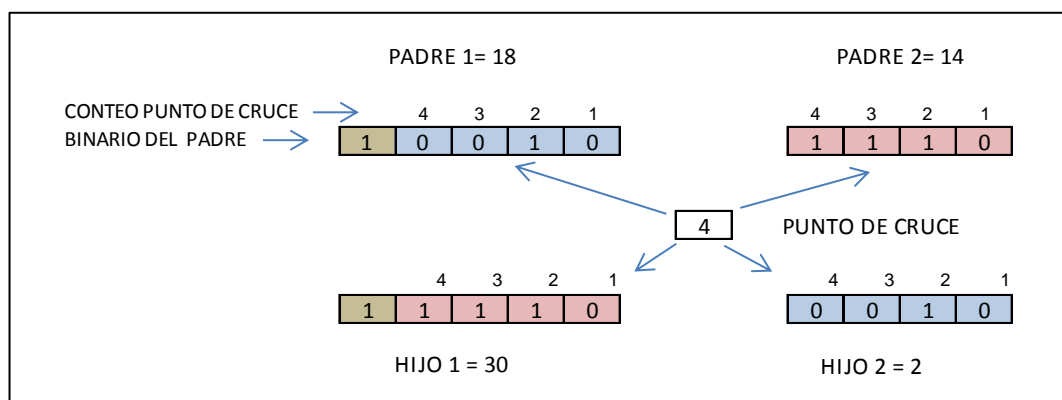


Figura 22 Modelo gráfico de cruce.

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño

El resultado para cada ambiente es el siguiente:

Tabla 14. Generación de nuevos individuos mediante cruce para x1.

No	X1	X1	Pareja	Posición	Hijo 1	Hijo 1	Hijo 2	Hijo 2
	Población	Población						
	inicial	inicial						
	decimal	binario						
			cruce	cruce	binario	decimal	binario	decimal
1	8	1000	1	1	1000	8	1000	8
2	10	1010	20	3	1111	15	1010	10
3	18	10010	13	4	11110	30	10	2
4	20	10100	8	4	11101	29	100	4
5	11	1011	14	1	1010	10	1111	15
6	16	10000	13	1	10001	17	1110	14
7	16	10000	16	2	10011	19	1101	13
8	13	1101	4	3	1100	12	10101	21
9	18	10010	3	1	10010	18	10010	18
10	9	1001	11	4	111	7	1001	9
11	7	111	6	3	0	0	10111	23
12	11	1011	9	1	1010	10	10011	19
13	14	1110	11	1	1111	15	110	6
14	14	1110	12	1	1111	15	1010	10
15	10	1010	8	2	1001	9	1110	14
16	15	1111	3	1	1110	14	10011	19
17	16	10000	6	4	10000	16	10000	16
18	8	1000	16	4	1111	15	1000	8
19	18	10010	9	1	10010	18	10010	18
20	15	1111	10	3	1001	9	1111	15

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño.

Tabla 15. Generación de nuevos individuos mediante cruce para x2.

No	X2	X2	Pareja	Posición	Hijo 1	Hijo 1	Hijo 2	Hijo 2
	Población	Población						
	inicial	inicial						
	decimal	binario						
			cruce	cruce	binario	decimal	binario	decimal
1	19	10011	1	2	10011	19	10011	19
2	19	10011	20	1	10011	19	1111	15
3	5	101	7	4	11	3	10101	21
4	17	10001	8	4	10000	16	10001	17
5	13	1101	6	4	1100	12	1101	13
6	12	1100	15	1	1101	13	110	6
7	19	10011	4	2	10001	17	10011	19
8	16	10000	3	4	10101	21	0	0
9	15	1111	20	1	1110	14	1111	15
10	15	1111	9	4	1111	15	1111	15
11	14	1110	19	1	1111	15	1010	10
12	10	1010	4	4	1	1	11010	26
13	14	1110	8	1	1110	14	10000	16
14	20	10100	10	2	10111	23	1100	12
15	7	111	13	3	110	6	1111	15
16	19	10011	14	1	10010	18	10101	21
17	7	111	4	4	1	1	10111	23
18	14	1110	11	4	1110	14	1110	14
19	15	1111	1	1	1111	15	10011	19
20	14	1110	6	3	1100	12	1110	14

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño.

Tabla 16. Generación de nuevos individuos mediante cruce para x3.

No	X3	X3	Pareja	Posición	Hijo 1	Hijo 1	Hijo 2	Hijo 2
	Población	Población						
	inicial	inicial						
	decimal	binario						
			cruce	cruce	binario	decimal	binario	decimal
1	2	10	1	1	10	2	10	2
2	2	10	13	1	10	2	100	4
3	4	100	8	2	111	7	0	0
4	1	1	19	1	0	0	11	3
5	4	100	4	1	101	5	0	0
6	4	100	16	2	101	5	0	0
7	2	10	4	2	1	1	10	2
8	3	11	4	2	1	1	11	3
9	2	10	19	1	10	2	10	2
10	4	100	11	1	101	5	10	2
11	3	11	3	1	10	2	111	7
12	2	10	11	1	11	3	10	2
13	4	100	4	1	101	5	0	0
14	1	1	17	2	0	0	101	5
15	3	11	12	1	10	2	11	3
16	1	1	13	1	0	0	101	5
17	4	100	11	1	101	5	0	0
18	4	100	13	1	100	4	100	4
19	2	10	6	2	0	0	110	6
20	3	11	14	1	11	3	1	1

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño.

3.7.1.2.2.6.-REALIZAR MUTACIÓN.

De lo establecido en la sección 2.4.8.4.1 y 2.4.8.4.6 alteramos el código genético, esto se lo realiza a nivel del ADN como ocurriría en la naturaleza, para generar una

diversidad en la población, solo mutara un porcentaje de la población en función de un 5%⁴¹ normalmente, pero se puede dar mayor diversidad aumentando este porcentaje, solo mutará un alelo del genotipo seleccionado en cada ambiente.

Al ser aleatoria la generación del gen a mutar en base a la longitud del genotipo, mientras más cerca al gen de la posición 1 más dramático es el cambio, y mientras más se acerca al último el será más parecido al individuo normal, las mutaciones se las puede visualizar de la siguiente manera.⁴²

Los cambios por mutación (10%) se produjeron de la siguiente manera:

Para X1, se mutó el individuo de la posición 27 y posición 6

Para X2, se mutó el individuo de la posición 2 y posición 31

Para X3, se mutó el individuo de la posición 37 y posición 31

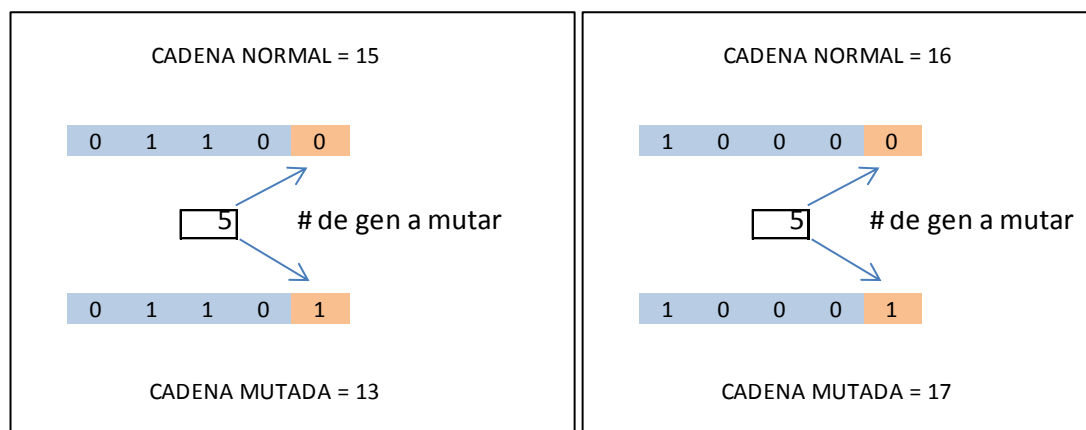


Figura 23 Esquema de mutación de los elementos de la posición 27 y 6 en la población de X1.

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño.

⁴¹Estudio de los Algoritmos genéticos para el desarrollo de sistemas de control, Patricia Gòmez Otero.

⁴² Ashqui Armando. "DISEÑO A FLEXIÓN DE VIGAS RECTANGULARES DE HORMIGÓN ARMADO BASADO EN LA NORMATIVA ECUATORIANA Y MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENETICOS".

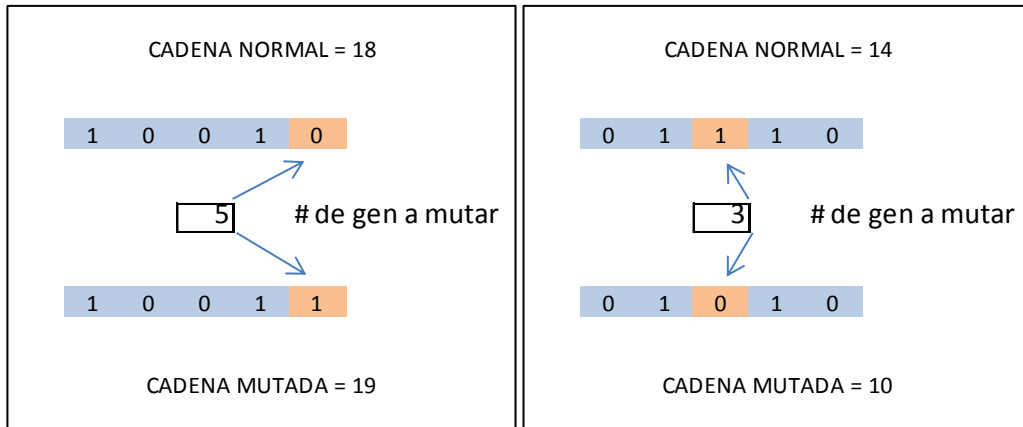


Figura 24 Esquema de mutación de los elementos de la posición 2 y 31 en la población de X2.

Elaborado por: Andrés Donoso - Stalin Parreño.

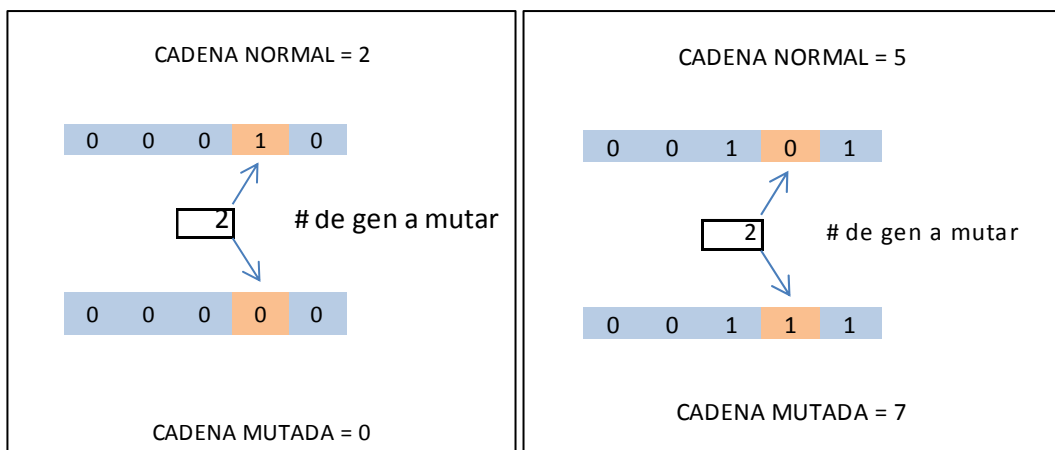


Figura 25 Esquema de mutación de los elementos de la posición 37 y 31 en la población de X3.

Elaborado por: Andrés Donoso - Stalin Parreño.

3.7.1.2.2.7.- TRANSFORMAR DE BINARIO A DECIMAL

Siguiendo el proceso después de la mutación transformamos la información binaria a decimal de cada genotipo, para poder realizar la evaluación.

De la siguiente manera:

Tabla 17. Individuos después del proceso de mutación en binario y decimal para x1

No	Hijo 1	Hijo 1	Hijo 2	Hijo 2
	binario	decimal	binario	decimal
1	1000	8	1000	8
2	1111	15	1010	10
3	11110	30	10	2
4	11101	29	100	4
5	1010	10	1111	15
6	10001	17	1110	14
7	10011	19	1101	13
8	1100	12	10101	21
9	10010	18	10010	18
10	111	7	1001	9
11	0	0	10111	23
12	1010	10	10011	19
13	1111	15	110	6
14	1111	15	1010	10
15	1001	9	1110	14
16	1110	14	10011	19
17	10000	16	10000	16
18	1111	15	1000	8
19	10010	18	10010	18
20	1001	9	1111	15

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño.

Tabla 18. Individuos después del proceso de mutación en binario y decimal para x2

No	Hijo 1	Hijo 1	Hijo 2	Hijo 2
	binario	decimal	binario	decimal
1	10011	19	10011	19
2	10011	19	1111	15
3	11	3	10101	21
4	10000	16	10001	17
5	1100	12	1101	13
6	1101	13	110	6
7	10001	17	10011	19
8	10101	21	0	0
9	1110	14	1111	15
10	1111	15	1111	15
11	1111	15	1010	10
12	1	1	11010	26
13	1110	14	10000	16
14	10111	23	1100	12
15	110	6	1111	15
16	10010	18	10101	21
17	1	1	10111	23
18	1110	14	1110	14
19	1111	15	10011	19
20	1100	12	1110	14

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño.

Tabla 18. Individuos después del proceso de mutación en binario y decimal para x3

No	Hijo 1	Hijo 1	Hijo 2	Hijo 2
	binario	decimal	binario	decimal
1	10011	19	10011	19
2	10011	19	1111	15
3	11	3	10101	21
4	10000	16	10001	17
5	1100	12	1101	13
6	1101	13	110	6
7	10001	17	10011	19
8	10101	21	0	0
9	1110	14	1111	15
10	1111	15	1111	15
11	1111	15	1010	10
12	1	1	11010	26
13	1110	14	10000	16
14	10111	23	1100	12
15	110	6	1111	15
16	10010	18	10101	21
17	1	1	10111	23
18	1110	14	1110	14
19	1111	15	10011	19
20	1100	12	1110	14

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño.

3.7.1.2.2.8.- EVALUAR LA FUNCIÓN DE APTITUD

Una vez que el proceso ha logrado concebir una población primaria, desarrollar hijos, generar mutaciones en un porcentaje de ella, se considera hasta este punto que se posee una población diversa, prosiguiendo en este paso al proceso de evaluación, en la cual ingresa cada fenotipo de cada ambiente X_1, X_2, X_3 en la función objetivo o llamada de aptitud que es la siguiente:

Para columnas rectangulares y cuadradas

$$Z = \left(\left(\frac{(X_1 - 2X_3) * (X_2 - 2X_3)}{100^3} \right) * 100 * P_1 \right) + \left((X_1 * X_2) - ((X_1 - 2X_3) * (X_2 - 2X_3)) \right) * 100 * 0.00785 * P_2$$

Para columnas circulares

$$Z = \left(\left(\frac{\pi * (X_1 - 2X_2)^2}{100^3} \right) * 100 * P_1 \right) + \left((\pi * X_1^2) - (\pi * (X_1 - 2X_2)^2) \right) * 100 * 0.00785 * P_2$$

Donde

Z = costo por metro lineal de columna diseñada por el algoritmo genético.

X_1 = para columnas rectangulares y cuadradas es la base del perfil de acero, mientras que para columnas circulares es el diámetro exterior del perfil de acero.

X_2 = para columnas rectangulares y cuadradas es la altura del perfil de acero, mientras que para columnas circulares es el espesor del perfil de acero.

X_3 = para columnas rectangulares y cuadradas es el espesor del perfil de acero.

P_1 = costo de un metro cubico de hormigón en nuestro caso dólares.

P_2 = costo de un Kg de acero estructura en dólares

El factor $\frac{1}{100^3}$ transforma a dólares/cm³ las unidades de P_1 , y el factor 0,00785 Kg/cm³ es el peso específico del acero, ambos multiplicados por la longitud de 100 cm, con la que se transforma en volumen tanto el hormigón como el acero.

Uno de los principales objetivos al implementar un algoritmo genético al diseño a Flexocompresión biaxial de columnas mixtas es el de encontrar la

columna más económica y esto se refleja en la ecuación de la función objetivo que es minimizar el costo total que implica la combinación eficiente de materiales.

En forma práctica y siguiendo el proceso actual para una columna rectangular tenemos para los elementos X_1, X_2, X_3 ubicados en la primera fila los siguientes datos:

Para $X_1=19$

Para $X_2=21$

Para $x_3=5$

$P_1= \$140$ (para un hormigo de 210 Kg/cm², en la ciudad de Riobamba, con materiales de la mina cerro negro, cotizados al mes de abril del 2013)

$P_2=\$1.8$ (es un valor promedio entre las principales ferreterías e la ciudad de Riobamba cotizados al mes de abril del 2013)

Ingresando en la ecuación de la función objetivo para columnas rectangulares tenemos:

$Z= 60.15$ dólares

Es decir para estos datos de la primera generación se obtiene un valor de 60.15 dólares por cada metro lineal de la columna de las dimensiones descritas (X_1, X_2, X_3), más adelante se presentaran resultados cuando han transcurrido varias generaciones, la información haya pasado por el proceso de evaluación de diseño y se minimice la función objetivo hasta su convergencia.

3.7.1.2.2.9 REALIZAR SELECCIÓN DE INDIVIDUOS MEJOR ADAPTADOS

Una vez realizado el proceso anterior se procede a tomar los valores que menor valor produjeron en la función de evaluación, de los ambientes X_1, X_2, X_3 , aquí presentamos los individuos mejor adaptados:

Tabla 20. Individuos mejor adaptados en la función objetivo cumpliendo los requerimientos de diseño LRFD

Generación 1				
No.	X1	X2	X3	\$/m
1	19	21	5	60.15
2	18	19	6	64.89
3	19	21	5	60.15
4	18	19	6	64.89
5	19	21	5	60.15
6	18	19	6	64.89
7	19	21	5	60.15
8	18	19	6	64.89
9	19	21	5	60.15
10	18	19	6	64.89
11	19	21	5	60.15
12	18	19	6	64.89
13	19	21	5	60.15
14	18	19	6	64.89
15	19	21	5	60.15
16	18	19	6	64.89
17	19	21	5	60.15
18	18	19	6	64.89
19	19	21	5	60.15
20	18	19	6	64.89

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño.

Estos individuos mejor adaptados cada uno y en conjunto han sido verificados que cumplan con las restricciones establecidas, y con el método de diseño proyectado que en nuestro caso es el planteado por el AISC-LRFD. Las restricciones son las que detallamos a continuación:

$x_1 > 0$

$x_2 > 0$

$x_3 > 0$

Donde

x_1 = base del perfil de la columna (bf)

x_2 = altura del perfil de la columna (hw)

x_3 = espesor del perfil de la columna (e)

Los fenotipos de cada ambiente ingresarán en el proceso de diseño detallado en la sección **3.1.6** para proceder a su evaluación, y ser aceptados o no.

3.7.1.2.2.10.- PASAR LA POBLACIÓN SELECCIONADA COMO NUEVA POBLACIÓN.

Finalizando se debe ingresar a la primera fase en la cual se generó la población, con la diferencia de que no se la creará de manera aleatoria, sino que la nueva población son los mejores individuos elegidos en el proceso anterior. Este conjunto de procesos continúa por n generaciones hasta llegar al punto de convergencia de todos los ambientes. Hay que recalcar que el mejor individuo de la generación anterior se mantendrá para la generación venidera, esto para mantener el mejor material genético de cada generación.

A continuación vamos a analizar en diferentes generaciones como la población va evolucionando.

Tabla 21. Individuos de la tercera generación

Generación 3				
No.	X1	X2	X3	\$/m
1	18	19	4	45.3
2	18	19	4	45.3
3	18	19	4	45.3
4	18	19	4	45.3
5	19	17	5	53.49
6	19	17	5	53.49
7	19	17	5	53.49
8	18	19	5	55.15
9	18	19	5	55.15
10	18	19	5	55.15
11	19	19	5	56.82
12	19	19	5	56.82
13	19	19	5	56.82
14	19	19	5	56.82
15	19	19	5	56.82
16	19	19	5	56.82
17	19	19	5	56.82
18	18	21	5	58.45
19	18	21	5	58.45
20	18	21	5	58.45

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño.

Se puede observar que ya existen valores que se van repitiendo y minimizando la función objetivo.

Tabla 22. Individuos de séptima generación

Generación 7				
No.	X1	X2	X3	\$/m
1	18	19	4	45.3
2	18	19	4	45.3
3	18	19	4	45.3
4	18	19	4	45.3
5	18	19	4	45.3
6	18	19	4	45.3
7	18	19	4	45.3
8	18	19	4	45.3
9	18	19	4	45.3
10	18	19	4	45.3
11	18	19	4	45.3
12	18	19	4	45.3
13	18	19	4	45.3
14	19	19	4	46.69
15	19	19	4	46.69
16	19	19	4	46.69
17	19	19	4	46.69
18	19	19	4	46.69
19	19	19	4	46.69
20	16	19	5	51.82

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño.

En la tabla se puede observar que en esta etapa los valores se van uniformizando y la función de aptitud se ha minimizado, y posteriormente con 9 generaciones se ha llegado a la convergencia total, con una función de aptitud minimizada y dimensiones X1,X2,X3 que pasan todos los chequeos del diseño del LRFD.

Tabla 23. Individuos de la novena generación

Generación 9				
No.	X1	X2	X3	\$/m
1	18	19	4	45.3
2	18	19	4	45.3
3	18	19	4	45.3
4	18	19	4	45.3
5	18	19	4	45.3
6	18	19	4	45.3
7	18	19	4	45.3
8	18	19	4	45.3
9	18	19	4	45.3
10	18	19	4	45.3
11	18	19	4	45.3
12	18	19	4	45.3
13	18	19	4	45.3
14	18	19	4	45.3
15	18	19	4	45.3
16	18	19	4	45.3
17	18	19	4	45.3
18	18	19	4	45.3
19	18	19	4	45.3
20	18	19	4	45.3

Elaborado por: Andrés Donoso-Stalin Parreño.

En la tabla anterior se muestran los resultados finales del algoritmo genético cuando ha convergido con 9 generaciones, en las que se ha obtenido una sección de base $x_1=18\text{cm}$, altura $x_2=19\text{cm}$, con un espesor $x_3=4\text{mm}$ y con un costo por metro lineal de 45,3 dólares, estos datos pasan el diseño requerido por el LRFD para columnas rellenas a Flexocompresión Biaxial para las solicitaciones de carga requeridas.

3.9 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS.

Una vez obtenida la información necesaria en el cual se aceptará o rechazara la hipótesis para esta investigación se realizara un análisis estadístico de los resultados, tomando como parámetro en primera instancia la similitud de resultados de los ejercicios planteados en la sección 3.7.1 con el resuelto mediante nuestro algoritmo para determinar la idoneidad del proceso de diseño, y en segundo caso comparar el diseño manual de control con el diseño ejecutado mediante el algoritmo genético para de esta manera medir el nivel de eficacia, eficiencia y sobretodo económico de estos dos procesos de diseño.

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De primera mano se realiza un análisis en cuanto a la validez del diseño, para lo cual se tomó como parámetro de referencia los resultados obtenidos de carga axial y ecuación de interacción que equivale al total del requerimiento de la sección diseñada del apartado 3.6.1 con los obtenidos aplicando nuestro proceso de diseño que se encuentran en la sección 3.1.6, obteniendo los siguientes resultados:

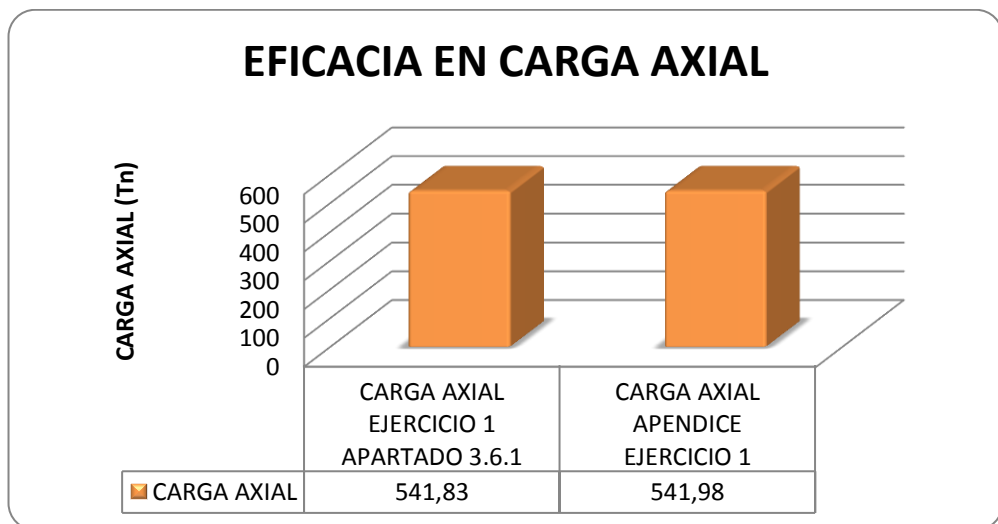


Figura 26 Comparación de carga axial ejercicio 1.

Elaborado por: Andrés Donoso – Stalin Parreño

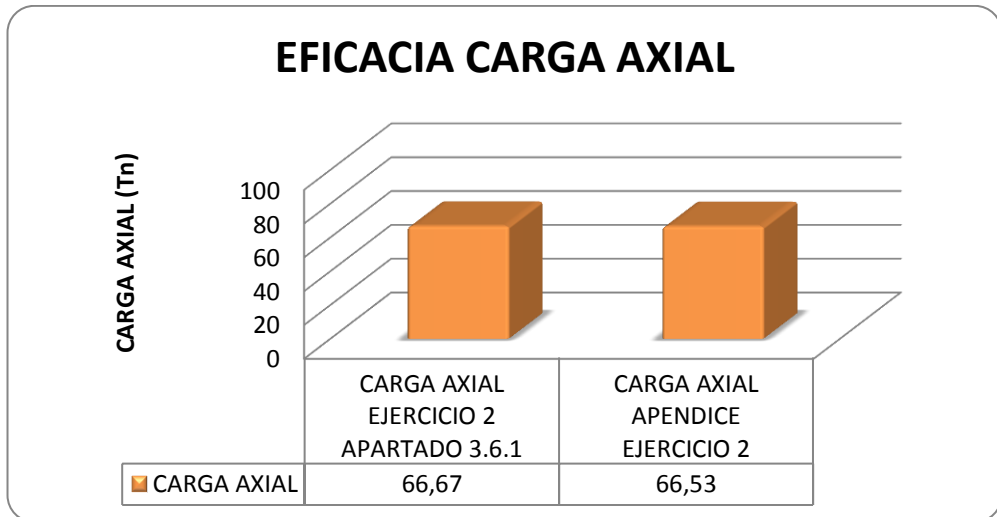


Figura 27 Comparación de carga axial ejercicio 2.

Elaborado por: Andrés Donoso – Stalin Parreño

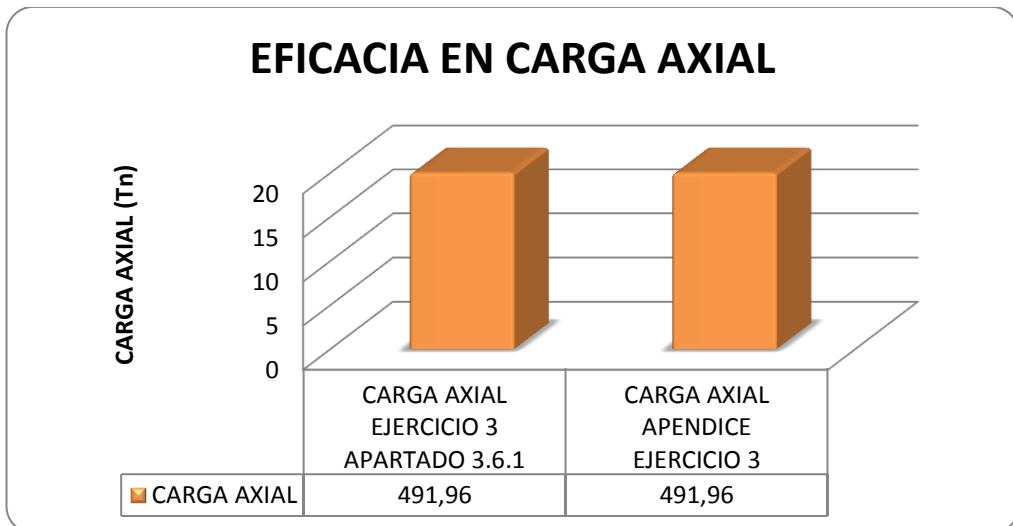


Figura 28 Comparación de carga axial ejercicio 3.

Elaborado por: Andrés Donoso – Stalin Parreño

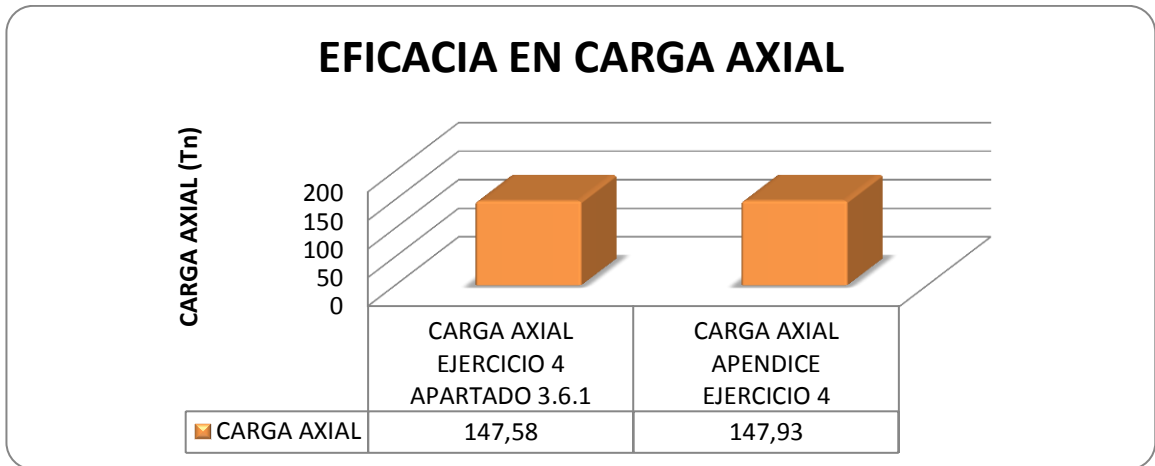


Figura 29 Comparación de carga axial ejercicio 4.

Elaborado por: Andrés Donoso – Stalin Parreño

De los resultados obtenidos se puede apreciar que el método de diseño aplicado a nuestro programa para carga axial arroja resultados similares a los expuestos por otros autores que se detallan en la sección 3.6.1 con lo cual se acepta el proceso de diseño.

Los resultados encuentran sustentados en forma resumida en la sección 3.6.1 y en el respaldo de la sección de apéndices.

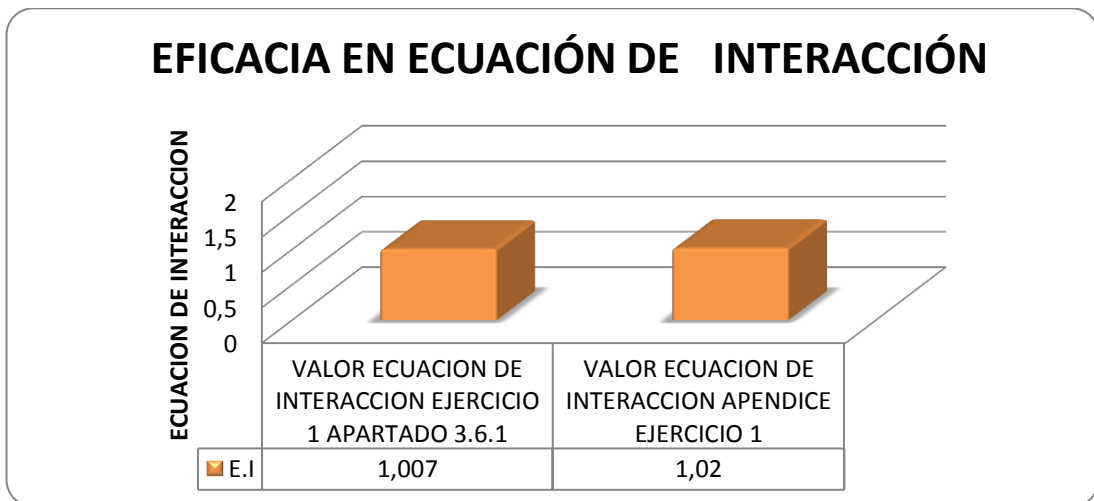


Figura 30 Comparación de la ecuación de interacción ejercicio 1.

Elaborado por: Andrés Donoso – Stalin Parreño

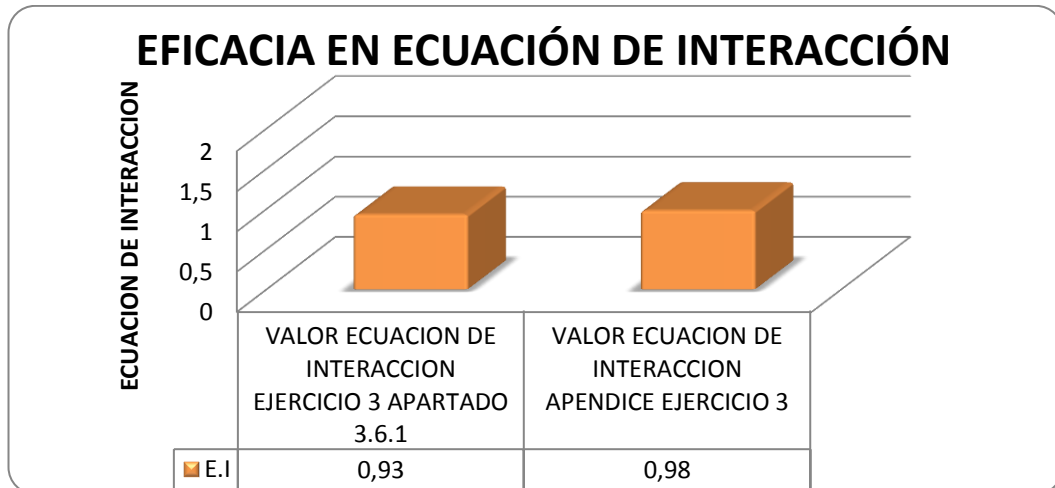


Figura 31 Comparación de la ecuación de interacción ejercicio 3.

Elaborado por: Andrés Donoso – Stalin Parreño

De los resultados conseguidos se puede apreciar que el método de diseño aplicado a nuestro programa para la ecuación de interacción arroja resultados similares a los expuestos por otros autores que se detallan en la sección 3.6.1 con lo cual se acepta el proceso de diseño.

Los resultados encuentran sustentados en forma resumida en la sección 3.6.1 y en el respaldo de la sección de apéndices.

Para el segundo caso vamos a mostrar resultados obtenidos a través de la aplicación del método de optimización de algoritmos genéticos a dos ejercicios planteados en la sección 3.6.1 el respaldo técnico se encuentra en la sección de apéndices, a continuación un análisis comparativo marcado como objetivo en esta investigación y como medio de validación del estudio en discusión.

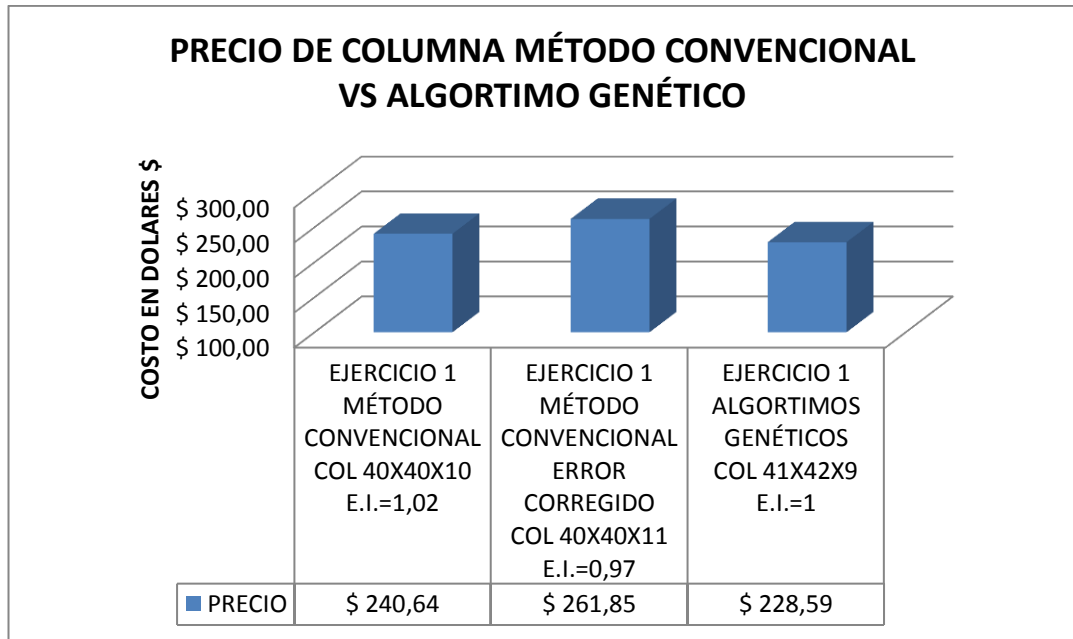


Figura 32 Comparación de métodos de diseño de columnas mixtas ejercicio 1.

Elaborado por: Andrés Donoso – Stalin Parreño

En este gráfico que resuelve el ejercicio 1 resuelto por un autor diferente a esta investigación en la sección 3.6.1 , visualizamos los tres resultados que se obtiene del proceso de diseño, en primer lugar empezando de izquierda a derecha se encuentra el resultado generado por el autor para una columna de 40cmx40cmx10mm, en el cual podemos observar que la ecuación de interacción genera un valor de 1.02 sobrepasando el valor de 1 que delimita esta ecuación, dicho valor nos da a entender que el diseño esta subdimensionado y la columna no resiste la flexocompresión biaxial, generando un costo por metro lineal de columna de 240,64 dólares. El gráfico central posee el resultado calculado mediante nuestro programa de control en el cual podemos corregir el error del ejercicio aumentando el espesor del perfil de acero a 11 mm, teniendo una columna de 40cmx40cmx11mm obteniendo una ecuación de interacción de 0,97 y un costo por metro lineal de columna de 261,85 dólares. El gráfico final de la derecha es el resultado generado a través de la optimización del algoritmo genético con una relación base altura de 1 que devuelve como columna optima las dimensiones del perfil de acero de 41cmx42cmx9mm con

una ecuación de interacción de 1 y un precio por metro lineal de columna de 228,59 dólares.

Comparando el costo por metro lineal de columna diseñada a través de la optimización de algoritmos genéticos se obtiene un ahorro de 33,26 dólares en comparación con la columna diseñada a través del proceso manual de control. La columna óptima pasa todos los chequeos que requiere el LRFD para diseñar una columna mixta de acero rellena de hormigón sometida a flexocompresión biaxial.

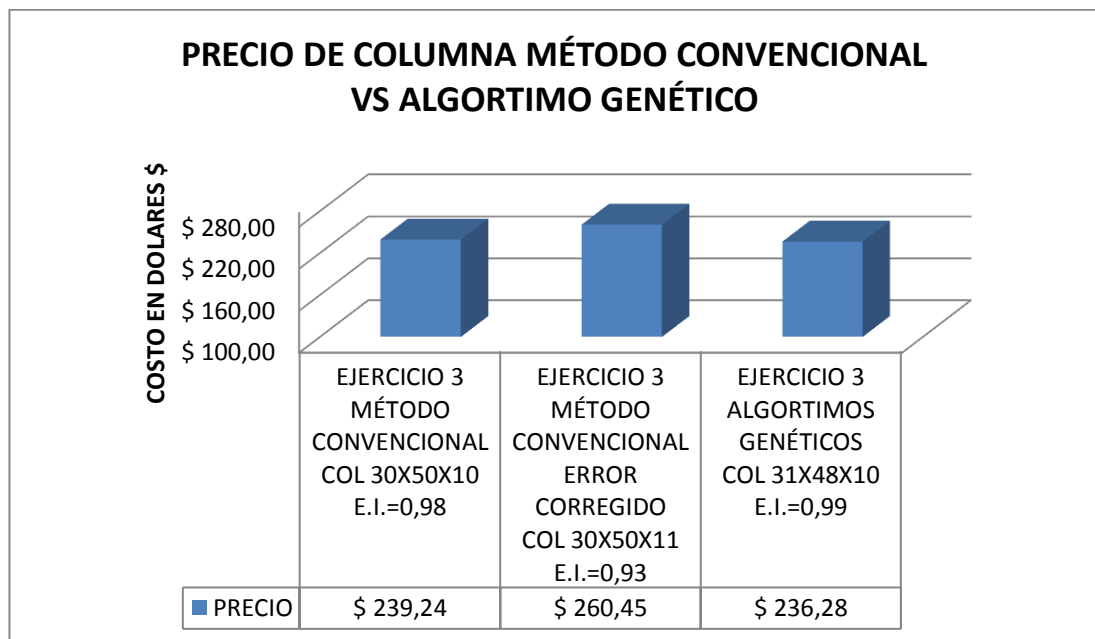


Figura 33 Comparación de métodos de diseño de columnas mixtas ejercicio 3.

Elaborado por: Andrés Donoso – Stalin Parreño

En este gráfico están los resultados del ejercicio 3 resuelto por un autor diferente a esta investigación en la sección 3.6.1 , visualizamos los tres resultados que se obtiene del proceso de diseño, en primer lugar empezando de izquierda a derecha se encuentra el resultado generado por el autor para una columna de 30cmx50cmx10mm, en el cual podemos observar que la ecuación de interacción genera un valor de 0,98 en dicho proceso ajeno a esta investigación genera un error por espesor insuficiente generando un fallo por pandeo local, dicho valor nos da a entender que el diseño es erróneo habiendo que corregir este diseño, generando un

costo por metro lineal de columna de 239,24 dólares. El gráfico central posee el resultado calculado mediante nuestro programa de control en el cual podemos corregir el error del ejercicio aumentando el espesor del perfil de acero a 11 mm, teniendo una columna de 30cmx50cmx11mm obteniendo una ecuación de interacción de 0,93 y un costo por metro lineal de columna de 260,45 dólares. El gráfico final de la derecha es el resultado generado a través de la optimización del algoritmo genético que devuelve como columna óptima con una relación base altura de 0,6 las dimensiones del perfil de acero de 31cmx48cmx10mm con una ecuación de interacción de 0,99 y un precio por metro lineal de columna de 236,28 dólares.

Comparando el costo por metro lineal de columna diseñada a través de la optimización de algoritmos genéticos se obtiene un ahorro de 24,37 dólares en comparación con la columna diseñada a través del proceso manual de control. La columna óptima pasa todos los chequeos que requiere el LRFD para diseñar una columna mixta de acero rellena de hormigón sometida a flexocompresión biaxial.

Se debe aclarar que los valores arrojados de las dimensiones de acero tanto de los dos procesos de diseño como son el control manual y la optimización a través de algoritmos genéticos no trabajan en función de dimensiones de acero estructural comerciales, sino más bien para saber qué nivel de optimización se puede llegar a obtener mediante la aplicación de estos dos métodos, pero tales secciones se las puede llegar a fabricar en taller.

Analizando el gráfico 32 se llega a lo siguiente:

Que el método de optimización de algoritmos genéticos produce un ahorro de 33,26 dólares comparado con el diseño de control manual.

Analizando el gráfico 33 se llega a lo siguiente:

Que el método de optimización de algoritmos genéticos produce un ahorro de 24,37 dólares comparado con el diseño de control manual.

Por lo cual se puede mencionar que el diseño de columnas mixtas mediante la aplicación de algoritmos genético genera secciones más económicas que cumplen con los requerimientos del LRFD que el método convencional.

Los valores arrojados del diseño planteado en esta investigación generan resultados similares a los de otros autores los cuales se demostró en esta sección, expresando la eficacia de nuestro diseño.

A través de las etapas de prueba y etapa de aplicación del algoritmo genético se observa la rapidez proceso de diseño que nos otorga esta herramienta en comparación con el método de diseño convencional.

CAPITULO V

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 CONCLUSIONES.

Mediante la aplicación de la técnica de algoritmos genéticos al diseño a Flexocompresión biaxial de columnas mixtas de acero rellenas de hormigón se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1. Un algoritmo genético puede ser desarrollado para diseñar a Flexocompresión biaxial columnas mixtas de acero rellenas de hormigón ya que cumple con las condiciones de aplicabilidad las mismas que son:
 - a) Su espacio de búsqueda está delimitado, ya que las dimensiones que se generan en el diseño, como son base altura y espesor en el caso de sección cuadrada, y, diámetro, espesor en el caso de circulares, se las puede limitar mediante restricciones, las mismas que están en función de la relación base altura y de los requerimientos arquitectónicos para el dimensionamiento.
 - b) Se puede definir la función aptitud, la misma que se basa en el costo de la columna.
 - c) Las posibles soluciones o individuos pueden ser codificados mediante código binario.
2. Se ha establecido el proceso de diseño a Flexocompresión biaxial de columnas mixtas de acero rellenas de hormigón, mediante la aplicación de algoritmos genéticos y cumpliendo con la normativa AISC-LRFD, habiendo descrito en forma ordenada y practica cada paso para la implementación del mismo en la sección 3.7.1, aclarando que para agilizar el proceso de cálculo se recurrió a la aplicación de un paquete informático que permita el manejo de gran cantidad de operaciones.

3. Se desarrolló un completo estudio acerca del funcionamiento y aplicación de un algoritmo genético en aplicaciones de ingeniería, prueba de ello es la generación de herramientas computacionales que se ha desarrollado para la aplicación didáctica de esta investigación.
4. Se fundamentó la interrelación de las ecuaciones fundamentales del diseño a Flexocompresión biaxial de columnas mixtas del método AISC-LRFD con el proceso que conlleva la estructura de un algoritmo genético generando un esquema base para aplicaciones ingenieriles planteado en la sección 6.4.
5. Se ha implementado con éxito la aplicación del algoritmo genético al diseño a Flexocompresión biaxial de columnas mixtas rellenas de hormigón en el programa denominado DEAG 1.0, el mismo que desde su inicio fue planteado para para que sea utilizado de forma práctica por el usuario aplicado a elementos reales, proveyendo de esta manera una herramienta al ingeniero que le permita aumentar la eficacia en el diseño estructural, ya que para el mismo elemento pueden existir varias soluciones alternativas pero no siempre económicas, objetivo que se logra con la aplicación de este sistema de optimización.
6. Se confirmó la hipótesis planteada mediante el análisis realizado en el capítulo 4 de esta investigación, obteniéndose datos con alto porcentaje de validez, ya que se verificó que el método aplicado produjo resultados con un alto grado de eficacia en relación a carga axial y ecuación de interacción planteado por otros autores. También se pudo analizar que las columnas diseñadas mediante algoritmos genéticos fueron las más económicas tanto en tiempo como en dinero, en comparación con las diseñadas con el procedimiento de control tradicional, ya que lo que se busca es generar las dimensiones que minimizan la función objetivo del algoritmo genético y que cumplan con el método de diseño propuesto por la AISC-LRFD.

5.2 RECOMENDACIONES.

Para la aplicación de algoritmos genéticos a cualquier ámbito en el que se pretenda optimizar elementos, procesos o funciones, y estas tengan un alto grado de complejidad es imprescindible en primera instancia la aplicación de un algoritmo genético básico, y luego ir determinando experimentalmente los parámetros más adecuados de ajuste tales como el tipo de cruce, la tasa de mutación, el orden de las funciones de selección ya que no se pueden establecer parámetros generales, puesto que estos varían de acuerdo a varios parámetros propios de cada estudio .

Lo detallado en el proceso de resultados manifiesta que las dimensiones arrojadas por el algoritmo genético no están en base a dimensiones comerciales de perfiles, esto se lo realizó recomendablemente para conseguir la respuesta de la optimización que genera el algoritmo genético a su máximo estado minimizando la función objetivo que en este caso evalúa el costo.

La aplicación de métodos de optimización debería considerarse materia práctica en todos los diseños, ya que con esto se dota al ingeniero de un recurso fundamental para manejar el recurso económico y enrolarse en el campo competitivo, cualidades necesarias en nuestra sociedad.

Para la utilización del software DEAG 1.0 recomendamos que el navegador predeterminado sea Google Chrome en versión actualizada por poseer herramientas visuales que ayudan en el proceso de impresión de resultados.

El incentivo de la investigación es una necesidad de la universidad en los actuales momentos, y en particular dentro de la ingeniería, desarrollando investigaciones de carácter práctico que realmente sean aplicables a la realidad y fomenten la innovación tecnológica que el país demanda.

CAPÍTULO VI

6 PROPUESTA

6.1 TÍTULO DE LA PROPUESTA

“Desarrollo del software denominado DEAG 1.0 para el diseño a Flexocompresión biaxial de columnas de acero rellenas de hormigón basado en la normativa del AISC aplicando el método del LRFD con la aplicación de algoritmos genéticos “

6.2 INTRODUCCIÓN

Mediante la implementación del software DEAG 1.0 se dotará de una herramienta informática de utilidad práctica en el diseño estructural, la misma que será capaz realizar un proceso de diseño de columnas mixtas utilizando el método convencional LRFD y un proceso de optimización utilizando algoritmos genéticos (AG) para cargas y momentos requeridos en la columna ingresados al programa, logrando con este último proceso de AG reducir el tiempo de cálculo para el diseño y revisar los chequeos pedidos por el método del LRFD.

Mediante la aplicación de la técnica de optimización de algoritmos genéticos se obtendrán elementos económicos y que cumplan con la normativa LRFD.

6.3 OBJETIVO GENERAL.

6.3.1 GENERAL.

Desarrollar el software DEAG 1.0 para el diseño a Flexocompresión biaxial de columnas de acero rellenas de hormigón basado en la normativa del AISC aplicando el método del LRFD con la aplicación de algoritmos genéticos “

6.3.2 ESPECÍFICOS.

- Obtener una herramienta informática que permita optimizar el costo económico del diseño de columnas mixtas de acero rellenas de hormigón basado en la aplicación de algoritmos genéticos.
- Obtener elementos eficientes en el campo estructural y minimizar el tiempo de cálculo mediante la aplicación del software DEAG 1.0

6.4 DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA

6.4.1 PROGRAMA COMPUTACIONAL DEAG 1.0 PARA EL DISEÑO DE DISEÑO A FLEXOCOMPRESIÓN BIAIXIAL DE COLUMNAS DE ACERO RELLENAS DE HORMIGÓN BASADO EN LA NORMATIVA DEL AISC APLICANDO EL MÉTODO DEL LRFD CON LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS.

El software DEAG 1.0 es un programa computacional didáctico y práctico que diseña a Flexocompresión biaxial columnas mixtas de acero rellenas de hormigón mediante la aplicación de algoritmos genéticos, todas las herramientas en las que se diseñó el sistema informático son de última generación y de software libre orientados al a la web, teniendo como lenguaje de programación: JSF2 (Java Server Faces) y como servidor: GlassFish 3.1.2.

Contiene una interfaz gráfica de cómoda comprensión y manipulación de la información ingresada, así como de la información obtenida a través del análisis.

El análisis que se realiza en este programa es para elementos tipo columna de estructuras reales, partiendo de datos iniciales de carga y momentos. Maneja internamente el proceso de diseño manejado por la AISC –LRFD, dando la oportunidad de realizar un diseño manual así como la posibilidad de tener un diseño óptimo económicamente basado en Algoritmos Genéticos.

6.4.1.1 PROCESO LÓGICO DEL SOFTWARE DEAG 1.0

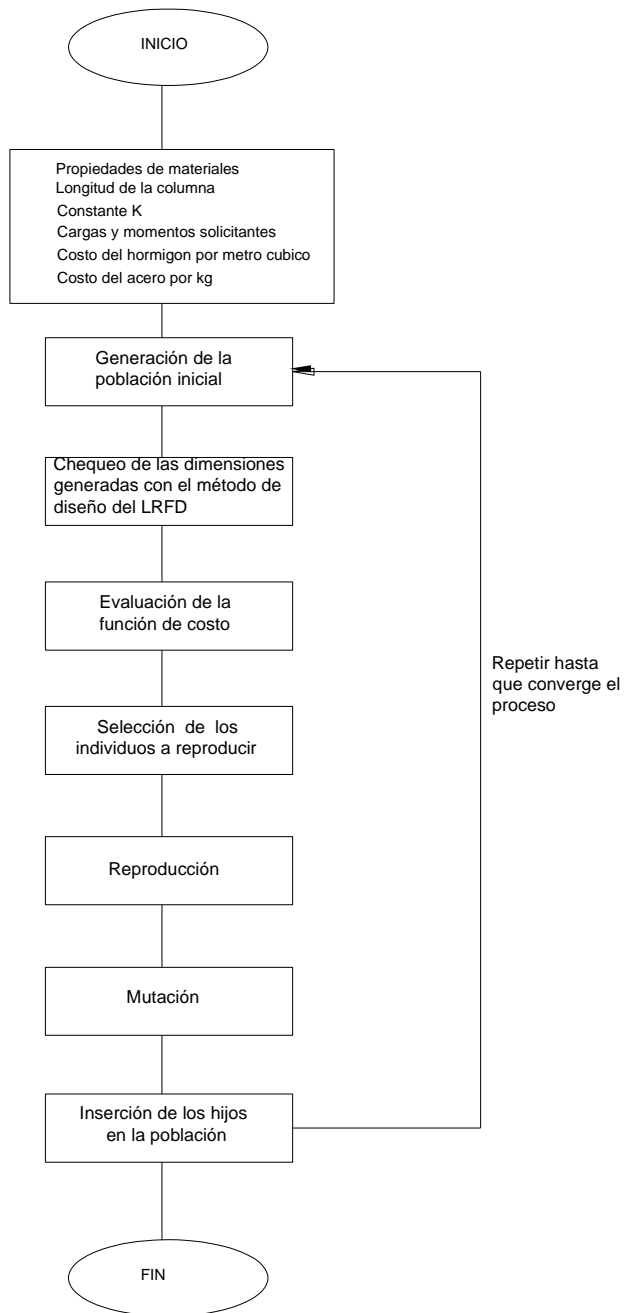


Figura 34Proceso lógico del software DEAG 1.0

Elaborado por: Andrés Donoso – Stalin Parreño

6.4.2 ESTRUCTURACIÓN DEL SOFTWARE DEAG 1.0.



Figura 35. Pantalla principal del programa DEAG 1.0 Algoritmos Genéticos.

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

En este apartado presentamos la interfaz del software DEAG 1.0 y explicamos cada una de sus partes.

Cabe resaltar que el control principal lo sigue manteniendo el criterio del ingeniero, ya que dentro de las convicciones con las que se realizó este software y en forma global se tiene la certeza de que los resultados que arroje un programa no tendrán validez si no están controlados por el buen juicio y conocimiento de quien lo usa.

El programa inicializa con un grupo de selección principal el cual es:



Figura 36.-Grupo de Selección

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Este menú permite seleccionar si se requiere hacer un diseño manual de columnas rectangulares y circulares, o un diseño óptimo a través de algoritmos genéticos

6.4.2.1 PÁGINA DE CONTROL DE DATOS

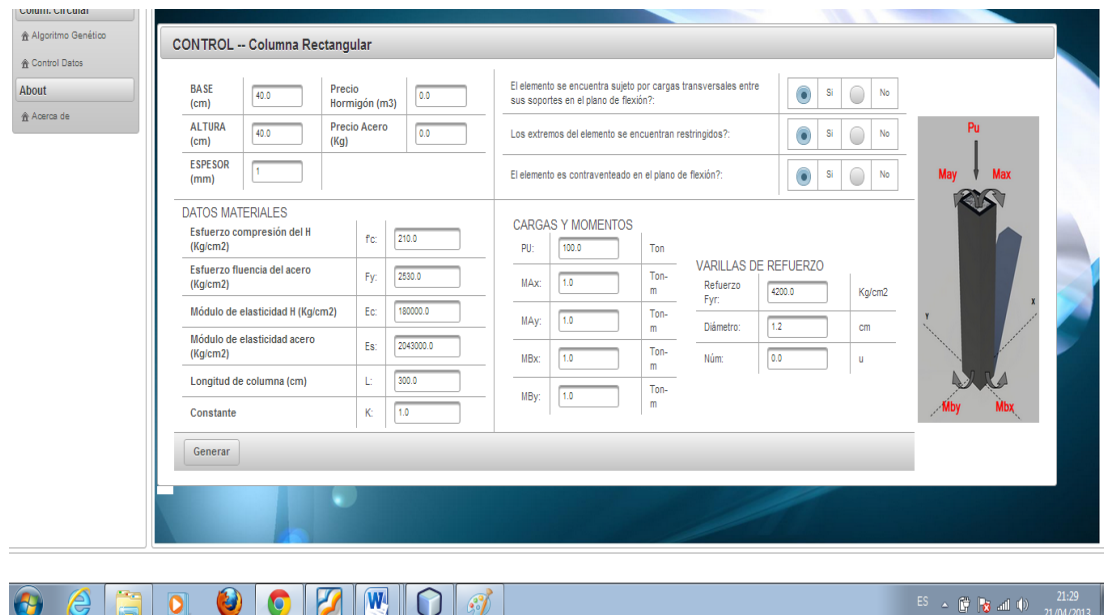


Figura 37.-Página Control de Datos

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Accediendo internamente a la página de **CONTROL** de diseño se encuentra los siguientes grupos secundarios.

a.- Ajuste de secciones del perfil de acero.

BASE (cm)	<input type="text" value="40.0"/>
ALTURA (cm)	<input type="text" value="40.0"/>
ESPESOR (mm)	<input type="text" value="1"/>

Figura 38. Ajuste de secciones del perfil de acero rectangular

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Diametro (cm)	<input type="text" value="30.0"/>
Espesor (mm)	<input type="text" value="1"/>

Figura 39. Ajuste de secciones del perfil de acero circular

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

La fig. 38 corresponde a las dimensiones del perfil rectangular a ser chequeadas mientras que la fig. 39 corresponde a las dimensiones del perfil circular.

b.- Datos de costo de materiales.

Precio Hormigón (m3)	<input type="text" value="0.0"/>
Precio Acero (Kg)	<input type="text" value="0.0"/>

Figura 40. Datos de costo de materiales

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Aquí se ingresa el precio de cada uno de los materiales, el precio del metro cubico de hormigón y el precio por kg de acero. Estos datos servirán para obtener el precio del metro lineal de columna diseñada.

c.- Características de la estructura.

El elemento se encuentra sujeto por cargas transversales entre sus soportes en el plano de flexión?:	<input checked="" type="radio"/>	Si	<input type="radio"/>	No
Los extremos del elemento se encuentran restringidos?:	<input checked="" type="radio"/>	Si	<input type="radio"/>	No
El elemento es contraventeado en el plano de flexión?:	<input checked="" type="radio"/>	Si	<input type="radio"/>	No

Figura 41.- Características de la estructura

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Esta parte del programa da la oportunidad de seleccionar las características de vinculación reales de la columna esto permitirá seleccionar los coeficientes de amplificación de momento.

d.- Datos de materiales utilizados.

DATOS MATERIALES		
Esfuerzo compresión del H (Kg/cm ²)	f _c :	<input type="text" value="210.0"/>
Esfuerzo fluencia del acero (Kg/cm ²)	F _y :	<input type="text" value="2530.0"/>
Módulo de elasticidad H (Kg/cm ²)	E _c :	<input type="text" value="180000.0"/>
Módulo de elasticidad acero (Kg/cm ²)	E _s :	<input type="text" value="2043000.0"/>
Longitud de columna (cm)	L:	<input type="text" value="300.0"/>
Constante	K:	<input type="text" value="1.0"/>

Figura 42.- Datos de materiales utilizados

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Es esta sección se ingresan las propiedades de los materiales hormigón y acero teniendo en cuenta las limitantes que requiere el LRFD para el diseño de este tipo de columnas, lo especificamos en la sección 2.3.1.2, también se pide ingresar longitud de la columna y la constante K de longitud efectiva.

e.- Datos de cargas y momentos.

CARGAS Y MOMENTOS		
PU:	<input type="text" value="100.0"/>	Ton
MAx:	<input type="text" value="1.0"/>	Ton-m
MAy:	<input type="text" value="1.0"/>	Ton-m
MBx:	<input type="text" value="1.0"/>	Ton-m
MBy:	<input type="text" value="1.0"/>	Ton-m

Figura 43.- Datos de cargas y momentos

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Estos son los valores que se obtienen previamente del análisis estructural y sirven para realizar el chequeo de la sección.

f.- Armadura interna.

VARILLAS DE REFUERZO		
Refuerzo Fyr:	<input type="text" value="4200.0"/>	Kg/cm2
Diámetro:	<input type="text" value="1.2"/>	cm
Núm:	<input type="text" value="0.0"/>	u

Figura 44.- Armadura interna

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Esta armadura se remite a varillas de acero, las cuales según la sección 2.3.1.2 se incluirán en el área de la sección de acero general.

g.-Generar.



Figura 45.- Generar.

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Este botón es el que ejecuta el diseño y muestra los resultados.

h.- Visualización de resultados

TABLE RESULTADOS

Imprimir

DEAG 1.0
ALGORITMOS GENÉTICOS

RESULTADOS:

BASE (cm)	40.0	ALTURA (cm)	40.0	ESPESOR (mm)	1
Precio Hormigón (\$/m3)	0.0	Precio Acero (\$/Kg)	0.0	Precio Final (\$/m)	0.0

DATOS MATERIALES

Fc:	210.0	Kg/cm2
Fy:	2530.0	Kg/cm2
Ec:	180000.0	Kg/cm2
Es:	2043000.0	Kg/cm2
L:	300.0	cm
K:	1.0	

CARGAS Y MOMENTOS

PU:	100.0	Ton
MAx:	1.0	Ton-m
MAy:	1.0	Ton-m
MBx:	1.0	Ton-m
MBy:	1.0	Ton-m

VARILLAS DE REFUERZO

Refuerzo Fyr:	4200.0	Kg/cm2
Diámetro:	1.2	cm
Núm:	0.0	u

CONTROL MAYOR A CERO: CORRECTO

RELACIÓN BASE/ALTURA: 1.0

CONTROL LIMITACIONES REC: FALLO

CONTROL A CARGA AXIAL: FALLO

ECUACIÓN DE INTERACCIÓN: FALLO

CONTROL A CARGA AXIAL

Sección de columna (cm2)	1600.0
Sección de Acero (cm2)	15.96
Sección mínima de acero $A_s > 0.04 A_g$	64.0
Condición	64.0
Espesor mín de pared de acero tf	0.81

CONTROL A FLEXOCOMPRESIÓN

Cm	0.85
----	------

Figura 46.- Visualización de resultados.

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

La pantalla de visualización de resultados muestra si el diseño es correcto o no lo es, indicando en que sectores se están cometiendo errores para poder corregirlos, muestra todos los requerimientos que calcula y necesita cumplir el LRFD. En la sección de diseño finaliza con el cálculo de la resistencia a compresión, y en la sección de flexocompresión finaliza con la ecuación de interacción.

6.4.2.2 PÁGINA ALGORITMO GENÉTICO

Figura 47.-Página Algoritmo Genético.

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Accediendo internamente a la página de **ALGORITMO GENÉTICO** de diseño se encuentra los siguientes grupos secundarios.

a.-Ajuste del rango de generación de poblaciones

BASE (cm)	X1min:	<input type="text" value="0"/>	X1max:	<input type="text" value="0"/>
ALTURA (cm)	X2min:	<input type="text" value="0"/>	X2max:	<input type="text" value="0"/>
ESPESOR (mm)	X3min:	<input type="text" value="0"/>	X3max:	<input type="text" value="0"/>

Figura 48.- Ajuste del rango de generación de poblaciones rectangular

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Diametro (cm)	X1min:	<input type="text" value="0"/>	X1max:	<input type="text" value="0"/>
Espesor (mm)	X2min:	<input type="text" value="0"/>	X2max:	<input type="text" value="0"/>

Figura 49- Ajuste del rango de generación de poblaciones circular

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Estos son los límites para poder generar la población inicial que el algoritmo genético necesita para iniciar. La Fig. 48 muestra donde se colocan los valores mínimo y máximo para generar dicha población para el algoritmo genético en el diseño rectangular. La Fig.49 son los límites para el algoritmo en el diseño circular.

b.- Características de la estructura.

El elemento se encuentra sujeto por cargas transversales entre sus soportes en el plano de flexión?:	<input checked="" type="radio"/>	Si	<input type="radio"/>	No
Los extremos del elemento se encuentran restringidos?:	<input checked="" type="radio"/>	Si	<input type="radio"/>	No
El elemento es contraventeado en el plano de flexión?:	<input checked="" type="radio"/>	Si	<input type="radio"/>	No

Figura 50.- Características de la estructura..

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Esta parte del programa da la oportunidad de seleccionar las características de vinculación reales de la columna esto permitirá seleccionar los coeficientes de amplificación de momento.

c.- Datos de materiales utilizados.

DATOS MATERIALES		
Esfuerzo compresión del H (Kg/cm ²)	f _c :	<input type="text" value="210.0"/>
Esfuerzo fluencia del acero (Kg/cm ²)	F _y :	<input type="text" value="2530.0"/>
Módulo de elasticidad H (Kg/cm ²)	E _c :	<input type="text" value="180000.0"/>
Módulo de elasticidad acero (Kg/cm ²)	E _s :	<input type="text" value="2043000.0"/>
Longitud de columna (cm)	L:	<input type="text" value="300.0"/>
Constante	K:	<input type="text" value="1.0"/>

Figura 51.- Datos de materiales utilizados.

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Aquí se ingresan las propiedades de los materiales hormigón y acero teniendo en cuenta las limitantes que requiere el LRFD para el diseño de este tipo de columnas, lo especificamos en la sección 2.3.1.2, también se pide ingresar longitud de la columna y la constante K de longitud efectiva.

d.- Datos de cargas y momentos.

CARGAS Y MOMENTOS		
PU:	<input type="text" value="100.0"/>	Ton
MA _x :	<input type="text" value="1.0"/>	Ton-m
MA _y :	<input type="text" value="1.0"/>	Ton-m
MB _x :	<input type="text" value="1.0"/>	Ton-m
MB _y :	<input type="text" value="1.0"/>	Ton-m

Figura 52.- Datos de cargas y momentos.

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Estos son los valores que se obtienen previamente del análisis estructural y sirven para realizar el diseño óptimo de la sección.

e.- Armadura interna.

VARILLAS DE REFUERZO		
Refuerzo Fyr:	<input type="text" value="4200.0"/>	Kg/cm2
Diámetro:	<input type="text" value="1.2"/>	cm
Núm:	<input type="text" value="0.0"/>	u

Figura 53.- Armadura interna.

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Esta armadura se remite a varillas de acero, las cuales según la sección 2.3.1.2 se incluirán en el área de la sección de acero general.

f.- Relación base altura.

RELACIÓN BASE/ALTURA:

Figura 54.- Relación base altura.

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Esta es la relación base altura del perfil de acero, esta relación solo aparece en las columnas rectangulares y nos permite orientarle al algoritmo genético para que nos entregue columnas cuadradas o rectangulares.

g.- Número de individuos

# Individuos:	<input type="text" value="100"/>
---------------	----------------------------------

Figura 55.- Número de individuos.

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Aquí se ingresan la cantidad de individuos con los que va trabajar el algoritmo desde la generación de la población inicial, mientras más generoso sea este valor el programa tendrá una cantidad considerable de datos para trabajar, teniendo en cuenta que si lo sobrecargamos el tiempo de cálculo será mayor por la gran cantidad de proceso que realizará internamente, dependerá de la capacidad del computador en donde se lo ejecute.

h.- Porcentaje de mutación.

% Mutación	<input type="text" value="5"/>
------------	--------------------------------

Figura 56.- Porcentaje de mutación.

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Este factor otorga variedad al proceso como se lo detallo en la sección 2.4.8.4.6

i.- Datos de costo de materiales.

Precio Hormigon m3	<input type="text" value="0.0"/>	Precio Acero Kg	<input type="text" value="0.0"/>
-----------------------	----------------------------------	--------------------	----------------------------------

Figura 57.- Datos de costo de materiales.

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Aquí se ingresa el precio de cada uno de los materiales, el precio del metro cubico de hormigón y el precio por kg de acero. Estos datos servirán para obtener el precio del metro lineal de columna diseñada. Y de los cual se vale el algoritmo genético para calcular la función de aptitud.

j.-Generar.

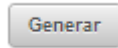


Figura 58.- Botón Generar.

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

Este botón inicializa el proceso de cálculo y muestra los resultados

H.-Visualización de resultados

POBLACIONES							
No Elemento	Variables						
	Base (X1)	Altura (X2)	Espesor (X3)	Costo (\$/ml)			
Generacion 6	Detalle x1	Detalle x2	Detalle x3	Función	Diseño	Flexocompresión	Optimo
1	21	20	6	72.7			
2	21	20	6	72.7			
3	21	20	6	72.7			
4	21	20	6	72.7			
5	21	20	6	72.7			
6	21	20	6	72.7			
7	21	20	6	72.7			
8	21	20	6	72.7			
9	21	20	6	72.7			
10	21	20	6	72.7			
11	21	20	6	72.7			
12	21	20	6	72.7			
13	21	20	6	72.7			
14	21	20	6	72.7			
15	21	20	6	72.7			
16	21	20	6	72.7			
17	21	20	6	72.7			
18	21	20	6	72.7			
19	21	20	6	72.7			
20	21	20	6	72.7			

Figura 59.- Visualización de resultados.

Elaborado por: Andrés Donoso –Stalin Parreño

El algoritmo genético muestra todas las generaciones calculadas hasta llegar a la convergencia del proceso encontrando la sección óptima que minimiza la función de costo, se pueden visualizar todos los pasos que realiza el algoritmo hasta llegar a la optimización. Las dimensiones óptimas se encuentran en la última generación y se puede visualizar todos los chequeos aceptados por el LRFD.

6.5 MONITOREO Y EVALUACIÓN DE LA PROPUESTA

Con el desarrollo del software DEAG 1.0 se obtuvieron los siguientes avances en el sistema de diseño de columnas mixtas de acero rellenas de hormigón.

- El costo de la columna por metro lineal se reduce notablemente como se lo demostró en la sección 4 ya que se encontró la sección más económica.
- El tiempo empleado en el diseño de una columna mixta rellena de hormigón se redujo de un tiempo de 3 a 5 minutos por un tiempo de 30 a 60 segundos completamente chequeado el diseño.
- Los resultados de las secciones obtenidas de los perfiles de acero no son dimensiones de perfiles comerciales, los valores arrojados por el programa comprueba que se puede llegar a optimizar un elemento, teniendo en cuenta que las dimensiones de los perfiles dado por el software se los puede llegar a fabricar en taller.
- Las dimensiones óptimas que se obtienen del diseño con algoritmos genéticos cumplen en su totalidad con los requerimientos del LRFD para el diseño de columnas mixtas de acero rellenas de hormigón.

7 BIBLIOGRAFÍA

1. AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. Manual of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design.
2. ASHQUI Laguna Félix Armando, Diseño a flexión de vigas rectangulares de hormigón armado basado en la normativa ecuatoriana y mediante la aplicación de algoritmos genéticos , 2011.
3. BORJA, Esteban – VALLEJO, Vicente. Diseño de Columnas Mixtas. Escuela Politécnica Nacional, 1986.
4. GALAMBOS Theodore V. Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999
5. GOLDBERG, David E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning
6. GÓMEZ Otero Patricia, Estudio de los Algoritmos genéticos para el desarrollo de sistemas de control.
7. MCCORMAC. Diseño de Estructuras de Acero 2da Edición. México, 2002
8. RODRÍGUEZ Piñero Piedad Tolmos, Introducción A Los Algoritmos Genéticos Y Sus Aplicaciones.
9. SILVA Cruz Dayana Gabriela, Programa para el diseño de columnas compuestas sujetas a flexocompresión biaxial por los métodos: LRFD, ACI y EUROCÓDIGO.
10. TIMOSHENKO S. Resistencia de Materiales, Decimocuarta Edición
11. VALENCIA, Gabriel. Estructuras de Acero Diseño con Factores de Carga y Resistencia. 2da. Edición, Colombia 2004,p. 392-394.

8 APÉNDICES Y ANEXOS

- 1 Ejercicio 2 de la página 83 tomado de GALAMBOS Theodore V. Diseño de estructuras de acero con LRFD. 1999 ejercicio 10.4 página 274.
- 2 Ejercicio 4 de la página 85 tomado de MCCORMAC. Diseño de Estructuras de Acero 2da Edición. México, 2002 página 85.
- 3 Apéndice ejercicio 1 de la sección 3.6.1 resuelto a través del proceso de diseño convencional
- 4 Apéndice ejercicio 1 de la sección 3.6.1 corregido el error a través del proceso de diseño convencional
- 5 Apéndice ejercicio 1 de la sección 3.6.1 resuelto a través del proceso de algoritmo genético
- 6 Apéndice ejercicio 2 de la sección 3.6.1 resuelto a través del proceso de diseño convencional
- 7 Apéndice ejercicio 3 de la sección 3.6.1 resuelto a través del proceso de diseño convencional
- 8 Apéndice ejercicio 3 de la sección 3.6.1 corregido el error a través del proceso de diseño convencional
- 9 Apéndice ejercicio 3 de la sección 3.6.1 resuelto a través del proceso de algoritmo genético
- 10 Apéndice ejercicio 4 de la sección 3.6.1 resuelto a través del proceso de diseño convencional

**DEAG 1.0**

ALGORITMOS GENÉTICOS

RESULTADOS:

BASE (cm)	31	ALTURA (cm)	48	ESPESOR (mm)	10	Precio Final \$/m	236,28
-----------	----	-------------	----	--------------	----	-------------------	--------

DATOS MATERIALES

f _c :	210.0	Kg/cm ²
F _y :	2530.0	Kg/cm ²
E _c :	180000.0	Kg/cm ²
E _s :	2043000.0	Kg/cm ²
L:	290.0	cm
K:	1.0	

CARGAS Y MOMENTOS

PU:	99.0	Ton
MA _x :	18.0	Ton-m
MA _y :	13.0	Ton-m
MB _x :	14.0	Ton-m
MB _y :	17.0	Ton-m

VARILLAS DE REFUERZO

Refuerzo F _{yr} :	4200.0	Kg/cm ²
Diámetro:	1.2	cm
Núm:	0.0	u

DISEÑO

Sección de columna (cm ²)	1488.0
Sección de Acero (cm ²)	154.0
Sección mínima de acero A _s > 0.04 A _g	59.52
Condición	59.52
Espesor mín de pared de acero t _f	0.63
Espesor mín de pared de acero t _w	0.98
Inercia en X-X I _x (cm ⁴)	50467.33
Inercia en Y-Y I _y (cm ⁴)	25672.83
Radio de giro en X-X r _x (cm)	18.1
Radio de giro en Y-Y r _y (cm)	12.91
Relación de esbeltez λ	22.46
Esfuerzo de fluencia modificado F _{my} (kg/cm ²)	4076.23
Módulo de elasticidad modificado E _m (kg/cm ²)	2666688.31
Landa λ _c	0.28

FLEXOCOMPRESION

Cm	0.85
B _{1x}	1.0
B _{1y}	1.0
M _{nominal x} (Ton-m)	46.13
M _{nominal y} (Ton-m)	34.13
M _{ux} (Ton-m)	18.0
M _{uy} (Ton-m)	17.0
Division de P	0.2
Ecuación de iteración	0.99

$\Phi_c P_n =$ (Ton)	497.02
----------------------	--------

**DEAG 1.0**

ALGORITMOS GENÉTICOS

RESULTADOS:

BASE (cm)	40.0	ALTURA (cm)	40.0	ESPESOR (mm)	11
Precio Hormigón (\$/m ³)	140.0	Precio Acero (\$/Kg)	1.8	Precio Final (\$/m)	261.85

DATOS MATERIALES

fc:	210.0	Kg/cm ²
Fy:	2530.0	Kg/cm ²
Ec:	180000.0	Kg/cm ²
Es:	2043000.0	Kg/cm ²
L:	300.0	cm
K:	1.0	

CARGAS Y MOMENTOS

PU:	115.0	Ton
MAx:	20.0	Ton-m
MAy:	19.0	Ton-m
MBx:	15.0	Ton-m
MBy:	18.0	Ton-m

VARILLAS DE REFUERZO

Refuerzo Fyr:	4200.0	Kg/cm ²
Diámetro:	1.2	cm
Núm:	0.0	u

CONTROL MAYOR A CERO:

CORRECTO

CONTROL RELACION:

1.0

CONTROL LIMITACIONES REC:

CORRECTO

CONTROL A CARGA AXIAL:

CORRECTO

ECUACION DE INTERACCION:

CORRECTO

DISEÑO

Sección de columna (cm ²)	1600.0
Sección de Acero (cm ²)	171.16
Sección mínima de acero As > 0.04 Ag	64.0
Condición	64.0
Espesor mín de pared de acero tf	0.81
Espesor mín de pared de acero tw	0.81

FLEXOCOMPRESION

Cm	0.85
B1x	1.0
B1y	1.0

Inercia en X-X I_x (cm ⁴)	43201.35	Mnominal x (Ton-m)	45.18
Inercia en Y-Y I_y (cm ⁴)	43201.35	Mnominal y (Ton-m)	45.18
Radio de giro en X-X r_x (cm)	15.89	Mux (Ton-m)	20.0
Radio de giro en Y-Y r_y (cm)	15.89	Muy (Ton-m)	19.0
Relación de esbeltez λ	18.88	Division de P	0.2
Esfuerzo de fluencia modificado F_{my} (kg/cm ²)	4020.11	Ecuación de Iteración	0.97
Módulo de elasticidad modificado E_m (kg/cm ²)	2644054.45		
Landa λ_c	0.23		
$\Phi_c P_n =$ (Ton)	571.73		

**DEAG 1.0**

ALGORITMOS GENÉTICOS

RESULTADOS:

BASE (cm)	40.0	ALTURA (cm)	40.0	ESPESOR (mm)	10
Precio Hormigón (\$/m3)	140.0	Precio Acero (\$/Kg)	1.8	Precio Final (\$/m)	240.64

DATOS MATERIALES

fc:	210.0	Kg/cm2
Fy:	2530.0	Kg/cm2
Ec:	180000.0	Kg/cm2
Es:	2043000.0	Kg/cm2
L:	300.0	cm
K:	1.0	

CARGAS Y MOMENTOS

PU:	115.0	Ton
MAx:	20.0	Ton-m
MAy:	19.0	Ton-m
MBx:	15.0	Ton-m
MBy:	18.0	Ton-m

VARILLAS DE REFUERZO

Refuerzo Fyr:	4200.0	Kg/cm2
Diámetro:	1.2	cm
Núm:	0.0	u

CONTROL MAYOR A CERO:

CORRECTO

CONTROL RELACION:

1.0

CONTROL LIMITACIONES REC:

CORRECTO

CONTROL A CARGA AXIAL:

CORRECTO

ECUACION DE INTERACCION:

FALLO

DISEÑO

Sección de columna (cm2)	1600.0
Sección de Acero (cm2)	156.0
Sección mínima de acero $A_s > 0.04 A_g$	64.0
Condición	64.0
Espesor mín de pared de acero t_f	0.81
Espesor mín de pared de acero t_w	0.81

FLEXOCOMPRESION

Cm	0.85
B1x	1.0
B1y	1.0

Inercia en X-X I_x (cm ⁴)	39572.0	Mnominal x (Ton-m)	42.95
Inercia en Y-Y I_y (cm ⁴)	39572.0	Mnominal y (Ton-m)	42.95
Radio de giro en X-X r_x (cm)	15.93	Mux (Ton-m)	20.0
Radio de giro en Y-Y r_y (cm)	15.93	Muy (Ton-m)	19.0
Relación de esbeltez λ	18.84	Division de P	0.21
Esfuerzo de fluencia modificado F_{my} (kg/cm ²)	4182.27	Ecuación de Iteración	1.02
Módulo de elasticidad modificado E_m (kg/cm ²)	2709461.54		
Landa λ_c	0.24		
$\Phi_c P_n =$ (Ton)	541.98		

**DEAG 1.0**

ALGORITMOS GENÉTICOS

RESULTADOS:

BASE (cm)	30.0	ALTURA (cm)	50.0	ESPESOR (mm)	11
Precio Hormigón (\$/m ³)	140.0	Precio Acero (\$/Kg)	1.8	Precio Final (\$/m)	260.45

DATOS MATERIALES

fc:	210.0	Kg/cm ²
Fy:	2530.0	Kg/cm ²
Ec:	180000.0	Kg/cm ²
Es:	2043000.0	Kg/cm ²
L:	290.0	cm
K:	1.0	

CARGAS Y MOMENTOS

PU:	99.0	Ton
MAx:	18.0	Ton-m
MAy:	13.0	Ton-m
MBx:	14.0	Ton-m
MBy:	17.0	Ton-m

VARILLAS DE REFUERZO

Refuerzo Fyr:	4200.0	Kg/cm ²
Diámetro:	1.2	cm
Núm:	0.0	u

CONTROL MAYOR A CERO:

CORRECTO

CONTROL RELACION:

0.6

CONTROL LIMITACIONES REC:

CORRECTO

CONTROL A CARGA AXIAL:

CORRECTO

ECUACION DE INTERACCION:

CORRECTO

DISEÑO

Sección de columna (cm ²)	1500.0
Sección de Acero (cm ²)	171.16
Sección mínima de acero As > 0.04 Ag	60.0
Condición	60.0
Espesor mín de pared de acero tf	0.61
Espesor mín de pared de acero tw	1.02

FLEXOCOMPRESION

Cm	0.85
B1x	1.0
B1y	1.0

Inercia en X-X I_x (cm ⁴)	59484.43	Mnominal x (Ton-m)	50.58
Inercia en Y-Y I_y (cm ⁴)	26918.27	Mnominal y (Ton-m)	35.5
Radio de giro en X-X r_x (cm)	18.64	Mux (Ton-m)	18.0
Radio de giro en Y-Y r_y (cm)	12.54	Muy (Ton-m)	17.0
Relación de esbeltez λ	23.12	Division de P	0.18
Esfuerzo de fluencia modificado F_{my} (kg/cm ²)	3915.83	Ecuación de iteración	0.93
Módulo de elasticidad modificado E_m (kg/cm ²)	2601988.55		
Landa λ_c	0.29		
$\Phi_c P_n$ = (Ton)	542.32		

**DEAG 1.0**

ALGORITMOS GENÉTICOS

RESULTADOS:

BASE (cm)	30.0	ALTURA (cm)	50.0	ESPESOR (mm)	10
Precio Hormigón (\$/m ³)	140.0	Precio Acero (\$/Kg)	1.8	Precio Final (\$/m)	239.24

DATOS MATERIALES

fc:	210.0	Kg/cm ²
Fy:	2530.0	Kg/cm ²
Ec:	180000.0	Kg/cm ²
Es:	2043000.0	Kg/cm ²
L:	290.0	cm
K:	1.0	

CARGAS Y MOMENTOS

PU:	99.0	Ton
MAx:	18.0	Ton-m
MAy:	13.0	Ton-m
MBx:	14.0	Ton-m
MBy:	17.0	Ton-m

VARILLAS DE REFUERZO

Refuerzo Fyr:	4200.0	Kg/cm ²
Diámetro:	1.2	cm
Núm:	0.0	u

CONTROL MAYOR A CERO:

CORRECTO

CONTROL RELACION:

0.6

CONTROL LIMITACIONES REC:

FALLO

CONTROL A CARGA AXIAL:

CORRECTO

ECUACION DE INTERACCION:

CORRECTO

DISEÑO

Sección de columna (cm ²)	1500.0
Sección de Acero (cm ²)	156.0
Sección mínima de acero As > 0.04 Ag	60.0
Condición	60.0
Espesor mín de pared de acero tf	0.61
Espesor mín de pared de acero tw	1.02

FLEXOCOMPRESION

Cm	0.85
B1x	1.0
B1y	1.0

Inercia en X-X I_x (cm ⁴)	54452.0
Inercia en Y-Y I_y (cm ⁴)	24692.0
Radio de giro en X-X r_x (cm)	18.68
Radio de giro en Y-Y r_y (cm)	12.58
Relación de esbeltez λ	23.05
Esfuerzo de fluencia modificado F_{my} (kg/cm ²)	4067.85
Módulo de elasticidad modificado E_m (kg/cm ²)	2663307.69
Landa λ_c	0.29
$\Phi_c P_n =$ (Ton)	491.96

$M_{nominal x}$ (Ton-m)	48.0
$M_{nominal y}$ (Ton-m)	33.72
M_{ux} (Ton-m)	18.0
M_{uy} (Ton-m)	17.0
Division de P	0.2
Ecuación de Iteración	0.98

**DEAG 1.0**

ALGORITMOS GENÉTICOS

RESULTADOS:

DIAMETRO (cm)	22.0	ESPESOR (mm)	8
Precio Hormigón (\$/m3)	140.0	Precio Acero (\$/Kg)	1.8
Precio Final (\$/m)	79.86		

DATOS MATERIALES

f _c :	246.085	Kg/cm ²
F _y :	2530.0	Kg/cm ²
E _c :	180000.0	Kg/cm ²
E _s :	2043000.0	Kg/cm ²
L:	365.76	cm
K:	1.0	

CARGAS Y MOMENTOS

PU:	0.0	Ton
MA _x :	0.0	Ton-m
MA _y :	0.0	Ton-m
MB _x :	0.0	Ton-m
MB _y :	0.0	Ton-m

VARILLAS DE REFUERZO

Refuerzo F _{yr} :	4200.0	Kg/cm ²
Diámetro:	1.2	cm
Núm:	0.0	u

CONTROL MAYOR A CERO:	CORRECTO	CONTROL A CARGA AXIAL:	CORRECTO
CONTROL LIMITACIONES REC:	CORRECTO	ECUACION DE INTERACCION:	CORRECTO
DISEÑO		FLEXOCOMPRESION	
Sección de columna (cm ²)	380.13	Cm	0.85
Sección de Acero (cm ²)	53.28	B1x	1.0
Sección mínima de acero A _s > 0.04 A _g	15.21	B1y	1.0
Condición	15.21	Zx	119.85
Espesor mín de pared de acero t _f	0.27	Zy	119.85
Inercia en X-X I _x (cm ⁴)	2997.61	Mnominal x (Ton-m)	4.11
Radio de giro en X-X r _x (cm)	7.5		

L (cm)	365.76	Mnominal y (Ton-m)	4.11
K (cm)	1.0	Mux (Ton-m)	0.0
Relación de esbeltez λ	48.76	Muy (Ton-m)	0.0
Esfuerzo de fluencia modificado F_{my} (kg/cm ²)	3813.15	Division de P	0.0
Módulo de elasticidad modificado E_m (kg/cm ²)	2484679.15	Ecuación de Iteración	0.0
Landa λ_c	0.61		
$\Phi_c P_n =$ (Ton)	147.93		

**DEAG 1.0**

ALGORITMOS GENÉTICOS

RESULTADOS:

BASE (cm)	15.0	ALTURA (cm)	15.0	ESPESOR (mm)	5
Precio Hormigón (\$/m ³)	0.0	Precio Acero (\$/Kg)	0.0	Precio Final (\$/m)	0.0
DATOS MATERIALES		CARGAS Y MOMENTOS		VARILLAS DE REFUERZO	
f _c :	210.0 Kg/cm ²	PU:	0.0 Ton	Refuerzo	4200.0 Kg/cm ²
F _y :	2530.0 Kg/cm ²	MA _x :	0.0 Ton-m	F _{yr} :	
E _c :	180000.0 Kg/cm ²	MA _y :	0.0 Ton-m	Diámetro:	1.2 cm
E _s :	2043000.0 Kg/cm ²	MB _x :	0.0 Ton-m	Núm:	0.0 u
L:	427.0 cm	MBy:	0.0 Ton-m		
K:	1.0				
CONTROL MAYOR A CERO:		CORRECTO		CONTROL LIMITACIONES REC:	CORRECTO
CONTROL RELACION:		1.0		CONTROL A CARGA AXIAL:	CORRECTO
				ECUACION DE INTERACCION:	CORRECTO
DISEÑO				FLEXOCOMPRESION	
Sección de columna (cm ²)	225.0			Cm	0.85
Sección de Acero (cm ²)	29.0			B1x	1.0
Sección mínima de acero A _s > 0.04 A _g	9.0			B1y	1.0
Condición	9.0			Mnominal x (Ton-m)	2.65
Espesor mín de pared de acero t _f	0.3			Mnominal y (Ton-m)	2.65
Espesor mín de pared de acero t _w	0.3				
Inercia en X-X I _x (cm ⁴)	1017.42				
Inercia en Y-Y I _y (cm ⁴)	1017.42				

Radio de giro en X-X r_x (cm)	5.92	Mux (Ton-m)	0.0
Radio de giro en Y-Y r_y (cm)	5.92	Muy (Ton-m)	0.0
Relación de esbeltez λ	72.09	Division de P	0.0
Esfuerzo de fluencia modificado F_{my} (kg/cm ²)	3736.41	Ecuación de Iteración	0.0
Módulo de elasticidad modificado E_m (kg/cm ²)	2529620.69		
Landa λ_c	0.88		
$\Phi_c P_n =$ (Ton)	66.53		

**DEAG 1.0**

ALGORITMOS GENÉTICOS

RESULTADOS:

BASE (cm)	42	ALTURA (cm)	41	ESPESOR (mm)	9	Precio Final \$/m	228,59
-----------	----	-------------	----	--------------	---	-------------------	--------

DATOS MATERIALES

fc:	210.0	Kg/cm ²
Fy:	2530.0	Kg/cm ²
Ec:	180000.0	Kg/cm ²
Es:	2043000.0	Kg/cm ²
L:	300.0	cm
K:	1.0	

CARGAS Y MOMENTOS

PU:	115.0	Ton
MAx:	20.0	Ton-m
MAy:	19.0	Ton-m
MBx:	15.0	Ton-m
MBy:	18.0	Ton-m

VARILLAS DE REFUERZO

Refuerzo Fyr:	4200.0	Kg/cm ²
Diámetro:	1.2	cm
Núm:	0.0	u

DISEÑO

Sección de columna (cm ²)	1722.0
Sección de Acero (cm ²)	146.16
Sección mínima de acero $A_s > 0.04 A_g$	68.88
Condición	68.88
Espesor mín de pared de acero t_f	0.85
Espesor mín de pared de acero t_w	0.83
Inercia en X-X I_x (cm ⁴)	39431.94
Inercia en Y-Y I_y (cm ⁴)	40915.63
Radio de giro en X-X r_x (cm)	16.43
Radio de giro en Y-Y r_y (cm)	16.73
Relación de esbeltez λ	18.26
Esfuerzo de fluencia modificado F_{my} (kg/cm ²)	4454.52
Módulo de elasticidad modificado E_m (kg/cm ²)	2819275.86
Landa λ_c	0.23

FLEXOCOMPRESION

Cm	0.85
B1x	1.0
B1y	1.0
Mnominal x (Ton-m)	44.25
Mnominal y (Ton-m)	44.98
Mux (Ton-m)	20.0
Muy (Ton-m)	19.0
Division de P	0.22
Ecuación de Iteración	1.0

$\Phi_c P_n =$ (Ton)	522.64
----------------------	--------