APLICACIÓN DE UN ALGORITMO HEURÍSTICO PARA OPTIMIZACIÓN DEL PESO DE UNA TORRE DE ENERGÍA DE ALTA TENSIÓN

JEFFREY JOSÉ GUEVARA CORZO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL BUCARAMANGA 2018

APLICACIÓN DE UN ALGORITMO HEURÍSTICO PARA OPTIMIZACIÓN DEL PESO DE UNA TORRE DE ENERGÍA DE ALTA TENSIÓN

JEFFREY JOSÉ GUEVARA CORZO

Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Ingeniería Estructural

DIRECTOR: OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO PhD. En Ingeniería Civil

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL BUCARAMANGA 2018

DEDICATORIA

A dios por brindarme la sabiduría para desarrollar este proyecto

A mis padres por su apoyo incondicional

A mis profesores, que me motivaron en la investigación

Jeffrey José Guevara Corzo

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Oscar Begambre, por sus consejos y recomendaciones en la construcción y redacción de esta tesis.

A los profesores de esta maestría, quienes con la mejor aptitud aportaron su conocimiento y experiencia en mi formación.

A la universidad industrial de Santander, por permitirme hacer parte de este proceso formativo en beneficio de mi desarrollo académico.

Jeffrey José Guevara Corzo

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACION DEL PROBLEMA	18
2. OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GENERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. METODOLOGÍA	21
4. ALCANCE DE LA PROPUESTA	23
5. MARCO TEORICO	25
5.1 ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN	25
5.1.1 Algoritmo heurístico.	27
5.1.2 Temple simulado (simulated annealing - SA)	28
5.2 DISEÑO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS	31
5.2.1 Elementos a compresión	31
5.2.1.1 Pandeo global	31
5.2.1.2 Pandeo local	32
5.2.2 Elementos a tensión	32
5.2.2.1 Estado límite de fluencia de la sección bruta	32
5.2.2.2 Estado límite de fractura.	32
5.2.2.3 Estado limite por aplastamiento.	33
5.2.2.4 Estado limite por bloque de cortante	33

6. NORMATIVA EMPLEADA PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS METALICAS
DE TRANSMISION DE ENERGIA
6.1 PARÁMETROS PARA CARGA DE ASCE 74 - 09
6.1.1 Cargas relacionadas con el clima
6.1.1.1 Cargas de Viento extremo
6.1.1.2 Cargas de viento de alta intensidad43
6.1.1.3 Carga de hielo y viento44
6.1.2 Cargas adicionales46
6.1.2.1 Cargas de construcción y mantenimiento
6.1.2.2 Carga de protección contra caídas47
6.1.2.3 Cargas longitudinales47
6.1.2.4 Vibraciones estructurales
6.1.2.5 Movimiento de conductores
6.1.2.6 Carga sísmica51
6.1.3 Sistema de cables conductores52
6.1.3.1 Catenaria
6.1.3.2 Sección de tensiones54
6.1.3.3 Condiciones del cable (materiales)
6.1.3.4 Límites de tensión del cable58
6.1.3.5 Calculo de la tensión del cable
6.2 PARÁMETROS DE DISEÑO DE ASCE 10 – 1559
6.2.1 Tamaños mínimos
6.2.2 Materiales permitidos por la norma59
6.2.3 Elementos sometidos a tensión60
6.2.4 Elementos sometidos a compresión60
6.2.4.1 Relación de esbeltez62

7. PROGRAMACIÓN	65
7.1 PROGRAMACIÓN REALIZADA PARA	A SOLUCIONAR UNA ESTRUCTURA DE
TIPO CERCHA	

7.1.1 Verificación con algoritmo en Matlab y SAP2000	67
7.2 PROGRAMACIÓN DE LA ESTRUCTURA A OPTIMIZAR	72
7.3 PROGRAMACIÓN DE CARGAS DE ESTRUCTURA DE TRANSMISIO	ÓN DE
ENERGÍA	76
7.4 PROGRAMACIÓN DE RESTRICCIONES DE CRITERIOS DE DISEÑO	DE LA
ASCE 10-15	86
7.5 PROGRAMACIÓN PARA GENERAR UNA SOLUCIÓN (CONFIGURACIÓ	ÓN DE
PERFILES)	88
7.6 PROGRAMACIÓN DE FUNCIÓN OBJETIVO	88
8. RESULTADOS	89
8.1 PRIMER MODELO (554 VARIABLES)	89
8.2 SEGUNDO MODELO (34 VARIABLES)	91
8.3 TERCER MODELO (9 VARIABLES)	92
8.4 RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL PESO	94
9. CONCLUSIONES	99
10. OBSERVACIONES Y FUTUROS TRABAJOS	101
BIBLIOGRAFIA	102
ANEXOS	107

LISTA DE TABLAS

Pág.
Tabla 1. Exponente de exposición y gradiente para cálculo de Coeficiente de
exposición35
Tabla 2. Factores K y Ls para cálculo de coeficiente de ráfaga37
Tabla 3. Coeficientes topográficos para categoría de exposición C39
Tabla 4. Coeficientes topográficos para todas las categorías40
Tabla 5. Coeficiente de fuerza para estructuras de sección rectangular o triangular
41
Tabla 6. Coeficiente de fuerza para estructuras de sección circular41
Tabla 7. Tabla de frecuencias de tornados en los estados unidos43
Tabla 8. Limites de tensión de cables conductores y guías
Tabla 9. Cargas de estructura de verificación68
Tabla 10. Comparación de cargas de estructura de verificación70
Tabla 11. Comparación de desplazamiento de estructura de verificación71
Tabla 12. Comparación de reacciones de los apoyos de estructura de verificación
Tabla 13. Argumentos de entrada para cálculo de cargas76
Tabla 14. Propiedades mecánicas del cable conductor y guía77
Tabla 15. Ubicación y temperaturas para el cálculo de tensiones77
Tabla 16. Factores de categoría de exposición77
Tabla 17. Factores y presión de viento para cables (caso viento extremo)78
Tabla 18. factores y presión de viento para estructura de transmisión (caso viento
extremo)78
Tabla 19. presiones de viento para casos adicionales (valores en KPa)78
Tabla 20. Calculo de tensiones iniciales de cables conductores y guías79
Tabla 21. Resumen de cargas 84
Tabla 22. Presiones viento para estructura 84

Tabla 23. Resumen proceso de optimización - primer modelo 89
Tabla 24. Resumen proceso de optimización - segundo modelo
Tabla 25. Resumen proceso de optimización - tercer modelo 92
Tabla 26. Porcentaje de reducción con respecto a diseño de referencia del primer
modelo94
Tabla 27. Porcentaje de reducción con respecto a diseño de referencia del segundo
modelo94
Tabla 28. Porcentaje de reducción con respecto a diseño de referencia del tercer
modelo95
Tabla 29. Porcentaje de reducción del peso real respecto al primer modelo97
Tabla 30. Porcentaje de reducción del peso real respecto al segundo modelo97
Tabla 31. Porcentaje de reducción del peso real respecto al tercer modelo98

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema genérico de algoritmo de optimización	27
Figura 2. Mapa de amenaza eólica de Colombia	38
Figura 3. Esquema de cálculo de relación topográfica	39
Figura 4. Acción de viento en cables conductores/Guías y estructura	42
Figura 5. Factor de carga estática residual	49
Figura 6. Factor de carga longitudinal	50
Figura 7. Esquema de curva catenaria sin inclinación	52
Figura 8. Esquema de curva catenaria con inclinación	53
Figura 9. Perfil de sección de tensiones	55
Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de optimización	65
Figura 11. Estructura de verificacion	67
Figura 12. Modelo de estructura de verificación	69
Figura 13. Sección transversal de elementos de estructura de verificación	69
Figura 14. Propiedades mecánicas de elementos de estructura de verificación	า70
Figura 15. Esquema estructura a optimizar	73
Figura 16. Distribución de variables del segundo modelo	74
Figura 17. Distribución de variables del tercer modelo	75
Figura 18. Distribución de carga de cables en la estructura	79
Figura 19. Distribución de presiones en torre de alta tensión	85
Figura 20. Diagrama de flujo de restricciones de diseño de ASCE 10-15	87
Figura 21. Variación del peso en la optimización - primer modelo	90
Figura 22. Variación del peso en la optimización - segundo modelo	92
Figura 23. Variación del peso en la optimización - tercer modelo	93
Figura 24. Plano de torre de transmisión real de 115KV	96

LISTA DE ANEXOS

"Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la base de datos de la Biblioteca UIS"

- Anexo A. Modelo-Optimizacion-554
- Anexo B. Modelo-Optimización-Inv
- Anexo C. Modelo-Optimización-Mod

RESUMEN

TITULO: APLICACIÓN DE UN ALGORITMO HEURÍSTICO DE PARA OPTIMIZACIÓN DEL PESO DE UNA TORRE DE ENERGÍA DE ALTA TENSIÓN*

AUTOR: JEFFREY JOSÉ GUEVARA CORZO**

PALABRAS CLAVE: Diseño optimo, algoritmo heurístico, simulated annealing, estructuras metálicas.

DESCRIPCION

La aplicación de los diferentes métodos de optimización, en el diseño de diferentes tipos de estructuras civiles, es una línea de investigación relativamente joven que ha ido ganando importancia, en la comunidad científica y en la industria, por su flexibilidad y los grandes beneficios económicos que estos pueden brindar. En este documento se presenta un procedimiento de diseño óptimo, aplicando el algoritmo del temple simulado (Simulated Annealing), y los resultados de su aplicación para determinar el peso mínimo de una estructura metálica para transmisión de energía. El procedimiento realizado se adapta a la naturaleza discreta que tienen los perfiles que compone la estructura, en donde se utiliza la perfileria comercial en L que está presente en el mercado colombiano, aplicando tres diferentes agrupaciones de variables, analizando las repercusiones que tiene esta estrategia en la eficiencia del algoritmo (disminución del peso) y el costo computacional del mismo (tiempo de procesamiento). Mediante el uso del temple simulado, se puede llegar a un diseño final con una reducción de hasta un 12% de su peso inicial.

Considerando que en el país no existe una guía o parámetros para el diseño de este tipo de estructuras metálicas, se siguieron los documentos ASCE 72-09 y ASCE 10-97, los cuales brindan los parámetros necesarios para el diseño de la estructura y las restricciones para el algoritmo del temple simulado.

^{*} Proyecto de grado

^{**} Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director. Oscar Javier Begambre Carrillo, PhD. en Ingenieria Civil

ABSTRACT

TITLE: APLICATION OF A HEURISTIC ALGORITHM FOR OPTIMIZING THE WEIGHT OF A TRANSMISION TOWER**

AUTHOR: JEFFREY JOSÉ GUEVARA CORZO**

KEYWORDS: Optimal design, heuristic algorithm, simulated annealing, metallic structures.

DESCRIPTION

The application of the different optimization methods, in the design of different types of civil structures, is a relatively young line of research, which has been gaining importance, in the scientific community and in industry, due to its flexibility and the great economic benefits that these can provide. This document presents an optimal design procedure, applying the Simulated Annealing algorithm, and the results of its application to determine the minimum weight of a metallic structure for energy transmission. The procedure performed is adapted to the discrete nature of the profiles that constitute the structure, where the commercial L-shaped profiling of the Colombian market is used, applying three different groupings of variables, analyzing the repercussions that this strategy has on the efficiency of the algorithm (weight reduction) and the computational cost of the algorithm (time). By using simulated weathering, a final design can be achieved with a reduction of up to 12% of its initial weight.

Considering that in the country there is no guide or parameters for the design of this type of structures, documents ASCE 72-09 and ASCE 10-97 were followed, which provide the necessary parameters for the design of the structure and the restrictions for the simulated temple algorithm.

^{*} Grade work

^{**} Faculty of engineering. School of civil engineering. Advisor. Oscar Javier Begambre Carrillo, PhD. en Ingenieria Civil

INTRODUCCIÓN

En la concepción de cualquier obra civil, haciendo énfasis en sus procesos de diseño, es frecuente, en la fase inicial del proyecto, tener varias opciones definidas por un grupo de ingenieros o un comité técnico. Estas opciones presentan múltiples soluciones que buscan satisfacer los objetivos del diseño. En este proceso, la definición de factores como la geometría de la estructura o el tipo de material que se empleará tendrá gran impacto en su peso y en el costo final del proyecto. Sin embargo, dentro del proceso que busca finalmente satisfacer las necesidades, se encuentran procedimientos fundamentados solo en la experiencia particular del diseñador o en donde muchas veces, se define la configuración estructural (geometría, materiales) con base a proyectos similares.

Una alternativa del procedimiento descrito, que pueden dar mayor control y que no solo se fundamente en procedimientos basados en la experiencia, la constituyen los métodos heurísticos aplicados al diseño estructural. Dentro de estos métodos, se encuentran el temple simulado (Simulated Annealing - SA), los algoritmos genéticos, la búsqueda tabú y la optimización mediante colonia de hormigas (*ant colony optimization*). Estos métodos se han aplicado de manera exitosa en diferentes problemas de la ingeniería estructural por autores como Zhang y Mueller en muros de cortante para edificaciones altas¹ y por Tort, Şahin y Hasançebi para optimizar torres de transmisión de energía² con una geometría definida. También se encuentran ejemplos de optimización topológica de este tipo de estructuras en las referencias³⁴.

¹ Y. Zhang and C. Mueller, "Shear wall layout optimization for conceptual design of tall buildings," Eng. Struct., vol. 140, pp. 225–240, 2017.

² C. Tort, S. Şahin, and O. Hasançebi, "Optimum design of steel lattice transmission line towers using simulated annealing and PLS-TOWER," Comput. Struct., vol. 179, pp. 75–94, 2017.

³ F. Ahmed, K. Deb, and B. Bhattacharya, "Structural topology optimization using multi-objective genetic algorithm with constructive solid geometry representation," Appl. Soft Comput. J., vol. 39, pp. 240–250, 2016.

⁴ V. S. Almeida, H. L. Simonetti, and F. De Assis Das Neves, "Seleção de topologias ótimas de estruturas elásticas 2D com restrição de tensão -via smooth evolutionary structural optimization," Rev. Int. Metod. Numer. para Calc. y Disen. en Ing., vol. 30, no. 2, pp. 69–76, 2014.

En los primeros años de la aplicación de los métodos heurísticos en la optimización estructural, uno de los mayores inconvenientes era el alto costo computacional requerido para producir un resultado óptimo (debido al gran número de iteraciones que se deben realizar). En la actualidad la aplicación de estos algoritmos es un procedimiento que se puede costear, producto del gran avance tecnológico en herramientas de cómputo y elevada capacidad de procesamiento de los procesadores que se disponen en la actualidad. Hoy en día, la omisión de un proceso de optimización (aplicado al diseño estructural) es frecuentemente asociada a factores como:

- Desconocimiento de estos por parte de los ingenieros diseñadores.
- Carencia de software especializado para este tipo de análisis.

Finalmente, en este trabajo se realizó una aplicación del algoritmo de temple simulado (*Simulated Annealing*), para optimizar el peso de una estructura metálica para transmisión de energía. La estructura se modeló empleando elementos tipo cercha y los perfiles empleados corresponden a los disponibles comercialmente en Colombia. De esta forma, las variables del problema de optimización, aquí tratado, son discretas.

En los siguientes capítulos se presenta, de forma detallada, el procedimiento de optimización que se empleó y su código junto con los resultados y conclusiones obtenidos.

1. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACION DEL PROBLEMA

El desarrollo de diferentes tipos de algoritmos para búsqueda de sistemas óptimos, es un área de investigación que ha tenido gran aplicabilidad en las estructuras y que han ido evolucionando en compañía y a la par de disciplinas relativamente jóvenes como la inteligencia artificial y la mecánica computacional⁵⁶. La optimización de estructuras articuladas, más concretamente, estructuras metálicas diseñadas con el propósito de ser torres de transmisión de energía, es un problema que han sido abordado por autores como Sheppard, Rao y otros^{7,8} desde mediados del siglo XX en donde se ha obtenido unos primeros lineamientos para la optimización de este tipo de estructuras utilizando programación dinámica. Posteriores investigaciones han enfocado sus esfuerzos en la aplicación de algoritmos de búsqueda global aleatoria y evolutivos para la obtención de configuraciones óptimas para el diseño de torres de transmisión de energía.^{9,10,11}.

La aplicación de distintos métodos heurísticos genéricos (técnicas del temple simulado (*SA*) o los diferentes algoritmos genéticos o evolutivos) para problemas de optimización estructural, ha demostrado ser una alternativa eficiente y eficaz, con costos computacionales costeables¹²,¹³.

¹² Opcit I. Couceiro, J. París, S. Martínez, I.

⁵ E. Oktay, H. U. Akay, and O. T. Sehitoglu, "Three-dimensional structural topology optimization of aerial vehicles under aerodynamic loads," Comput. Fluids, vol. 92, pp. 225–232, 2014.

⁶ I. Pay, "Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado," vol. 22, pp. 241–259, 2006.

 ⁷ M. J. Box, "A New Method of Constrained Optimization and a Comparison With Other Methods," Comput. J., vol. 8, no. 1, pp. 42–52, 1965.
 ⁸ C. P. Pantelides and S. R. Tzan, "Optimal design of dynamically constrained structures," Comput. Struct., vol. 62, no. 1, pp.

⁸ C. P. Pantelides and S. R. Tzan, "Optimal design of dynamically constrained structures," Comput. Struct., vol. 62, no. 1, pp. 141–149, 1997.

⁹ Opcit C. Tort, S. Şahin, and O. Hasançebi.

¹⁰ I. Couceiro, J. París, S. Martínez, I. Colominas, F. Navarrina, and M. Casteleiro, "Structural optimization of lattice steel transmission towers," Eng. Struct., vol. 117, pp. 274–286, 2016.

¹¹ M. Casteleiro, J. París, S. Martinez, F. Navarrina, and İ. Colominas, "Optimización estructural de torres de alta tensión," Asoc. Argentina Mecánica Comput., vol. XXIX, pp. 15–18, 2010.

¹³ Opcit M. Casteleiro, J. París, S. Martinez, F. Navarrina

Este trabajo presenta los fundamentos y la aplicación del algoritmo del temple simulado (Simulated Annealing)¹⁴ en la optimización o búsqueda del peso mínimo de una torre de transmisión de energía, que podrían ser empleadas en Colombia, por empresas como CENS, ESSA, ISA, EEB, por citar algunos ejemplos, en proyectos de distribución de energía eléctrica. Considerando que este tipo de proyectos abarcan una distancia considerable, esto implica la construcción de un elevado número de torres de transmisión. Es este contexto, obtener un diseño óptimo para las torres del proyecto, traería grandes beneficios económicos.

Teniendo en cuenta que desde el punto de vista normativo, el país no cuenta con ninguna legislación o norma que contemple estas estructuras de transmisión de energía, se consideran las normas ASCE 74-09 y ASCE 10-97¹⁵,¹⁶ las cuales brindan los parámetros necesarios para el diseño de la estructura y las restricciones necesarias para el desarrollo del algoritmo.

¹⁴ S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and V. M. P., "Optimization by Simulated Annealing," vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 2007.

¹⁵ Opcit. ASCE, "Design of Latticed Steel Transmission Structures 10-15.

¹⁶ Opcit ASCE and SEI

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

• Generar y aplicar el algoritmo del temple simulado (*Simulated Annealing*) en la optimización del peso de una torre de energía de alta tensión.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir y programar el algoritmo de optimización (procedimiento).
- Determinar y validar la eficiencia computacional del algoritmo, el tiempo de procesamiento y estabilidad, respecto a procesos de optimización similares encontrados en la literatura.
- Calcular la diferencia del peso de la estructura sin optimización y optimizada.
- Evaluar el costo computacional vs los resultados de la optimización (peso de la estructura).

3. METODOLOGÍA

En este trabajo, con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados, se realizaron las siguientes fases:

Fase 1: Revisión bibliográfica: Descripción: lectura de las normativas, artículos y demás documentos referentes a modelos de optimización, modelamiento y diseño de torres de energía de alta tensión.

Fase 2: identificación de las variables y las restricciones de diseño para la estructura: Descripción: Registro y programación de las restricciones producto de las normativas que se aplican para el diseño de la estructura a optimizar.

Fase 3: cálculo de cargas para el diseño de torres de energía de alta tensión: Descripción: programación de las diferentes cargas y estados de cargas a las cuales se va a ver sometida la estructura.

Fase 4: elaboración del modelo computacional de la torre de energía de alta tensión a optimizar: Descripción: realización de un modelo en el software MATLAB¹⁷, de la estructura metálica a analizar, en donde se asignan los diferentes estados de carga, restricciones de diseño, selección de variables a iterar, función objetivo y algoritmo de optimización a utilizar.

Fase 5: análisis de resultados: Descripción: comparativa entre el peso que la estructura metálica tenía en un primer diseño y los resultados al optimizarla.

¹⁷ MathWorks and Cleve Moler, "Matlab." 2016.

Fase 6: Redacción y presentación de resultados: Descripción: realización del libro en donde se muestra todo el desarrollo del proyecto, aprobación y preparación de la presentación del proyecto.

4. ALCANCE DE LA PROPUESTA

La aplicación de un algoritmo heurístico u otro tipo de algoritmo de optimización para minimizar el peso de una estructura, o maximizar una determinada característica estructural es un tema recurrente en la literatura especializada. Sin embargo, para lograr una aplicación exitosa de un algoritmo heurístico en un contexto práctico, se debe tener en cuenta la elección de los perfiles y la posible configuración de la estructura.

En este trabajo, se presenta el fundamento, el procedimiento y aplicación del algoritmo del temple simulado (Simulated Annealing)¹⁸ en la optimización del peso de una torre de energía de alta tensión tipo, con una altura total fija de 39 m, para esto, se tuvieron las siguientes consideraciones:

- Se trabajó con elementos estructurales tipo cercha para el análisis de la estructura.
- En el proceso de optimización, las variables de decisión fueron, la perfilería metálica que fue asignada en 3 diferentes configuraciones, en donde estarán restringidas a las normativas aplicadas y a la perfilaría en ángulo disponible en el mercado colombiano (se utilizaron los perfiles de GERDAU-DIACO).
- Se emplearon las normas ASCE 74-09 y ASCE 10-97^{19,20}, omitiendo consideraciones producto de la nieve.
- los análisis realizados fueron lineales elásticos, según normatividad ASCE 74-09, ASCE 10-97^{21 22}.

¹⁸ Opcit. S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and V. M. P.,

¹⁹ Opcit. ASCE, "Design of Latticed Steel Transmission Structures 10-15.

²⁰ Opcit ASCE and SEI

²¹ Opcit. ASCE, "Design of Latticed Steel Transmission Structures 10-15.

²² Opcit ASCE and SEI

- El código de programación se efectuó en el software MATLAB²³, abordando desde la definición de la estructura hasta la programación del algoritmo de optimización.
- La torre tipo estudiada tiene una altura de 39 metros, construida en acero ASTM 572 grado 50, la cual maneja una tensión eléctrica de 115 KV.
- La cimentación y presupuesto, no se tuvieron en cuenta en este trabajo.
- La estabilidad o porcentaje de éxito del algoritmo se evaluó realizando en un total de 10 ejecuciones.
- Para el diseño se aplicó el método LRFD
- No se tuvieron en cuenta algunos de los estados límites de diseño en el momento de desarrollar el algoritmo de optimización, más concretamente son los estados límites de aplastamiento y por bloque de cortante, la razón es que estos estados límites se encuentra más relacionado con la configuración de pernos en los elementos estructurales (en las conexiones).
- El algoritmo de optimización empleado fue el temple simulado (Simulated Annealing) estándar definido en las referencias²⁴,²⁵.
- No se incluyó el diseño de las conexiones.

²³ Opcit. MathWorks and Cleve Moler

²⁴ A. García Serrano, INTELIGENCIA ARTIFICIAL Fundamentos, práctica y aplicaciones, Primera. Madrid, España: RC libros, 2012.

²⁵ J. S. Arora, Introduction to Optimum Design, Second. Oxford, UK: Elsevier, 2004.

5. MARCO TEORICO

5.1 ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

Un algoritmo de optimización se define como un proceso de selección de una determinada cantidad de variables, que se encuentran dentro de un espacio de búsqueda, producto de restricciones planteadas del problema, que minimizan o maximizan una determinada función objetivo²⁶, de acuerdo a las siguientes definiciones:

- Función objetivo: es el elemento que permite evaluar el sistema que se desea optimizar. Ejemplos comunes de funciones objetivo pueden ser los tiempos de ejecución de un proceso, el peso de una estructura o los beneficios netos de la venta de un producto, entre otros²⁷.
- Variables: representan los elementos que afectan de forma sustancial el valor de la función objetivo, razón por la cual, son sujetos a elección dentro del proceso de optimización²⁸.
- Restricciones: son el conjunto de relaciones expresadas en forma de ecuaciones o inecuaciones, que deben cumplirse al desarrollar el proceso de optimización²⁹.

Siendo esta rama de las ciencias computacionales, relativamente joven en comparación a otras ciencias, se encuentra en continuo desarrollo, sin embargo, en la actualidad, todos los algoritmos o métodos para optimizar se pueden clasificar en dos grandes grupos:

²⁶ Opcit. A. García Serrano

²⁷ Ibíd.

²⁸ Ibíd.

²⁹ Ibíd.

- Los métodos clásicos.
- Los métodos heurísticos.

El primer grupo está conformado por los métodos que en su gran mayoría se encuentran fundamentados en el cálculo de derivadas (funciones continuas) para identificar o buscar los valores óptimos; estos métodos pueden garantizar la obtención de un óptimo local, son métodos que tiene un costo computacional bajo, que se traduce en poco tiempo de procesamiento. En el segundo grupo están las técnicas heurísticas (o heurísticas) que son métodos de optimización usualmente estocásticos que en su proceso de búsqueda y selección de valores de sus variables utilizan algún mecanismo aleatorio. Los métodos heurísticos, a diferencia de los métodos clásicos, presentan diferentes alternativas para escapar de los óptimos locales en los que frecuentemente caen los métodos clásicos^{30,31}. Esta es la razón para que las técnicas heurísticas sean empleadas en la práctica. Adicionalmente, generan buenas soluciones. Sin embargo, tienen un costo computacional mucho más alto que los métodos clásicos y encontrar una solución óptima implica una cantidad de tiempo más elevada.

Los métodos heurísticos utilizados con mayor frecuencia son.

- Algoritmos genéticos
- PSO (particle swarm optimization)
- ACO (ant colony optimization)
- Temple simulado (simulated annealing)
- Búsqueda tabú

³⁰ A. García Serrano

³¹ P. P. Cruz, Inteligencia Artificial con aplicaciones a la ingenieria, First. Mexico DF: Alfaomega, 2010.

La aplicación genérica de un algoritmo de optimización heurístico se resume en la figura 1:



Figura 1. Esquema genérico de algoritmo de optimización

Fuente: Intruduction to Optimum Design (2nd Ed.), Jasbir S. Arora.

5.1.1 Algoritmo heurístico. El termino algoritmo heurístico, meta heurística o sencillamente heurística, se usa para describir una clase de algoritmos que siguen

una serie de pasos enfocados en la resolución de un problema. Una definición a resaltar hecha por autores Díaz, A., Glover, F y otros³² que es de resaltar por su sencillez es:

"Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución."

Este tipo de algoritmos al ser genéricos, suelen ser usados para problemas parametrizables, que no disponen de un procedimiento determinado para resolver o cuando la solución no se puede obtener de forma directa, por la naturaleza del problema o el sistema que se busca optimizar³³

5.1.2 Temple simulado (simulated annealing - SA). El temple simulado o *simulated annealing* es un método de optimización heurístico, inspirado en el proceso de templado del acero, que es un tratamiento térmico que se les da a los metales para eliminar tensiones internas y aumentar su ductilidad y plasticidad.

El temple simulado (*simulated annealing*) fue propuesto por Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi en 1983³⁴.Esta técnica consiste en calentar el material, aumentando la energía de los átomos, lo permite su desplazamiento y reubicación, mantener la temperatura por un determinado tiempo y posteriormente enfriar lentamente con el fin de lograr una configuración con una menor energía inicial. En relación con el algoritmo de optimización, el valor de la función objetivo a optimizar corresponde a la energía del sistema. Cuando el sistema está sometido a altas temperaturas, el algoritmo permite el sondeo de puntos muy distantes dentro de un espacio de

³² A. Diaz, F. Glover, H. m. Ghaziri, M. Laguna, P. Moscato, and F. T. Tseng, Optimización heurística y redes neuronales. Madrid, España: Editorial Paraninfo, 1996.

³³ Opcit. A. García Serrano

³⁴ Opcit. S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and V. M. P.

búsqueda, lo que permite escapar de óptimos locales, aceptando soluciones que no mejoran su estado anterior. Por el contrario, a bajas temperaturas, el algoritmo permite únicamente la aceptación de puntos cercanos entre sí³⁵. En la práctica, la definición del algoritmo, comprende las siguientes ecuaciones (ecuaciones 1-5):

$$\Delta F = F(i+1) - F(i) \tag{1}$$

$$P = e^{\left(\frac{\Delta F}{T}\right)}$$
(2)

$$T(i+1) = T(i) * \beta$$
(3)

En donde:

F = función objetivo.

 $\Delta F = delta de función.$

P = probabilidad de aceptación.

T = temperatura del sistema.

B = factor de enfriamiento.

El pseudocódigo del temple simulado (*simulated annealing - SA*) desarrollado con base en los pasos presentados por Arora. J.³⁶ se presenta a continuación:

Tini \rightarrow La temperatura inicial.

Tfin \rightarrow La temperatura final.

 $T \rightarrow La$ temperatura cada iteración.

Nmax \rightarrow Número máximo de iteraciones.

 $N \rightarrow Iteración.$

 $F(x) \rightarrow$ función objetivo.

 $S \rightarrow Espacio de búsqueda.$

Xopt \rightarrow Valor óptimo.

Xpos \rightarrow Valor posible o candidato.

Xini \rightarrow Valor inicial del sistema.

³⁵ J. S. Arora, Introduction to Optimun Design, Third. Oxford, UK: Elsevier, 2012.

³⁶ Opcit. J. S. Arora.

 $Pa \rightarrow Probabilidad de aceptación.$

 $\beta \rightarrow$ Factor de enfriamiento.

El código que desarrolla el algoritmo del temple simulado es:

T = Tini N = 0Xopt = XiniWhile T > Tf and $N \leq Nmax$ $X pos = \emptyset$ While Xpos ∉ S Xpos = rand If F(Xpos) - F(Xopt) < 0 and $Xpos \in S$ Xopt = Xpos **Esle If** $e^{(F(Xpos) - F(Xopt) / T)} > rand and Xpos \in S$ Xopt = XposEnd End If $T \leq T$ fin T = T finElse $T = (T)(\beta)$ End N = N + 1End

Nota: Los detalles de la programación y de los parámetros del algoritmo de optimización SA empleado en este trabajo se pueden ver en el Anexo E.

5.2 DISEÑO DE ESTRUCTURAS METÁLICAS

Considerando los procedimientos y definiciones dados en las normas ASCE 74-09 y ASCE 10-97^{37,38} para el diseño de estructuras metálicas para infraestructura eléctrica, se sabe que los diseño se desarrollan aplicando el método LRFD:

Donde: Pn = Carga nominal.Pu = Carga ultima. \emptyset = factor de resistencia.

Sabiendo que la estructura que se va a analizar y diseñar es una estructura metálica, que se modela como una cercha, se aplican las restricciones de diseño y chequeos para elementos que se encuentran solamente sometidos a cargas axiales. Los detalles se presentan en las siguientes secciones y se entiende que son extraídos de las normas mencionadas^{39,40}.

5.2.1 Elementos a compresión. Los miembros en acero sometidos a compresión, en estructuras tipo cercha, son susceptibles de diferentes formas de pandeo, a causa de las longitudes que suelen abarcar los elementos que componen este tipo de estructuras y lo esbeltos que son los perfiles. En los elementos en acero sometidos a compresión, se analizan los siguientes tipos de fallas:

5.2.1.1 Pandeo global. Para este caso, la carga nominal se aplica con la siguiente formula:

$$Pn = (A_g)(F_e)$$
(5)

³⁷ Opcit. ASCE, "Design of Latticed Steel Transmission Structures 10-15.

³⁸ Opcit. ASCE and SEI.

 ³⁹ Opcit. ASCE, "Design of Latticed Steel Transmission Structures 10-15.
 ⁴⁰ Opcit. ASCE and SEI.

Definiendo:

Ag =área bruta. Fe = esfuerzo de pandeo de Euler. Ø = 0.9

5.2.1.2 Pandeo local. Para este caso, la carga nominal se obtiene con la siguiente formula

$$Pn = (A_g)(F_{cr})$$
(6)

Definiendo:

Ag = área bruta. Fcr = esfuerzo de pandeo crítico. $\emptyset = 0.9$

5.2.2 Elementos a tensión. El diseño de los elementos que se encuentran a tracción o tensión, son problemas sencillos en la ingeniería de estructuras, en donde los miembros en acero no generan muchos inconvenientes en este estado, pues bajo este estado de cargas el acero muestra todos sus beneficios. En los elementos en acero sometidos a tensión, se analizan los siguientes tipos de fallas:

5.2.2.1 Estado límite de fluencia de la sección bruta. Para este caso, la carga nominal se obtiene con la siguiente formula:

$$Pn = (A_g)(F_y)$$
(7)

Definiendo:

Ag = área bruta.Fy = esfuerzo de fluencia. $\emptyset = 0.9$

5.2.2.2 Estado límite de fractura. Para este caso, la carga nominal se obtiene con la siguiente formula:

$$Pn = (A_e)(F_u)$$
(8)

Definiendo:

Ae = área efectiva.

Fu = esfuerzo de ultimo.

Ø = 0.75

5.2.2.3 Estado limite por aplastamiento. Para este caso, la carga nominal se obtiene con la siguiente formula

$$Pn = 1.8(A_{pb})(F_y)$$
(9)

Definiendo:

Apb =área proyectada de aplastamiento. Fu =esfuerzo de ultimo. $\emptyset = 0.75$

5.2.2.4 Estado limite por bloque de cortante. Para este caso, la carga nominal se obtiene con la siguiente formula

$$Pn = 0.6(A_{nv})(F_u) + (U_{bs})(f_u)(A_{nt}) \le 0.6(A_{gv})(F_v) + (U_{bs})(f_u)(A_{nt})$$
(10)

Definiendo:

Ant = área neta a tracción. Anv = área neta a cortante. Fu = esfuerzo de ultimo. Fy = esfuerzo de fluencia. $\emptyset = 0.75$

6. NORMATIVA EMPLEADA PARA EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS METALICAS DE TRANSMISION DE ENERGIA.

Las normativas que se emplearon en para el modelamiento, diseño y análisis son la ASCE 74-09 y ASCE 10-15⁴¹,⁴²[1], [2]. La primera corresponde a todas las cargas que tienen este tipo de estructuras metálicas y la segunda establece todos los parámetros y recomendaciones relacionados con el proceso de diseño de la estructura. algunos parámetros se considerarán de normativas nacionales u otros estudios como la normativa NSR-10 [27] y el Electric Power Engineering Handbook [28] entre otros. Las siguientes secciones de este capítulo se extrajeron de las normas anteriormente mencionadas y fueron traducidas por el autor con la finalidad de dar claridad al proceso y a los cálculos.

6.1 PARÁMETROS PARA CARGA DE ASCE 74 - 09

La normativa, establece una serie de criterios para formular las cargas a las cuales será sometida la estructura, estas se encuentran distribuidas en 3 grupos que son:

- Cargas relacionadas con el clima
- Consideraciones adicionales de carga
- Cargas del sistema de cables

6.1.1 Cargas relacionadas con el clima

6.1.1.1 Cargas de Viento extremo. La fuerza de viento que actúa sobre la superficie de los componentes de la transmisión de energía, se determina con la siguiente ecuación:

$$F = \gamma_w Q K_z K_{zt} (V_{50})^2 G C_f A$$
(11)

⁴¹ Opcit. ASCE, "Design of Latticed Steel Transmission Structures 10-15.

⁴² Opcit. ASCE and SEI.

En donde:

F=fuerza del viento en dirección del viento.

Q=constante (0.613 para sistema métrico y 0.00256 para sistema ingles).

Kz=coeficiente de exposición.

Kzt=factor topográfico.

V50=velocidad básica del viento con un periodo de retorno de 50 años.

G=coeficiente de ráfaga.

Cf=coeficiente de fuerza.

A=área proyectada en un plano normal a la dirección del viento.

Para el cálculo del coeficiente de exposición Kz, se aplica la ecuación:

$$K_z = 2.01 \left(\frac{Z_h}{Z_g}\right)^{\frac{2}{\alpha}}$$
 para 33ft $\leq Z_h \leq Z_g$ (12)

En donde:

*Z*_h=altura efectiva.

*Z*_g=altura del gradiente.

a=exponente de exposición.

Los elementos que componen la ecuación No.9, se obtiene de la tabla No.1 que tiene como variable de ingreso la categoría de exposición.

Tabla 1. Exponente de exposición y gradiente para cálculo de Coeficiente de exposición

Exposure Category (categoría de exposición)	α	Zg (ft)
В	7	1200
С	9,5	900
D	11,5	700

Fuente: ASCE 74-09 (Table 2-1)

Las categorías de exposición, dadas en la tabla No.1, se definen de la siguiente manera (ver ASCE 74-09):

- Exposición B: áreas urbanas, suburbanas, boscosas o terrenos con numerosas obstrucciones cercanas entre sí. El uso de esta categoría de exposición se limita a aquellas áreas para las cuales el terreno está dentro de la clasificación de exposición a una distancia de 1500ft (457.2m) o 10 veces la altura de la estructura, la que resulte mayor.
- Exposición C: terrenos abiertos con obstrucciones dispersas, con alturas generalmente menor a 30ft (9.1m). Esta categoría incluye campo abierto plano y terreno agrícola.
- Exposición D: áreas costeras planas, sin obstrucciones, expuestas al viento soplando desde aguas abiertas en una distancia como mínimo de 1 mi (1609m). Esta categoría de exposición se extiende tierra adentro, desde la cosa a una distancia de 1500ft (457.2m) o 10 veces la altura de la estructura, la que resulte mayor.

Para el cálculo de coeficiente de ráfaga G, se aplican las siguientes ecuaciones:

$$G_{w} = \frac{1 + 2.7E\sqrt{B_{w}}}{K_{v}^{2}}$$
(13)

$$G_{t} = \frac{1 + 2.7E\sqrt{B_{t}}}{K_{v}^{2}}$$
(14)

En donde:

K_v=1.43.

 G_w y G_t =coeficientes de ráfaga de cables conductores (o guías) y la estructura respectivamente.

Para el cálculo de E, B_w y B_t se aplican las ecuaciones:

$$E = 4.9\sqrt{K} \left(\frac{33}{Z_{h}}\right)^{\frac{1}{\alpha FM}}$$
(15)

$$B_{w} = \frac{1}{1 + \frac{0.8(S)}{L_{s}}}$$
(16)

$$B_{t} = \frac{1}{1 + \frac{0.56(Z_{h})}{L_{s}}}$$
(17)

En donde

S=luz de viento de diseño de los cables (conductores o guía).

B_w y *B_t*=se emplean para el cálculo de cables conductores o guías y la estructura respectivamente.

Los elementos faltantes que corresponden a las constantes α_{FM} , K y L_s, se obtienen de la tabla No.2 que también tiene como variable de ingreso la categoría de exposición.

Tabla 2. Factores K y Ls para cálculo de coeficiente de ráfaga

Exposure Category (categoría de exposición)	K	Ls (ft)
В	0,010	170
C	0,005	220
D	0,003	250

Fuente: ASCE 74-09 (Table 2-3)

Para la obtención de la velocidad (V50), se utilizó el mapa de amenaza eólica de la NSR-10⁴³.

⁴³ Min. Ambiente, "Reglamiento colombiano de construccion sismo resistente - NSR 10." Bogotá D.C., 2010.



Figura 2. Mapa de amenaza eólica de Colombia

Fuente: NSR-10, B.6 (figura B.6.4-1)

Para el cálculo del factor topográfico K_{zt}, se aplica la ecuación:

$$K_{zt} = (1 + (K_1)(K_2)(K_3))^2$$
(18)
En donde los factores K_1 , K_2 , y K_3 , obtienen de la tabla No.3, restringido a la categoría de exposición C.





Fuente: NSR-10, B-6 (figura B.6.5-1)

	Multiplicador Topográfico para Exposición C									
	Multiplicador K ₁		Multip		2		Multiplicador K ₃			
H/L _h	Lom a 2-D	Escarpe 2-D	Colina Axial simétrica 3-D	x/L _h	Escarpe 2-D	Todos los otros casos	z/L _h	Loma 2-D	Escarpe 2-D	Colina Axial simétrica 3-D
0.20	0.29	0.17	0.21	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00
0.25	0.36	0.21	0.26	0.50	0.88	0.67	0.10	0.74	0.78	0.67
0.30	0.43	0.26	0.32	1.00	0.75	0.33	0.20	0.55	0.61	0.45
0.35	0.51	0.30	0.37	1.50	0.63	0.00	0.30	0.41	0.47	0.30
0.40	0.58	0.34	0.42	2.00	0.50	0.00	0.40	0.30	0.37	0.20
0.45	0.65	0.38	0.47	2.50	0.38	0.00	0.50	0.22	0.29	0.14
0.50	0.72	0.43	0.53	3.00	0.25	0.00	0.60	0.17	0.22	0.09
				3.50	0.13	0.00	0.70	0.12	0.17	0.06
				4.00	0.00	0.00	0.80	0.09	0.14	0.04
							0.90	0.07	0.11	0.03
							1.00	0.05	0.08	0.02
							1.50	0.01	0.02	0.00
							2.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 1. Coeficientes topográficos para categoría de exposición C

Fuente: NSR-10, B.6 (figura B.6.5-1)

Para las categorías restantes, el cálculo de los factores K₂, y K₃, se obtienen con las ecuaciones.

$$K_2 = \left(1 - \frac{|X|}{\mu L_h}\right) \tag{19}$$

$$K_3 = e^{\frac{-\gamma Z}{L_h}} \tag{20}$$

Y el factor K₁, γ y μ para el cálculo de los factores K₂, y K₃, con la tabla No.4

	K ₁ / (H / L _h) Exposición			Y	μ	
Forma de la Colina					Hacia	Hacia
	в	С	D		o desde la cresta	o desde la cresta
Lomas bidimensionales (2D)o valles con H negativa en K ₁ /(H/L _h)	1.30	1.45	1.55	3	1.5	1.5
Escarpes bidimensionales (2D)	0.75	0.85	0.95	2.5	1.5	4
Colina tridimensional axialsimétrica	0.95	1.05	1.15	4	1.5	1.5

Tabla 2. Coeficientes topográficos para todas las categorías

Fuente: NSR-10, B.6 (figura B.6.5-1)

El factor K_{zt}, de la ecuación No.8, no debe ser menor a 1.

Para el cálculo de coeficiente de fuerza C_f de la ecuación No.8, se tiene que considerar si se aplica para los cables o se aplica a la estructura.

- Cables conductores o cable guía: muchos ensayos de viento muestran que este coeficiente varía dentro de un rango de 0.7 – 1.35, aunque, es frecuente usar el valor de 1.0, como lo indica el NESC-252⁴⁴.
- Estructura de transmisión de energía: el coeficiente de fuerza, se obtienen de las tablas 5 y 6, las cuales tienen como argumentos de entrada la forma de la torre y índice de solidez φ.

⁴⁴ IEEE, National Electrical Safety Code C2-2007. New York, USA, 2007.

El indicie de solidez para el cálculo de C_f, correspondiente para la estructura se calcula con la ecuación.

$$\varphi = \frac{A_{\rm m}}{A_0} \tag{21}$$

En donde

 A_m =el área de todos los miembros en la cara de barlovento de la estructura.

*A*₀=el área del contorno de la cara de barlovento de la estructura.

En el caso de trabajar una estructura de sección cuadrada o triangular se utiliza a siguiente tabla.

	·	
	Force Coefficient (coeficiente de fuerz	za), Cf
Solidity Ratio, φ	Square-Section Structures	Triangular-Section Structures

Tabla 5. Coeficiente de fuerza para estructuras de sección rectangular o triangular

Solidity Ratio, φ	Square-Section Structures	Triangular-Section Structures
(índice de solidez)	(estructuras de sección cuadrada)	(estructuras de sección triangular)
< 0,025	4,0	3,6
0,025 - 0,44	4,1 - 5,2φ	3,7 - 4,5φ
0,45 - 0,69	1,8	1,7
0,70 - 1,00	1,3 + 0,7φ	1,0 + φ

Fuente: ASCE 74-09 (Table 2-4)

En el caso de trabajar una estructura de sección circular se utiliza a siguiente tabla.

Tabla 6. Coeficiente de fuerz	a para estructuras	de sección circular
-------------------------------	--------------------	---------------------

Solidity Ratio, φ	Correction Factor
(índice de solidez)	(factor de corrección)
< 0,3	0,67
0,3 - 0,79	0,67φ + 0,47
0,80 - 1,00	1,00

Fuente: ASCE 74-09 (Table 2-5)

Cuando se tiene el viento con un determinado ángulo, cambian ligeramente las ecuaciones para su respectivo cálculo,

• Fuerza de viento en cables conductores o guías

$$F = \gamma_{\rm w} Q K_z K_{zt} V^2 G_{\rm w} \cos^2(\phi) C_{\rm f} A$$
(22)

• Fuerza de viento en estructura de transmisión de energía

$$F_{l} = \gamma_{w} Q K_{z} K_{zt} V^{2} G_{w} \sin(\phi) C_{fl} A_{ml}$$
(23)

$$F_{t} = \gamma_{w} Q K_{z} K_{zt} V^{2} G_{w} \cos(\phi) C_{ft} A_{mt}$$
(24)

En donde

FL, Ft=fuerza longitudinal y transversal del viento en la torre respectivamente.

φ=ángulo de inclinación del viento dentro de un plano horizontal.

Am=área de todos los miembros en la cara de la estructura que es perpendicular a la línea.

A_{mt}=área de todos los miembros en la cara de la estructura que es paralela a la línea.

C_{fl}=coeficiente de fuerza asociado a la cara de la estructura que es perpendicular a la línea.

C_{ft}=coeficiente de fuerza asociado a la cara de la estructura que es paralela a la línea.

Figura 4. Acción de viento en cables conductores/Guías y estructura



Fuente: ASCE 74-09 (figure 2-8)

6.1.1.2 Cargas de viento de alta intensidad. Las cargas de viento de alta intensidad, se encuentran asociadas al impacto de la estructura con fenómenos como tornados, micro y macro ráfagas, que son eventos en donde se supera con creces las velocidades desarrolladas en eventos de viento extremo en periodos relativamente cortos de tiempo.

En términos prácticos, no es común desarrollar el diseño de estructuras de transmisión de energía para someterse a cargas de viento de tornados o ráfagas superiores a la categoría F4, considerando que la probabilidad de que un evento de esta magnitud surja es baja e implica un aumento razonable en los costos, sin embargo, no es recomendable subestimar la presencia de estos eventos.

			Cumulative
F-Scale (Gust Wind Speed	Number of Tornados	Percentage	Percentage
Range)	(numero de tornados)	(porcentaje)	(porcentaje
3 <i>y</i>	,		acumulado)
F0 (40-72 mph)	5718	22,9	22,9
F1 (73-112 mph)	8645	34,7	57,6
F2 (113-157 mph)	7102	28,5	86,1
F3 (158 - 206 mph)	2665	10,7	96,8
F4 (207-260 mph)	673	2,7	99,5
F5(261-318 mph)	127	0,5	100
total	24930	100,0	

Tabla 7. Tabla de frecuencias de tornados en los estados unidos

Fuente: ASCE 74-09 (Table 2-8)

Un criterio relativamente conservador, a menos de que se tenga registros de tornados o ráfagas de categorías superiores, es desarrollar el diseño de la estructura para verse sometida a vientos de categoría F2 (182-253 Km/h), criterio que comprende el 86.1% de los eventos.

El desarrollo de estos eventos en Colombia, aunque tenga una probabilidad baja de ocurrencia y no se tenga información concreta al respecto, si se tiene registro de este tipo de eventos en zonas costeras, luego para abordar este tipo de cargas, se trabajaran con parámetros asignados a criterio del ingeniero, para este caso no se consideró este fenómeno en el proceso de optimización.

6.1.1.3 Carga de hielo y viento. Esta categoría de carga, comprende un aumento significativo de la carga vertical, producto de la presencia de nieve o hielo en la estructura, y un aumento en la tensión de los cables conductores o guías, por un aumento de sección producto de la nieve y un descenso considerable de la temperatura del cable.

Dentro de la normativa ASCE 74-09⁴⁵, se presenta un mapa de amenaza que involucra tanto el espesor de hielo como la velocidad de viento para desarrollar el diseño, que son los argumentos de entrada para obtener las cargas de este estado.

Cuando se trabajan en unidades del sistema internacional, se utiliza siguiente ecuación para obtener el espesor de hielo de diseño:

$$I_z = I \left(\frac{Z}{10}\right)^{0.10}$$
 $0m < z < 275m$ (25)

En donde:

I=espesor nominal de hielo.Iz=espesor de hielo de diseño.Z=altura sobre el suelo (m).

Cuando se trabajan en unidades del sistema inglés, se utiliza siguiente ecuación:

$$I_{z} = I \left(\frac{Z}{33}\right)^{0.10} \qquad 0 ft < z < 900 ft \qquad (26)$$

⁴⁵ Opcit. ASCE and SEI.

En donde:

I=espesor nominal de hielo.

Iz=espesor de hielo de diseño.

Z=altura sobre el suelo (ft).

Obtenidos el espesor de diseño, procedemos a obtener el nuevo peso por unidad de longitud del cable producto del hielo, cuando se trabajan en unidades del sistema inglés, se utiliza siguiente ecuación:

$$w_i = 1.24(d + I_z)I_z$$
 (27)

En donde:

Wi=peso por unidad de longitud de cable con hielo (lb/ft). d=diámetro del cable (in).

Iz=espesor de hielo de diseño (in).

Cuando se trabajan en unidades del sistema internacional, se utiliza siguiente ecuación:

$$w_{i} = 0.0282(d + I_{z})I_{z}$$
(28)

En donde:

Wi=peso por unidad de longitud de cable con hielo (N/m). d=diámetro del cable (mm). Iz=espesor de hielo de diseño (mm).

Sin embargo, al igual que los vientos de alta intensidad, aunque la probabilidad en Colombia de tener presencia de nieve o hielo que afecte la integridad estructural, producto un aumento significativo en el estado de cargas es muy bajo, si es posible en zonas de alta montaña o paramos. Al igual que con los vientos de alta intensidad, al no tener estudios o información concreta, para abordar este tipo de cargas, se trabajarán con parámetros asignados por el ingeniero, para este caso no se consideró este fenómeno en el proceso de optimización.

6.1.2 Cargas adicionales

6.1.2.1 Cargas de construcción y mantenimiento. A diferencia de las cargas relacionadas con el clima, las cargas de construcción y mantenimiento son controlables y se encuentran directamente relacionadas con el método constructivo dentro de estas cargas se encuentran⁴⁶.

- Montaje de estructura: los diferentes métodos para el izamiento y montaje de estructuras pueden producir una sobrecarga en algunos elementos estructurales, resultado de soportar el peso de la estructura en puntos específicos, al no tener una forma método especifico de montaje e instalación, este efecto no se tendrá en cuenta al momento de calcular la carga.
- Instalación de cables: se tienen en cuenta los siguientes criterios.
 - Para cargas para cargas transversales y verticales, usar una presión de 3psf (0.144 Kpa) de viento y sin presencia de hielo en cables y estructura. Usar la temperatura más baja esperada durante el tendido de los cables.
 - 2. Para cargas de viento transversales, usar la máxima luz de viento de diseño con un factor de carga de 1,5.
 - Para cargas componentes longitudinales o transversales de tensión de los cables, usar una tensión inicial basado en condiciones iniciales de los cables conductores a la temperatura más baja esperara durante el tendido de los cables, con un factor de carga de 1,5.
 - 4. Para cargas verticales usar el mayor de las siguientes dos condiciones:
 - a) Para condiciones finales (final de la línea), con equipo de tensión a nivel de suelo, utilice los componentes verticales de la línea de tracción, la máxima flecha y un factor de carga de 1,5. Si no se conoce la pendiente de la línea de tracción, usar una relación de 3/1(horizontal/vertical).
 - b) Para condiciones intactas (hay vanos adelante y atrás unidos a estructura), usar el punto más bajo de diseño y un factor de carga de 2,0.

⁴⁶ Opcit. ASCE and SEI.

 Mantenimiento: gran parte de las actividades que conciernen a operaciones de mantenimiento están relacionada con el cambio o remoción de elementos de la línea como los cables conductores, cables guías, aisladores etc. El ingeniero debe considerar todas las operaciones de mantenimiento a las cuales se puede ver sometida la torre, ya que estos procedimientos producen aumentos significativos en las cargas que pueden afectar la salud estructural de la estructura.

6.1.2.2 Carga de protección contra caídas. Estas cargas son creadas por los trabajadores que desarrollando actividades en alturas sufren una caída libre. Por lo general todos los parámetros de carga de estos sistemas de protección contra caigas son establecidos por Occupational Safety & Health Administration (OSHA), aunque en Colombia se tienen pre-establecidos algunos parámetros para el diseño de estos elementos en la resolución 1409 de 2019 del ministerio de trabajo de Colombia⁴⁷, estos no son lo suficientemente concretos, razón por la cual esta consideración no se tendrá en cuenta.

6.1.2.3 Cargas longitudinales. Las estructuras de transmisión de energía deben resistir una serie de cargas longitudinales de forma satisfactoria, producto de desbalances en los cables conductores por diferentes factores como: desbalance por viento o hielo, cambios de dirección, ruptura accidental de un cable conductor o alguno de los componentes de la línea de transmisión. Dentro de este grupo, se tienen las siguientes cargas:

A. Cargas longitudinales en sistemas intactos

Las líneas de transmisión deben estar en capacidad de resistir las diferentes acciones del viento, hielo, las refracciones térmicas por diferencias elevadas de temperatura, por citar algunos ejemplos.

⁴⁷ Computers and Structures Inc., "Sap2000." 2016.

B. Cargas longitudinales y contención de falla

Este caso de carga y todos los posibles eventos de ruptura de aisladores, cables conductores, cables guías, o algún otro componente que haga parte del sistema de transmisión puede crear un desbalance crítico y producir una falla parcial, total o una falla se propague a lo largo de la línea y que esta afecte a las estructuras que dan soporte al sistema de transmisión.

Dar solución a un desbalance producto de una falla y así evitar una posible propagación a lo largo de la línea no es un problema sencillo de abordar, sin embargo, como mínimo, se recomienda que el ingeniero considere los posibles mecanismos de falla, puesto que la ruptura de un vano de un cable conductor, cable guía o cualquier falla simple en la estructura, que puede propagarse (cascading failure) produciendo grandes pérdidas económicas. Algunas alternativas presentadas para el cálculo de las cargas longitudinales mínimas son: el uso del factor de carga residual (RSL) o el factor longitudinal de carga.

1. Factor RSL

La tensión de uno de los cables multiplicada por el factor RSL (Residual Static Load) predice la tensión estática residual en un cable una vez han desaparecido todos los efectos dinámicos productos de su rotura. El factor RSL para los cables conductores se pueden obtener de la figura No.5, para los cables guías, este tiene un valor de 1.

Se debe considerar la tensión multiplicada por el factor RSL, para obtener las cargas longitudinales, constituye la carga estática mínima que se recomienda para evitar la falla, en el factor RSL no se considera ningún efecto dinámico.

Figura 5. Factor de carga estática residual



Fuente: ASCE 74-09 (figure 3-1)

2. Factor longitudinal de carga

Sin embargo, también la normativa presenta una segunda forma de obtener las cargas longitudinales, desarrollado por el Electric Power Research Institute (EPRI), para obtener las cargas, se utiliza la figura No.6. Igual que con el RSL, las tensiones de los cables se multiplican por el factor de carga longitudinal para obtener una carga aproximada de diseño en donde, a diferencia el RSL, en este se consideran efectos dinámicos y se tiene él cuenta el tipo, tratando las estructuras rígidas como armaduras o estructuras arriostradas y las flexibles como polos individuales que son capaces de soportar grandes deformaciones elásticas.

Figura 6. Factor de carga longitudinal



Fuente: ASCE 74-09 (figure 3-2)

6.1.2.4 Vibraciones estructurales. Gran parte de las vibraciones y cargas dinámicas a las cuales se ve expuesta estas estructuras como movimiento de conductores, viento y carga sísmica, no suelen ser un problema al momento de diseñar. Los antecedentes históricos que se tienen de este tipo de estructuras, ha mostrado que las vibraciones no generan problemas en el diseño, sin embargo, si se han presentado una serie de problemas que se enfocan en las conexiones, por lo general fatiga en miembros o tornillos de la conexión y desajuste de tornillos en las conexiones.

Considerando que las cargas dentro del proceso de optimización solo serán cargas estáticas, estos efectos no se tendrán en cuenta.

6.1.2.5 Movimiento de conductores. Uno de los efectos más problemáticos en las estructuras de transmisión de energía es la vibración de los cables conductores conocida como wire galloping, está básicamente es la oscilación de los cables conductores a baja frecuencia y alta amplitud producto del viento⁴⁸.

Algunos problemas son:

- Descargas temporales o permanentes producto de la reducción del espacio entre las fases^{49,50}.
- Aumento permanente de la flecha de la catenaria del cable conductor, causado tensiones dentro del rango inelástico^{51,52}.
- Desgaste, fatiga y falla de cables o elementos que se encuentran asociados a sistema de línea en suspensión⁵³.
- Colapso estructural de componentes y el sistema^{54,55}.

Al igual que las vibraciones estructurales, estos efectos no se tendrán en cuenta ya que las cargas dentro del proceso de optimización solo serán cargas estáticas.

6.1.2.6 Carga sísmica. Este tipo de estructuras, no requieren un diseño por carga sísmica. Por lo regular este tipo de estructuras tienen un buen comportamiento estructural al ser sometidos a vibraciones o movimientos en la base.

En el diseño de estas estructuras, se consideran, las cargas de viendo, hielo, ruptura accidental de un cable o alguno otro tipo de acción, excede de forma significativa la

⁴⁸ Opcit. ASCE and SEI.

⁴⁹ H. F. Holland, Transmission Line Design Manual. Denver, Co: United States Department of the Interior, Water and Power Resource Service, 1980.

⁵⁰ Rural Electrification Administration (REA), "Design Manual For High Voltage Transmission Lines," in Rural Electrification Administration Bulletin 62-I, United States Department of Agriculture, Washington, D.C., 1980.

⁵¹ A. S. Richardson, Longitudinal dynamic loading of steel pole transmission lines. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1986. ⁵² K. Anjo, S. Yamasaki, Y. Matsubayashi, Y. Nakayama, A. Otsuki, and T. Fujimura, "An experimental study of bundle conductor galloping on the Kasatori-Yama test line for bulk power transmission.," in CIGRE 25h session, Vol.1., 1974, pp. ⁵³ EPRI, "Transmission Line Reference Book." Palo alto, Cal, pp. 1–625, 1979.

⁵⁴ M. A. Baenziger, S. Gupta, T. J. Wipf, F. Fanous, Y. H. Hahm, and H. B. White, "Structural failure analysis of 345 kV transmission line, and disucssion by B. White," in SM 441-6 PWRD, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1993.

⁵⁵ H. B. White, "Some destructive mechanisms activated by galloping conductors," in Report No. A79 106-6 IEEE WPM, New York, USA, 1979.

carga sísmica que se pudiese producir en este tipo de estructuras, razón por la cual, no se considera.

6.1.3 Sistema de cables conductores

6.1.3.1 Catenaria. Considerando que los cables conductores, son elementos sometidos a su peso y que se encuentran libres de cargas puntualizadas, estos elementos adoptan la forma de una catenaria.

La ecuación de la catenaria es:

$$y(x) = \frac{H}{w} \cosh\left(\left(\frac{w}{H}x\right) - 1\right)$$
(29)

En donde

W=peso por unidad de longitud del cable. H=tensión horizontal del cable. X=distancia horizontal desde el punto más bajo de la catenaria.

Figura 7. Esquema de curva catenaria sin inclinación



Fuente: Electric Power Engineering Handbook (figure 14.1)

La ecuación se puede aproximar a una ecuación parabólica aproximada, basada en una expansión de MacLaurin del coseno hiperbólico, en donde haciendo x=S/2 en la ecuación, se obtiene:

$$D = y(x) = \frac{H}{w} \cosh\left(\left(\frac{wS}{2H}\right) - 1\right) \approx \frac{w(S^2)}{8H}$$
(30)

En donde:

S=Vano.

D=flecha.

Cuando se tienen los suficientes detalles para desarrollar para fundamentar la curva catenaria con inclinación, se parte de la misma aproximación.

$$D = y(x) = \frac{H}{w} \cosh\left(\left(\frac{w}{H}x\right) - 1\right) \approx \frac{w(x^2)}{2H}$$
(31)

Figura 8. Esquema de curva catenaria con inclinación



Fuente: Electric Power Engineering Handbook (figure 14.2)

Producto de la asimetría de la curva catenaria, la formula anterior de puede aplicar, con la restricción que se debe separa para el lado derecho y para el lado izquierdo de la catenaria, considerando lo anterior, los valores de x para ambos lados serian:

$$x_{\rm L} = \frac{S}{2} \left(1 + \frac{h}{4D} \right) \tag{32}$$

$$x_{\rm R} = \frac{S}{2} \left(1 - \frac{h}{4D} \right) \tag{33}$$

En donde

h=distancia vertical entre los dos puntos de apoyo.

 X_L =distancia horizontal desde el punto más bajo de la catenaria hasta el apoyo izquierdo.

 X_R =distancia horizontal desde el punto más bajo de la catenaria hasta el apoyo derecho.

Calculados ambos términos, se aplica la aproximación y se obtiene:

$$D_{\rm R} = \frac{w x_{\rm R}^2}{2 \rm H} \tag{34}$$

$$D_{\rm L} = \frac{W x_{\rm L}^2}{2 \rm H} \tag{35}$$

*D*_L=distancia vertical desde el punto más bajo de la catenaria hasta el apoyo izquierdo

 D_R =distancia vertical desde el punto más bajo de la catenaria hasta el apoyo derecho

6.1.3.2 Sección de tensiones. Un sistema de cables conductores o guía, normalmente se fracciona en secciones de tensiones, que básicamente es una sección de cable tendida entre dos puntos (A y E) y puntos de acople intermedios (B, C y D), de los que tienen cierta flexibilidad longitudinal, ya que intentan igualar componentes horizontales de la tensión en los diversos eventos posibles de carga.

Figura 9. Perfil de sección de tensiones



Fuente: ASCE 74-09 (figure 4-1)

En donde se presentan varias alternativas para poder calcular la tensión que se presenta en los cables algunas de ellas son:

Método del vano dominante

El método del vano dominante es una aproximación para el cálculo de en donde suponiendo que las componentes horizontales de la tensión, H, en todos los tramos de una sección de tensión son aproximadamente las mismas y que los tramos están en un terreno relativamente plano, entonces toda la sección de tensión puede ser remplazada por un único vano equivalente, para calcular la tensión te los cables.

La fórmula para calcular el vano equivalente es

$$S = \sqrt{\frac{S_1^3 + S_2^3 + S_3^3 + \dots + S_n^3}{S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n}}$$
(36)

En donde

S_i=i-esimo vano entre estructuras de transmisión de energía. S= vano dominante para el cálculo de tensiones. Se debe recalcar que este método no es recomendable utilizarlo en: líneas ubicadas en terreno montañoso o en donde hay cambios considerables de altura o cualquier efecto que produzca desbalances, considerando que estos no se tienen en cuenta en el método.

• Análisis estructural de la tensión de una sección

Si no hay una interacción significativa entre los conductores paralelos o cables guías producto del desplazamiento longitudinal de sus estructuras de soporte, entonces la tensión en los diversos tramos de una sección de tensión puede determinarse modelando toda la sección como un sistema de cable con las condiciones de soporte apropiadas. los soportes de suspensión se pueden modelar como elementos de cable. Los aisladores se pueden modelar como vigas en voladizo con las flexibilidades longitudinales apropiadas. el modelo se analiza luego mediante métodos de análisis estructural apropiado que toman en cuenta el desplazamiento longitudinal de los puntos de fijación del cable⁵⁶. Esta alternativa mucho más precisa que el método del vano dominante.

• Análisis estructural de la tensión de la línea

Si hay interacción significativa entre los conductores y el cable guía en un segmento de línea entre dos estructuras (finales), analice ese segmento como un sistema estructural único, que incluye todos los cables en todos los tramos, así como modelos estructurales detallados de todos los soportes. Este enfoque riguroso produce un análisis mucho más preciso, pero, debido a su complejidad, normalmente solo se justifica en situaciones especiales⁵⁷.

La rigurosidad y complejidad del método, normalmente es justificada en situaciones especiales en donde, las condiciones como la topografía, cambios drásticos en la dirección de la línea.

⁵⁶ Opcit. ASCE and SEI

⁵⁷ Ibid

6.1.3.3 Condiciones del cable (materiales). Los cables, especialmente los conductores, están sujetos a alargamientos permanentes producto de su propio peso y factores externos a lo largo de su vida útil. Se puede afirmar un cable conductor o guía que está en su condición "inicial" si son cables nuevos y estos fueron izados hace unas pocas horas en el proceso de construcción de la línea. Los cables están en su condición "final después del creep" si han estado en servicio durante varios años. el proceso de fluencia lenta se ralentiza exponencialmente con el tiempo, y las estimaciones de fluencia futura generalmente se basan en un período de 10 años⁵⁸.

Los cálculos deberían basarse en las condiciones finales (después del creep y cargas producto de factores externos), pero el cálculo de las cargas de la estructura de diseño se basa normalmente en la condición "inicial", un criterio conservador de diseño, considerando que, en comparación con los valores iniciales, las tensiones son más bajas para las condiciones finales.

Tener en cuenta que por lo general las secciones de los cables conductores son secciones compuestas de varios materiales (acero-aluminio), hay alternativas para el cálculo de las propiedades mecánicas de los materiales relativamente simples, útiles para posteriormente hacer el cálculo de las tensiones del cable en conjunto.

Para el cálculo del módulo de elasticidad el cable conductor

$$E_{as} = E_{al} \left(\frac{A_{al}}{A_{total}} \right) + E_{st} \left(\frac{A_{st}}{A_{total}} \right)$$
(37)

En donde:

E_{as}=módulo de elasticidad del conjunto.
E_{al}=módulo de elasticidad del aluminio.
E_{st}=módulo de elasticidad del acero.

⁵⁸ Opcit. P. J. Freeman

A_{total}=área total de la sección. A_{al}=área de aluminio de la sección. A_{st}=área de acero de la sección.

Para el cálculo del coeficiente de dilatación termina del cable conductor

$$\alpha_{as} = \alpha_{al} \left(\frac{E_{al}}{E_{as}}\right) \left(\frac{A_{al}}{A_{total}}\right) + \alpha_{st} \left(\frac{E_{st}}{E_{as}}\right)$$
(38)

En donde:

 α_{as} =coeficiente de dilatación termina del conjunto. α_{al} = coeficiente de dilatación termina del aluminio. α_{st} = coeficiente de dilatación termina del acero.

6.1.3.4 Límites de tensión del cable. La ASCE 74-09 establece unos límites que se presentan en % RTS [2]. Los valores que se utilizaron para el proceso de optimización, se presentan en la tabla No.8.

Tabla 3. Límites de tensión de cables conductores y guías

	% RTS
Wind	25%
HIW	25%
wind and ice	50%
NESC	35%
C&M	35%

Fuente: ASCE 74-09 (4.3 wire tensión limits)

En donde:

RTS= Rated tension strength (resistencia nominal a tracción) NESC=National Electric Safety Code (código nacional de seguridad eléctrica) HIW=High Intensity Wind (viento de alta intensidad) C&M=Construction and maintenance (construcción y mantenimiento) 6.1.3.5 Calculo de la tensión del cable. Para el cálculo de las tensiones del cable conductor o cable guía que forma una catenaria sin cambios de altura en sus extremos, se utiliza la fórmula:

$$T = H + wD \tag{39}$$

Para el cálculo de las tensiones del cable conductor o cable guía que forma una catenaria con cambios de altura en sus extremos, se utiliza la fórmula:

$$T_{\rm R} = H + w D_{\rm R} \tag{40}$$

$$T_{\rm L} = H + wD_{\rm L} \tag{41}$$

6.2 PARÁMETROS DE DISEÑO DE ASCE 10 - 15

En la ASCE 10-15 de concentran todos los parámetros necesarios para el diseño de los elementos que componen la estructura, en donde se trabajan solamente cargas axiales

6.2.1 Tamaños mínimos. El espesor mínimo debe para miembros estructurales debe ser de 1/8" (3.1 mm) y para pletinas de conexión 3/16" (4.7 mm)

6.2.2 Materiales permitidos por la norma. Los parámetros de diseño presentados por la normativa son válidos para miembros laminados en caliente y en frio. Los estándares de acero utilizados con más frecuencia son:

- ASTM A36, acero estructural.
- ASTM A242, acero estructural de alta resistencia y baja aleación.
- ASTM A529, acero estructural con 42000 psi mínimo de punto de fluencia.
- ASTM A572, acero estructural de alta resistencia y baja aleación de columbio vanadio de calidad estructural (el utilizado en el proceso de optimización).
- ASTM A588, acero estructural de alta resistencia y baja aleación con 50000 psi mínimo de punto de fluencia.

 ASTM A606, acero laminado en caliente y frio, de baja resistencia y alta aleación con resistencia a la corrosión atmosférica.

La lista de aceros no excluye el uso de otro estándar de acero que conforme las propiedades químicas o mecánicas de uno de los enlistados

6.2.3 Elementos sometidos a tensión. La carga a tensión que puede soportar un elemento es calculada por la formula

$$P_{t} = F_{t} * A_{net}$$
(42)

$$F_{t} = \begin{cases} F_{y} & \text{Si esta conectada por ambos lados} \\ 0.9F_{y} & \text{Si esta conectada por ambos lados} \end{cases}$$
(43)

$$A_{net} = A_{eff} - d * t * n_h$$
 (44)

$$A_{eff} = \begin{cases} A \\ A - (b - a) * t * n_h \end{cases}$$
(45)

En donde

Ft= esfuerzo a tracción de diseño, que para perfiles ángulo depende si el elemento se encuentra conectado en una sola de las alas del perfil, o en ambas.

Anet=área neta, la cual se calcula basándose en el desgarramiento del elemento a través de su sección más débil, esta se calcula con la ecuación.

Aeff=Area efectiva de la sección.

d=diámetro del agujero.

t=espesor del elemento.

n_h=número de agujeros.

6.2.4 Elementos sometidos a compresión. La carga a compresión que puede soportar un elemento es calculada por la formula.

$$P_{c} = F_{c} * A \tag{46}$$

En donde

A=área de la sección trasversal del perfil metálico

Fc=corresponde al esfuerzo máximo permitido por la normativa

El caculo del valor de Fc, se encuentra definido por las ecuaciones:

$$F_{c} = \begin{cases} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{KL/r}{C_{c}} \right)^{2} \right] F_{cr} & \text{si } KL/r \leq C_{c} \\ \frac{\pi^{2}E}{\left(\frac{KL/r}{r} \right)^{2}} & \text{si } KL/r > C_{c} \end{cases}$$

$$C_{c} = \pi \sqrt{2^{\frac{E}{Fy}}} \qquad (47)$$

En donde

E=módulo de elasticidad del acero.

L=la longitud efectiva del elemento.

R=radio de giro.

K=coeficiente de longitud efectiva.

Fy=esfuerzo de fluencia.

Fcr=esfuerzo crítico.

Cc=es la relación de esbeltez critica entre el pandeo elástico e inelástico.

El esfuerzo crítico Fcr es una reducción del esfuerzo de fluencia, basado en una relación **W/t** en donde **W** corresponde a la longitud libre del ala del perfil, y **t**, es espesor del ala del perfil, para cálculo de este se usa la ecuación.

$$F_{cr} = \begin{cases} Fy & Si \ W/t \le \frac{80\Psi}{\sqrt{Fy}} \\ \left[1.667 - 0.677 \frac{W/t}{(W/t)_{lim}} \right] Fy & Si \ \frac{80\Psi}{\sqrt{Fy}} \le W/t < \frac{144\Psi}{\sqrt{Fy}} \\ \frac{0.0332\pi^{2}E}{(W/t)^{2}} & Si \ W/t > \frac{144\Psi}{\sqrt{Fy}} \end{cases}$$
(49)

Considerando que:

$$\left(\frac{W}{t}\right)_{lim} = \frac{80\Psi}{\sqrt{Fy}} \tag{50}$$

En donde Ψ es una constante que tiene el valor de $\Psi = 1$ para un Fy en Ksi y $\Psi = 2.62$ para Fy en Mpa.

La relación de esbeltez definida como (KL/r) para el cálculo de Fc, se encuentra restringido por una serie de límites, clasificados de acuerdo al tipo de elemento a compresión, estos pueden ser elementos principales, otros elementos y elementos redundantes.

Todo el procedimiento programado se encuentra con más detalle en el anexo C.

6.2.4.1 Relación de esbeltez. Para el cálculo de la relación de esbeltez, se discrimina los elementos estructurales de en 3 tipos: miembros pierna (leg members) o principales, miembros redundantes y otros miembros a compresión.

Miembros pierna (leg members)

Para miembros pierna atornillados en ambas caras en las conexiones

$$\frac{\mathrm{KL}}{\mathrm{r}} = \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{r}} \qquad 0 \le \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{r}} \le 150 \tag{51}$$

Otros miembros a compresión

 para miembros con una carga concéntrica en ambos extremos del panel no soportado,

$$\frac{\mathrm{KL}}{\mathrm{r}} = \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{r}} \qquad 0 \le \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{r}} \le 120 \tag{52}$$

 Para miembros con una carga concéntrica en un extremo y una excentricidad de encuadre normal en el otro extremo del panel no soportado,

$$\frac{KL}{r} = 30 + 0.75 \frac{L}{r} \qquad 0 \le \frac{L}{r} \le 120$$
(53)

 Para miembros con excentricidades normales de encuadre en ambos extremos del panel no soportado.

$$\frac{KL}{r} = 60 + 0.5 \frac{L}{r} \qquad 0 \le \frac{L}{r} \le 120$$
 (54)

 Para miembros sin restricciones contra la rotación en ambos extremos del panel no soportado.

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}$$
 $120 \le \frac{L}{r} \le 200$ (55)

 Para miembros parcialmente restringidos a la rotación en un extremo del panel no soportado.

$$\frac{\text{KL}}{\text{r}} = 28.6 + 0.762 \frac{\text{L}}{\text{r}} \qquad 120 \le \frac{\text{L}}{\text{r}} \le 225 \tag{56}$$

 Para miembros parcialmente restringidos a la rotación en ambos extremos del panel no soportado.

$$\frac{\text{KL}}{\text{r}} = 46.2 + 0.615 \frac{\text{L}}{\text{r}} \qquad 120 \le \frac{\text{L}}{\text{r}} \le 250 \tag{57}$$

Miembros redundantes

Para miembros con una carga concéntrica en ambos extremos del panel no soportado,

$$\frac{\mathrm{KL}}{\mathrm{r}} = \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{r}} \qquad 0 \le \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{r}} \le 120 \tag{58}$$

 Para miembros con una carga concéntrica en un extremo y una excentricidad de encuadre normal en el otro extremo del panel no soportado,

$$\frac{KL}{r} = 30 + 0.75 \frac{L}{r} \qquad 0 \le \frac{L}{r} \le 120$$
(59)

 Para miembros con excentricidades normales de encuadre en ambos extremos del panel no soportado.

$$\frac{KL}{r} = 60 + 0.5 \frac{L}{r} \qquad 0 \le \frac{L}{r} \le 120$$
 (60)

 Para miembros sin restricciones a la rotación en ambos extremos del panel no soportado.

$$\frac{KL}{r} = \frac{L}{r}$$
 $120 \le \frac{L}{r} \le 250$ (61)

 Para miembros parcialmente restringidos a la rotación en un extremo del panel no soportado.

$$\frac{\text{KL}}{\text{r}} = 28.6 + 0.762 \frac{\text{L}}{\text{r}} \qquad 120 \le \frac{\text{L}}{\text{r}} \le 225 \tag{62}$$

 Para miembros parcialmente restringidos a la rotación en ambos extremos del panel no soportado.

$$\frac{\text{KL}}{\text{r}} = 46.2 + 0.615 \frac{\text{L}}{\text{r}} \qquad 120 \le \frac{\text{L}}{\text{r}} \le 250 \tag{63}$$

Se debe considerar que, como el modelo a desarrollar será de una estructura constituida por elementos tipo cercha, no se tendrán en cuenta los parámetros de diseño que tengan en cuenta excentricidades o restricciones a la rotación. La programación desarrollada para el proceso de optimización en donde se considera las restricciones por esbeltez se presenta con más detalle en el anexo D.

7. PROGRAMACIÓN

En este capítulo, se realiza la descripción de los algoritmos utilizados para el desarrollo del procedimiento de optimización de la estructura en estudio (los códigos se presentan en los anexos A, B, C, D y E.

Utilizando el pseudocódigo del temple simulado (*simulated annealing*) presentado en la sección 5.1.2., se aplica al problema de optimización estructural en estudio, generando el diagrama de flujo presentado en la figura No.10.



Figura 10. Diagrama de flujo del proceso de optimización

En temple simulado (*simulated annealing*) adaptado al problema en estudio, tiene como parámetro de ingreso toda la información que corresponde a la configuración geométrica de la estructura (coordenadas de los nodos, conectividad de los elementos y ubicación de apoyos), las tensiones generadas en los cables y presiones de viento, posterior a ello, se define la temperatura inicial, temperatura final y el coeficiente de enfriamiento. A partir de ahí, el algoritmo funciona de forma autónoma generando, soluciones aleatorias que cumplan con todos los requisitos presentados en las normativas.

7.1 PROGRAMACIÓN REALIZADA PARA SOLUCIONAR UNA ESTRUCTURA DE TIPO CERCHA

Se empleó Matlab⁵⁹, (software que provee la Universidad Industrial de Santander, para toda la comunidad universitaria) para realizar la programación para el análisis de estructuras tipo cercha. En este ambiente, el parámetro de entrada, una estructura tipo Struct, organizada de la siguiente forma

D=struct('Coord',Coordenadas','Con',Conexiones','Re',Reacciones','Load', Cargas','E',ModuloDeElasticidad','A',Areas');

La función para desarrollar el análisis estructural de la estructura tipo cercha es function [F,U,R]=ST(D) w=size(D.Re);S=zeros(3*w(2));U=1-D.Re;f=find(U); for i=1:size(D.Con,2) H=D.Con(:,i);C=D.Coord(:,H(2))-D.Coord(:,H(1));Le=norm(C); T=C/Le;s=T*T';G=D.E(i)*D.A(i)/Le;Tj(:,i)=G*T; e=[3*H(1)-2:3*H(1),3*H(2)-2:3*H(2)];S(e,e)=S(e,e)+G*[s -s;-s s];

⁵⁹ Opcit. MathWorks and Cleve Moler

end

U(f)=S(f,f)\D.Load(f);F=sum(Tj.*(U(:,D.Con(2,:))-U(:,D.Con(1,:)))); Fuente: se trabajó con la función desarrollada por H. Rahami [39] en el lenguaje de Matlab.

7.1.1 Verificación con algoritmo en Matlab y SAP2000. Para validad el código arriba presentado, se resolvió una armadura con una configuración estructural definida sometida a una serie de cargas con el algoritmo y con un software comercial muy usado en el análisis y diseño estructural. Para la verificación se utilizó SAP2000⁶⁰ (software con licencia del grupo de investigación en materiales y estructuras de construcción - INME).

Figura 11. Estructura de verificacion



Fuente: Estructura tomada de Vargas, Lemonge, Barbosa, et. al.⁶¹[40]

⁶⁰ Computers and Structures Inc., "Sap2000." 2016.

⁶¹ D. E. C. Vargas, A. C. C. Lemonge, H. J. C. Barbosa, and H. S. Bernardino, "Um algoritmo baseado em evolução diferencial para problemas de otimização estrutural multiobjetivo com restrições," Rev. Int. Metod. Numer. para Calc. y Disen. en Ing., vol. 32, no. 2, pp. 91–99, 2016.

Las cargas utilizadas para realizar la verificación se presentan en la tabla No.9

Node	Fx (lb)	Fy (lb)	Fz (lb)
1	1000	-10000	-10000
2	0	-10000	-10000
3	500	0	0
6	600	0	0

Tabla 9. Cargas de estructura de verificación

Fuente: tomada de Vargas, Lemonge, Barbosa, et al.[40]

Para el ejercicio se trabajarán elementos con una sección transversal de 5800mm² (9 in²).

• Modelo en Matlab

- % Definition of Data
- % Nodal Coordinates

% Connectivity

Conexiones=[1 2;1 4;2 3;1 5;2 6;2 4;2 5;1 3;1 6;3 6;4 5;3 4;5 6;3 10;6 7;4 9;5 8; 4 7;3 8;5 10;6 9;6 10;3 7;4 8;5 9];

% Definition of Degree of freedom (free=0 & fixed=1); for 2-D trusses the last column is equal to 1

Reacciones=[0 0 0;0 0 0;0 0 0;0 0 0;0 0 0;0 0 0;1 1 1;1 1;1

% Definition of Nodal loads

Cargas=1e3*[1 -10 -10;0 -10 -10;0.5 0 0;0 0 0;0 0 0;0.6 0 0;0 0 0;0 0 0;0 0 0;0 0 0];

% Definition of Modulus of Elasticity

% Definition of Area

• Modelo en SAP2000

Figura 12. Modelo de estructura de verificación



Para este modelo se trabajó una sección con transversal con un perfil tubular rectangular que tuviera un área total de 5800mm² (9 in²)

Figura 13. Sección transversal de elementos de estructura de verificación

Section Notes		Modily/Show Notes		
Properties Section Properties	Property Modifiers Set Modifiers	Material + A36 -		
Dimensions Outside depth [13] Outside width [12] Flange thickness [14] Web thickness [14]	Б. 4. 05 05	Deplay Color		

$$A = (6)(4) - (6 - 1)(4 - 1) = 9in^2$$

Se asignó el módulo de elasticidad trabajado para el ejercicio

Material Name and Display Color	A36
Material Type	Steel .
Material Notes	Modily/Show Notes
Weight and Marc	Units
Weight per Unit Volume 0.28	06 b, in, F 💌
Mass per Unit Volume	68-04
Isohopic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	29000000
Poisson's Ratio, U	0,3
Coefficient of Thermal Expansion, A	6.500E-06
Shear Modulus, G	11153846
Other Properties for Steel Materials	
Minimum Yield Stress, Fp	36000.
Minimum Tensile Stress, Fu	58000,
Effective Vield Stress, Fye	54000.
Effective Tensile Shess, Fue	63800,
Switch To Advanced Property Displ	26

Figura 14. Propiedades mecánicas de elementos de estructura de verificación

Resultados

Los resultados generados por ambos programas se presentan en las tablas No.10, 11 y 12, comparando cargas, desplazamiento y reacciones en los apoyos, respectivamente.

Elomonto	Carga - SAP2000®	Carga - Matlab®	ERROR
Elemento	Lb	Lb	%
E1	1913,1	1913,10185	0,000096%
E2	3463,62	3463,61696	0,000088%
E3	4340,76	4340,76147	0,000034%
E4	-8532,56	-8532,56299	0,000035%
E5	-7669,66	-7669,65641	0,000047%
E6	5347,67	5347,66736	0,000049%
E7	-13303,41	-13303,41382	0,000029%
E8	6065,49	6065,49361	0,000059%
E9	-12597,24	-12597,23944	0,000004%
E10	607,78	607,77641	0,000590%

Tabla 10. Comparación de cargas de estructura de verificación

E11	1023,3	1023,30426	0,000417%
E12	-1426,53	-1426,53245	0,000172%
E13	1550,95	1550,94742	0,000166%
E14	1488,62	1488,61520	0,000322%
E15	-4551,93	-4551,92876	0,000027%
E16	807,89	807,89304	0,000376%
E17	-5227,71	-5227,71029	0,000005%
E18	3825,96	3825,96232	0,000061%
E19	3677,48	3677,48080	0,000022%
E20	-7715,67	-7715,67106	0,000014%
E21	-7959,66	-7959,66433	0,000054%
E22	-14367,43	-14367,43160	0,000011%
E23	8212,67	8212,67385	0,000047%
E24	6810,75	6810,74871	0,000019%
E25	-15814,25	-15814,24723	0,000018%

Tabla 11. Comparación de desplazamiento de estructura de verificación

Punt	Desplazamiento - SAP2000®			Desplazamiento - Matlab®			ERROR		
0	U1	U2	U3	U1	U2	U3	U1	U2	U3
	in	in	in	in	in	in	%	%	%
P1	0,0013 84	- 0,02979 4	- 0,00369	0,001384 14	- 0,029793 91	- 0,003690 5	0,01 %	0,00 %	0,01 %
P2	0,0019 34	- 0,02975 9	- 0,00457 8	0,001933 88	- 0,029759 03	- 0,004577 95	0,01 %	0,00 %	0,00 %
P3	0,0004 91	- 0,00186 7	0,00413 1	0,000490 82	- 0,001866 73	0,004131 45	0,04 %	0,01 %	0,01 %
P4	0,0000 81	- 0,00181 6	0,00356 4	8,09E-05	- 0,001816 24	0,003563 56	0,12 %	0,01 %	0,01 %
P5	0,0005 46	- 0,00211	- 0,00913 2	0,000546 38	- 0,002110 29	- 0,009132 35	0,07 %	0,01 %	0,00 %
P6	0,0001 01	- 0,00204 1	- 0,00859 2	0,000100 7	- 0,002041 37	- 0,008592 44	0,30 %	0,02 %	0,01 %
P7	0	0	0	0	0	0	-	-	-
P8	0	0	0	0	0	0	-	-	-
P9	0	0	0	0	0	0	-	-	-
P10	0	0	0	0	0	0	-	-	-

Pun to	Desplazamiento - SAP2000®			Desplazamiento - Matlab®			ERROR		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
	Lb	Lb	Lb	Lb	Lb	Lb	%	%	%
P7	- 5179,5 5	1710, 78	- 5752,7 3	- 5179,553 58	1710,77 712	- 5752,727 49	0,000 1%	0,000 2%	0,000 0%
P8	4177,1 7	490,0 7	- 4247,2 7	4177,167 02	490,067 623	- 4247,272 51	0,000 1%	0,000 5%	0,000 1%
P9	- 13168, 91	9538, 8	15797, 27	- 13168,90 94	9538,79 582	15797,27 25	0,000 0%	0,000 0%	0,000 0%
P10	12071, 3	8260, 36	14202, 73	12071,29 6	8260,35 943	14202,72 75	0,000 0%	0,000 0%	0,000 0%

Tabla 12. Comparación de reacciones de los apoyos de estructura de verificación

Se puede verificar que el algoritmo funciona perfectamente ya que, al obtener las cargas, los desplazamientos de los nudos y las reacciones, el porcentaje de error no supera el 0.0005%.

7.2 PROGRAMACIÓN DE LA ESTRUCTURA A OPTIMIZAR

La estructura analizada en este trabajo se presenta en la figura 15 en donde se definieron todos los elementos que hacen parte de la configuración geométrica de la estructura de transmisión como: coordenadas de los nodos de la estructura, conectividad de los elementos y puntos de apoyo, dejando todo en función de A y B, que corresponden a la base inferior y B a la base superior de la torre de transmisión (ver figura No. 15).

Nota: los detalles de la programación y todos los elementos que constituyen la estructura desarrollada que se presenta en la figura No.15, se muestran en el Anexo A.

Con la finalidad de mostrar la influencia que el número de variables puede tener en el proceso de optimización del peso de la torre mostrada en la figura No.15, se

utilizaron tres formas diferentes que agrupación de las variables que constituyen el problema (ver figuras No. 15, 16 y 17)



Figura 15. Esquema estructura a optimizar

Fuente: concebida por el autor utilizando bloques presentados por Casteleiro, Paris, Martínez et al.⁶².

Dentro del desarrollo del ejercicio académico, las 3 formas que se plantearon para agrupar las variables se presentan en los siguientes 3 modelos:

⁶² Opcit. M. Casteleiro, J. París, S. Martinez, F. Navarrina, and I.

- <u>Primer modelo</u>: busca desarrollar el proceso de optimización, considerando fijas las dimensiones de la estructura de transmisión de energía y su configuración geométrica y las variables son todos los elementos que componen la estructura (554 variables).
- <u>Segundo modelo</u>: a diferencia del primer modelo, este busca agrupar los elementos de acuerdo al tipo de elemento y módulo de torre, buscando unificar y reducir significativamente las variables a optimizar (34 variables, ver figura No.16)



Figura 16. Distribución de variables del segundo modelo
<u>Tercer modelo</u>: dentro de este modelo, se agrupan los elementos de acuerdo al tipo de elemento y módulo de torre, buscando unificar y reducir significativamente las variables a optimizar, formulando un modelo que es constructivamente mucho más eficiente que el primer y segundo modelo (9 variables, ver figura No. 17)



Figura 17. Distribución de variables del tercer modelo

Nota: El código en donde se presenta las coordenadas, conectividades, apoyos y etc. Se presentan detallados en el anexo A.

7.3 PROGRAMACIÓN DE CARGAS DE ESTRUCTURA DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA

La obtención de las cargas a las cuales se somete la estructura se desarrolla en dos programaciones, en la primera se calculan las tensiones producto de las condiciones que se desarrollan en los cables y la segunda sobre la presión, ya que en una los términos son fijos y en la segunda son variables (Ver Anexo B)

Los argumentos de entrada utilizados para el cálculo de cargas se muestran en la tabla No.13.

relative reliability factor (factor de fiabilidad relativa)	1	-
ruling span (vano dominante)	350	m
wind span (vano de viento)	400	m
weight span (vano de peso)	500	m
line angle (ángulo de la línea)	5.0	degrees
length of insulator assembly (long. Del conjunto del aislador)	1.2	m
weight of insulator assembly (peso del conjunto del aislador)	1.0	KN
weight of ground wire assembly (peso del conjunto del cable de tierra)	0.2	KN
no topographic effects (sin efectos topográficos)	1	Kzt (NU)
Q	0.613	-
V50	28	m/s

Tabla 13. Argumentos de entrada para cálculo de cargas

Se asume que la línea de transmisión de energía se encuentra en una zona que clasifica en la categoría de exposición de tipo C. El cable conductor y el cable guía asumido para el cálculo de cargas a las cuales se someterá la estructura de transmisión de energía son (ver tabla No.14).

Conductor		ground wire		
(cable conductor)		(cable guia)		
954 Kcmil 45/7 ACSR RAIL		7#8 Aluminium Clad Steel Ground Wire		
d(mm)=	29.591	d(mm)=	9.770	
W(N/m)=	15.687	W(N/m) =	3.823	
Thermal elong. Coef.(1/°C) (coef. De expansión térmica)	3.45E-07	Thermal elong. Coef.(1/°C) (coef. De expansión térmica)	3.79E-07	
Breaking strength (N) (resist. A la rotura)	109759.33	Breaking strength (N) (resist. A la rotura)	70859.826	

Tabla 14. Propiedades mecánicas del cable conductor y guía

La ubicación y temperaturas asumidas para el cálculo de tensiones de cables conductores y guías se presentan en la tabla No.15.

Tabla 15. Ubicación y temperaturas para el cálculo de tensiones

Ubicación	Santander	
Temperatura Max	70	°C
Temperatura Min	15	°C
Temperatura de trabajo	30	°C
Temperatura media	24	°C
Presencia de nieve	No	
Presencia de vientos de alta intensidad (tornados)	No	

Resultados obtenidos para las cargas de viento se presentan en las tablas No.16 y No.17

• Categoría de exposición

Tabla 16. Factores de categoría de exposición

Category (categoría)	С	
αfm	7	
Zg	274.32	m
К	0.005	
Ls	67.056	m
α	9.5	
Kv	1.43	

Fuente: ASCE 74-09

• Presiones (cables y estructura)

Consideró que para el desarrollo de cálculo de presiones la altura efectiva Zh, en el cálculo de presiones en cables corresponde al promedio de la altura de los cables y en el cálculo de presiones en estructura a 2/3 de la altura total de la estructura, ver las tablas No. 17 y No.18:

average wire height (zh) (altura promedio de cables)	35	m
Kz	1.30300371	
E	0.28994682	
Bw	0.17324625	
Gw	0.64836776	
wind pressure (wires) (presión de viento en cables)	406.016421	ра
wind pressure (wires) (presión de viento en cables)	0.40601642	Кра

Tabla 18. Factores y presión de viento para estructura de transmisión (caso viento extremo)

Structure height (altura de la estructura)	39	m
two-thirds of S-H(Zh) (2/3 de la altura de la estructura)	26	m
Kz	1.223961679	
E	0.302524427	
Bt	0.821603607	
Gt	0.851083767	
wind pressure (structures) (presión de viento en la estructura)	500.6297629	ра
wind pressure (structures) (presión de viento en la estructura)	0.500629763	Кра

Teniendo en cuenta las recomendaciones que se dan en la ASCE 74-09, las presiones para los casos de carga NESC y C&M se muestran en la tabla No.19:

Tabla 19. Presiones de viento para casos adicionales (valores en KPa)

	Wire (1.5)	Structure (2.5)
Wind pressure NESC (4 psf) (presión de viento según código nacional de seguridad eléctrica)	0.2873	0.4788
Wind Pressure C&M (3 psf) Presión de viento para construcción y mantenimiento)	0.2155	0.3591

• Tensiones y flechas iniciales de bajo diferentes condiciones

			Conductor Wire		Ground Wire	
Loading	Temp	Wind	Initial Sag	Initial Tension	Initial Sag	Initial Tension
Case	(°C)	(Kpa)	(m)	(N)	(m)	(N)
wind	70	0.4060	11.0598	27357.7582	4.8456	17410.3069
wind 30°	70	0.3045	10.1318	27342.0479	4.2821	17323.9277
NESC	15	0.1915	7.1021	38470.0822	2.9016	25030.5297
C&M	15	0.1436	6.7392	38476.0783	2.6656	25072.7452
FC	30	0.0000	8.7598	27422.8051	3.3206	17630.8923
No wind	70	0.0000	8.7959	27310.0856	3.4238	17099.4767

Tabla 20. Calculo de tensiones iniciales de cables conductores y guías

• Cargas de diseño en cables

Usando como base las tensiones iniciales, se calculan las cargas, verticales, longitudinales y transversales producto de todas las acciones sobre los cables conductores o guías, que se transfieren directamente a las crucetas de la estructura de transmisión de energía como se ve en la figura no.18.

Figura 18. Distribución de carga de cables en la estructura



En donde:

V=carga vertical del cable

T=carga transversal del cable

L=carga longitudinal del cable

El cálculo de las tensiones que los cables conductores y guías producen en la estructura de transmisión de energía siguen las siguientes formulas.

$$V = (W_{cable})(S_{weight}) + (w_{i-e})$$
(64)

$$T = (\sigma_{wind})(d_{cable})(S_{wind}) + (T_{cable})(\sin\theta)$$
 (65)

L = 0 para combinaciones de wind, wind30°, NESC, C&M

 $L = (RSL)(T_{cable})(\cos \theta) \text{ para combinacion con Broken wire (cable roto)}$ (66)

En donde:

W_{cable}=peso por unidad de longitud del cable a calcular

Sweight=vano de peso

W_{i-e}=peso de ensamble del cable

 σ_{wind} =presión de viento sobre el cable

d_{cable}=diámetro del cable

T_{cable}=tensión del cable para el caso de carga

 θ =angulo del cable

RSL=Carga estatica residual (ver figura No.5)

Aplicando las ecuaciones para cada uno de los casos de carga se obtienen los siguientes resultados:

Wind (viento) Conductor wire (cable conductor)

$$V = \left(15.687 \frac{N}{m}\right)(500m) + 1000N = 8844N$$

$$T = (0.4060 \text{KPa})(29.591 \text{mm})(400 \text{m}) + 2(27357.7582 \text{N}) \sin\left(\frac{5^{\circ}}{2}\right) = 7192 \text{N}$$

L = 0N
Ground wire (cable guía)

$$V = \left(3.823 \frac{\text{N}}{\text{m}}\right)(500 \text{m}) + 200 \text{N} = 2112 \text{N}$$

$$T = (0.4060 \text{KPa})(9.770 \text{mm})(400 \text{m}) + 2(17410.3069 \text{N}) \sin\left(\frac{5^{\circ}}{2}\right) = 3106 \text{N}$$

L = 0N

Wind 30° (viento a 30°)

Conductor wire (cable conductor)

$$V = \left(15.687 \frac{N}{m}\right)(500m) + 1000N = 8844N$$
$$T = (0.3045KPa)(29.591mm)(400m) + 2(27342.0479N)\sin\left(\frac{5^{\circ}}{2}\right) = 5990N$$
$$L = 0N$$

Ground wire (cable guía)

$$V = \left(3.823 \frac{N}{m}\right)(500m) + 200N = 2112N$$

T = (0.3045KPa)(9.770mm)(400m) + 2(17323.9277N) sin $\left(\frac{5^{\circ}}{2}\right) = 2701N$
L = 0N

NESC (código nacional de seguridad eléctrica)

Conductor wire (cable conductor)

$$V = 1.5 \left(15.687 \frac{N}{m} \right) (500m) + 1.5 (1000N) = 13266N$$
$$T = 2.5 (0.1915 \text{KPa}) (29.59 \text{mm}) (400m) + 1.65 (2) (38470.0822N) \sin\left(\frac{5^{\circ}}{2}\right) = 7192N$$
$$L = 0N$$

Ground wire (cable guía)

$$V = 1.5 \left(3.823 \frac{N}{m} \right) (500m) + 1.5 (200N) = 3168N$$
$$T = 2.5 (0.1915 \text{KPa}) (9.770 \text{mm}) (400m) + 1.65 (2) (25030.5297 \text{N}) \sin \left(\frac{5^{\circ}}{2} \right) = 5474 \text{N}$$
$$L = 0 \text{N}$$

C&M (construcción y mantenimiento)

Para este caso de cargas, se tienen cuenta la recomendación del ASCE 74-09 en donde, como no se conoce la pendiente de la línea de tracción, se trabaja con una relación de 3/1 (horizontal/vertical).

Conductor wire (cable conductor)

$$V = 1.5 \left(\frac{1}{3}\right) (38476.0783N) + \frac{1.5 \left(15.687 \frac{N}{m}\right) (500m)}{2} + 1.5 (1000N) = 26621N$$
$$T = 2.5 (0.1436 \text{KPa}) (29.591 \text{mm}) (400m) + 1.5 (2) (38476.0783N) \sin\left(\frac{5^{\circ}}{2}\right) = 7585N$$
$$L = 0N$$

Ground wire (cable guía)

$$V = 1.5 \left(\frac{1}{3}\right) (25072.7452N) + \frac{1.5 \left(3.823 \frac{N}{m}\right) (500m)}{2} + 1.5 (200N) = 14270N$$
$$T = 2.5 (0.1436 \text{KPa}) (9.770 \text{mm}) (400m) + 1.5 (2) (38476.0783N) \sin\left(\frac{5^{\circ}}{2}\right) = 4123N$$
$$L = 0N$$

FC (Broken Wire – Ruptura de cable)

Considerar que para el cálculo de las tensiones longitudinales se trabaja con el factor RSL (Residual Static Load) que se obtiene de la figura No.5

RSL Load Factor	
Sap/Sag	39.95540762
Sap/Insulatorlength	233.3333333

En donde se obtiene un factor RSL = 0.7 aproximadamente. Conductor wire (cable conductor)

$$V = \frac{\left(15.687 \frac{N}{m}\right)(500m)}{2} + (1000N) = 4922N$$
$$T = (0.7)(27422.8051N) \sin\left(\frac{5^{\circ}}{2}\right) = 837N$$
$$L = (0.7)(27422.8051N) \cos\left(\frac{5^{\circ}}{2}\right) = 19178N$$

El RSL que se utiliza para los cables guías tiene un valor de 1.0 Ground wire (cable guía)

 $V = \frac{\left(3.823 \frac{N}{m}\right)(500m)}{2} + (200N) = 4922N$ $T = (1.0)(17630.8923N) \sin\left(\frac{5^{\circ}}{2}\right) = 769N$ $L = (1.0)(17630.8923N) \cos\left(\frac{5^{\circ}}{2}\right) = 17614N$ FC (intact wire – Cable intacto)

Conductor wire (cable conductor)

$$V = \left(15.687 \frac{N}{m}\right)(500m) + 1000N = 8844N$$
$$T = (2)(38476.0783N) \sin\left(\frac{5^{\circ}}{2}\right) = 2382N$$
$$L = 0N$$

Ground wire (cable guía)

$$V = \left(3.823 \frac{N}{m}\right)(500m) + 200N = 2112N$$
$$T = (2)(38476.0783N) \sin\left(\frac{5^{\circ}}{2}\right) = 1492N$$
$$L = 0N$$

	Conductor (cable cond	Wire ductor)		Ground Wi (cable guía	re ı)	
loading case						
(caso de carga)	V (N)	T (N)	L (N)	V (N)	T (N)	L (N)
wind	8844	7192	0	2112	3106	0
wind 30°	8844	5990	0	2112	2701	0
NESC	13266	11205	0	3168	5474	0
C&M	26621	7585	0	14270	4123	0
FC (Broken Wire)	4922	837	19178	1156	769	17614
FC (Intact Wire)	8844	2382	0	2112	1492	0

Tabla 21. Resumen de cargas

• Cargas de diseño en estructura

Calculadas las presiones en cada una de los casos de carga, se continúa con el cálculo de del factor de fuerza que corresponde a la estructura, para el caso, la estructura se subdivide en 3 zonas por cara de estructura, ver figura No 19.

Loading Case	Wind (Kpa)
(caso de carga)	(presion de viento)
wind	0.5006
wind 30°	0.3045
NESC	0.4788
C&M	0.3591
FC	0
No wind	0

Tabla 22. Presiones viento para estructura



Figura 19. Distribución de presiones en torre de alta tensión

El cálculo del coeficiente de fuerza presente en la tabla No.5 está en función de índice de solidez ϕ , en donde extrapolando la ecuación No.18 para cada cara, se obtiene.

$$\varphi_{i} = \frac{A_{m-i}}{A_{0-i}} \tag{67}$$

Se plantea la aproximación de los factores ϕ

$$A_{m-i} = \sum (L_i)(t_i)$$
 (68)

$$A_{0-i} = A_{cara-i} \tag{69}$$

Considerando que la ecuación No.65 depende de los perfiles metálicos que se va a utilizar, las funciones se dejan programas para hacer el cálculo en cada iteración.

Nota: el proceso de cálculo desarrolla con más detalle en el anexo B.

7.4 PROGRAMACIÓN DE RESTRICCIONES DE CRITERIOS DE DISEÑO DE LA ASCE 10-15

Las consideraciones que se tienen en cuenta en el análisis con base a los criterios de diseño ver figura No.20:

Elementos sometidos a tensión

- Solo se aplicarán las ecuaciones No. 4 y 5 que comprenden los estados de límite de fluencia de sección bruta y límite de fractura. La razón por la cual se obvian las ecuaciones No. 6 y 7, es porque estos estados son obedecen más a la configuración de las conexiones de los elementos que a los perfiles que se utilizan para diseñar.
- Para el estado límite de fractura, teniendo en cuenta que se debe tener información acerca del diámetro del tornillo que se usa para la conexión, para este se propone el uso de 5/8".

Elementos sometidos a compresión

 El parámetro Tipo, es un vector en donde se clasifica el tipo de elemento que se está utilizando que comprende leg members (miembros pierna), otros miembros a compresión (ecuación No. 49 y 52) y miembros redundantes (ecuación No. 55 y 58). 2. Dentro de los criterios de diseño que comprenden la relación de esbeltez, solamente se trabajan los que se encuentran en la ecuación No. 48, 49, 52, 55 y 58, considerando que el modelo a desarrollar será de una estructura constituida por elementos tipo cercha, razón por la cual no se consideran los parámetros de diseño que tengan en cuenta excentricidades o restricciones a la rotación.

Nota: para ver a profundidad el procedimiento mirar el código en el anexo C.

Figura 20. Diagrama de flujo de restricciones de diseño de ASCE 10-15



7.5 PROGRAMACIÓN PARA GENERAR UNA SOLUCIÓN (CONFIGURACIÓN DE PERFILES)

Las consideraciones que se tienen en cuenta en la generación de una solución son:

- Se omiten todos los perfiles estructurales en L que se encuentran en el mercado colombiano que tengan espesores de ala menores de 1/8" (3.1 mm).
- Sin importar si el elemento estructural se encuentra sometido a cargas de tensión o de compresión, uno de los parámetros de generación, las relaciones de esbeltez que se encuentran en las ecuaciones No. 48, 49, 52, 55 y 58.

7.6 PROGRAMACIÓN DE FUNCIÓN OBJETIVO

Se define la función objetivo que, para el caso, es el peso de la estructura

$$W = \sum_{i=1}^{n} (\rho)(L_i)(A_i)$$
 (70)

Siendo

ρ=peso específico del acero

Li=longitud del i-esimo elemento

Ai=área del i-esimo elemento

8. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de 10 procesos de optimización (realizados por el programa de optimización desarrollado en este trabajo) para cada uno de los modelos planteados en el capítulo 7 (ver figuras No. 15,16 y 17). En los resultados se presenta el tiempo de computo, el peso mínimo obtenido en cada caso y el porcentaje de reducción del peso con relación al primer diseño válido obtenido por el programa de optimización. Vale la pena resaltar que, el programa está diseñado para iniciar con un diseño aleatorio y que la optimización solo comienza cuando uno de los diseños satisface todas las restricciones consideradas (ver capítulos 6 y 7).

8.1 PRIMER MODELO (554 VARIABLES)

Para el primer modelo, se definió la base inferior de la torre (A) y base superior (B), (ver figura No.15) como parámetros fijos con los valores de 8m y 2m, respectivamente, una temperatura inicial (Ti) de 1, temperatura final (Tf) de 1e-10 los resultados obtenidos se presentan en la tabla no.23

A=8m, B=2m, No. Máximo de iteraciones=500, β =0.99, Ti=1, Tf=1e-10

iteratio n	Time (seg)	Wi (N)	Wf (N)	Wmin - in process (N)	% - final	% - in process
1	3313.9	258621.3	233114.9	233114.9	9.8624	9.8624
2	2882.1	247732.1	231381	229615.9	6.6003	7.3128
3	3233.6	245391.8	231207.4	229653.4	5.7803	6.4136
4	3175.5	247014.2	231922	230443.5	6.1098	6.7084
5	3272.5	251668.8	234345	230719.7	6.8836	8.3241
6	3233.8	240191.9	233608.5	231551.7	2.7409	3.5972
7	3220.3	237759.8	231339.5	228437.8	2.7004	3.9208
8	3249.6	253381	223137	223137	11.9362	11.9362
9	2972.9	243273.1	231625.5	231625.5	4.7879	4.7879
10	3186	247164	232179.2	230693	6.0627	6.664
Mean	3174.0	248270.9	231386.0	229899.2	6.3	7.0
Desv	137.5	5550.0	3086.5	2700.9	2.9	2.6

Tabla 23. Resumen proceso de optimización - primer modelo

En la figura No. 21, se muestran las curvas de convergencia del proceso de optimización para el modelo No.1



Figura 21. Variación del peso en la optimización - primer modelo

Para el primer modelo, se observa que el tiempo de computo promedio de para proceso de optimización (500 iteraciones), toma 3174 segundos (0.88 horas), que es un valor considerable y que era de esperarse, ya que el al tener un número considerable de variables, obtener un resultado que cumpla todas las restricciones tiene un costo computacional más elevado.

Aunque en este primer proceso de optimización se tiene un elevado número de variables, los resultados vistos en la tabla No. 23 y en la figura No.21, presentan un proceso de optimización estable (el peso disminuye), lento y con un costo computacional alto, producto del elevado número de variables involucradas.

8.2 SEGUNDO MODELO (34 VARIABLES)

En este segundo proceso, la agrupación de perfiles trabajada, condujo a un problema de optimización con 34 variables. Los valores de A, B, Ti y Tf, son iguales a los usados en el primer modelo. Los resultados de este caso se pueden apreciar en la tabla 24.

A=8m, B=2m, No. Máximo de iteraciones=500, β =0.99, Ti=1, Tf=1e-10

iteration	Time (seg)	Wi (N)	Wf (N)	Wmin - in process (N)	% - final	% - in process
1	211.2	253204.2	176858.9	176858.9	30.1517	30.1517
2	208.7	347350.8	205808.2	205808.2	40.7492	40.7492
3	202.3	204315.8	203127.3	203127.3	0.5817	0.5817
4	193.6	296401.9	194381.4	194381.4	34.4197	34.4197
5	205.8	237736.8	185811.2	185811.2	21.8416	21.8416
6	207.1	222824.8	198515.9	198515.9	10.9095	10.9095
7	197.7	237260.8	203184.7	203184.7	14.3623	14.3623
8	206.7	250414.9	195103.8	195103.8	22.0878	22.0878
9	207.7	335505.4	190085.8	190085.8	43.3434	43.3434
10	208	386311.1	194521.1	194521.1	49.6465	49.6465
Mean	204.9	277132.7	194739.8	194739.8	26.8	26.8
Desv	5.4	60835.9	8818.2	8818.2	15.6	15.6

Tabla 24. Resumen proceso de optimización - segundo modelo

En la figura No. 22, se muestran las curvas de convergencia del proceso de optimización para el modelo No.2



Figura 22. Variación del peso en la optimización - segundo modelo

En este segundo modelo, en comparación al primero, el costo computacional, disminuye considerablemente, pasando en promedio de 3174 segundos a 204.9 segundos. El comportamiento es más eficiente, ya que se logra una disminución de peso en menos iteraciones y se obtiene un peso mínimo.

8.3 TERCER MODELO (9 VARIABLES)

Para este caso los resultados se consignan en la tabla 25. A=8m, B=2m, No. Máximo de iteraciones=500, β =0.99, Ti=1, Tf=1e-10

iteration	Time (seg)	Wi (N)	Wf (N)	Wmin - in process (N)	% - final	% - in process
1	112.8	313334.5	193900.9	193900.9	38.117	38.117
2	114.2	353524.5	186633.8	186633.8	47.2077	47.2077
3	115.1	345668.8	191463.3	191463.3	44.6108	44.6108
4	113.6	309451.4	211106.4	211106.4	31.7804	31.7804
5	105.7	323379.4	191098.6	191098.6	40.9057	40.9057
6	115.4	403779.2	197626	197626	51.0559	51.0559
7	114	259438.1	202418.7	202275.9	21.9781	22.0331

Tabla 25. Resumen proceso de optimización - tercer modelo

8	111.4	355125.1	184038.3	184038.3	48.1765	48.1765
9	108	359849.8	196103.3	189849.5	45.5041	47.242
10	114.7	386007.5	201647.6	201647.6	47.7607	47.7607
Mean	112.5	340955.8	195603.7	194964.0	41.7	41.9
Desv	3.2	41397.7	8043.0	8226.3	8.9	9.0

En la figura No. 3, se muestran las curvas de convergencia del proceso de optimización para el modelo No.3

Figura 23. Variación del peso en la optimización - tercer modelo



En este tercer modelo, en comparación al primero, el costo computacional, disminuye considerablemente, pasando en promedio de 3174 segundos a 112.5 segundos y al igual que el segundo modelo, este tiene un comportamiento eficiente, obteniendo una disminución de peso en menos iteraciones, sin embargo, comparado con el segundo modelo, no difiere mucho en los resultados finales en la optimización. Este modelo sería el ideal para construir, considerando que ya que tiene la distribución homogénea de perfiles y solo utiliza 9 tipos de perfiles (9 variables).

8.4 RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL PESO

Si se plantea que, dentro de los 10 ciclos de optimización desarrollados, en cada uno de los modelos, se asigna el menor de los diseños iniciales como el diseño de referencia, se obtienen los resultados (para la reducción del peso de la estructura) mostrados en las tablas No.26, 27 y 28.

Tabla 26. Porcentaje de reducción con respecto a diseño de referencia del primer modelo

Wmin-I (N)=		237759.843
ciclo	Wfinal (N)	Reducción del peso (%)
1	233114.9	1.9536%
2	231381	2.6829%
3	231207.4	2.7559%
4	231922	2.4554%
5	234345	1.4363%
6	233608.5	1.7460%
7	231339.5	2.7004%
8	223137	6.1503%
9	231625.5	2.5801%
10	232179.2	2.3472%
Mean	231386.0	2.68%
Desv	3086.5	

Tabla 27. Porcentaje de reducción o	con respecto	a diseño	de referencia	del segundo
modelo				

Wmin-I (N)=		204315.843
aiala	Minel (NI)	Reducción
CICIO		del peso (%)
1	176858.9	13.44%
2	205808.2	-0.73%
3	203127.3	0.58%
4	194381.4	4.86%
5	185811.2	9.06%
6	198515.9	2.84%
7	203184.7	0.55%
8	195103.8	4.51%
9	190085.8	6.96%
10	194521.1	4.79%
Mean	194739.8	4.69%
Desv	8818.2	

Wmin-I (N)=		259438.147
ciclo	Withol (NI)	Reducción
CICIO	vviiriai (iv)	del peso (%)
1	193900.933	25.26%
2	186633.759	28.06%
3	191463.305	26.20%
4	211106.414	18.63%
5	191098.643	26.34%
6	197626.024	23.83%
7	202418.67	21.98%
8	184038.321	29.06%
9	196103.318	24.41%
10	201647.628	22.28%
Mean	195603.7	24.60%
Desv	8043.0	

Tabla 28. Porcentaje de reducción con respecto a diseño de referencia del tercer modelo

Haciendo una comparación de los resultados obtenidos en el proceso de optimización aquí presentado, con procesos de optimización similares con estructuras de transmisión de energía⁶³,⁶⁴, y trabajos más recientes desarrollados por autores como Tort, Couceiro, Casteleiro, Hasancebi⁶⁵,⁶⁶,⁶⁷,⁶⁸, se puede afirmar que en términos generales las reducciones del peso suelen oscilar en valores entre el 3% al 10% con relación a un primer diseño generado por una programación y utilizando procesos de recalentamiento dentro del algoritmo se pueden lograr reducciones de hasta el 15% (dependiendo de la complejidad del proceso. En particular, se observa que cada uno de los modelos analizados en este estudio presentó reducciones de peso promedio de 2.69% para el modelo de 554 variables, de 4.69% en el modelo de 32 variables y de 24. 6% para el modelo de 9 variables. Por otro lado, los tiempos de procesamiento suelen fluctuar, dependiendo de la cantidad de variables involucradas y del algoritmo empleado en el proceso, entre dos minutos o menos para problemas de optimización estructural con un bajo

⁶³ Opcit. D. J. Sheppard and A. C. Parlmer

⁶⁴ Opcit G. V. Rao.

⁶⁵ Opcit. I. Couceiro, J. París, S. Martínez, I. Colominas, F. Navarrina, and M. Casteleiro

⁶⁶ Opcit. C. Tort, S. Şahin, and O. Hasançebi

⁶⁷ Opcit. I. Couceiro, J. París, S. Martínez, I. Colominas, F. Navarrina, and M. Casteleiro.

⁶⁸ Opcit. O. Hasançebi, T. Teke, and O. Pekcan, "A bat-inspired algorithm for structural optimization," Comput. Struct., vol. 128, pp. 77–90, 2013.

número de variables y 45 minutos o más en problemas con una cantidad más elevada de variables y espacios de búsqueda mayores, valores que son consistentes con los resultados obtenidos, que fueron 3174 segundos (52.9min), 204 segundos (3.4min) y 112 segundos (1.8min) para los modelos de 554, 34 y 9 variables, respectivamente.

Haciendo una comparación de los resultados del proceso de optimización del peso aquí desarrollado con el peso de una estructura real (ver figura 24) diseñada y construida por una empresa Colombia del sector eléctrico (con 39 metros de altura y A=8576mm y B=1090mm) se pueden obtener los resultados mostrados en las tablas 29, 30 y 31. Vale la pena mencionar que el peso de la estructura mostrada en la figura 24 fue de 201645 N.



Figura 24. Plano de torre de transmisión real de 115KV

"Nota: por políticas de seguridad y confidencialidad de la empresa, solo se presentan, en la figura No.24, detalles generales de la torre"

WReal (N) =	:	201645.2
	Wfinal (N)	Reducción
ciclo	Primer modelo (554 variables)	del peso (%)
1	233114.9	-15.6065%
2	231381.0	-14.7466%
3	231207.4	-14.6605%
4	231922.0	-15.0149%
5	234345.0	-16.2165%
6	233608.5	-15.8513%
7	231339.5	-14.7260%
8	223137.0	-10.6582%
9	231625.5	-14.8678%
10	232179.2	-15.1424%
Mean	231386.0	-14.75%
Desv	3086.5	

Tabla 29. Porcentaje de reducción del peso real respecto al primer modelo

En este primer modelo de optimización, es más evidente que desarrollar un proceso de optimización de un modelo con tantas variables (554 variables) se vuelve ineficiente, ya que en ninguno de los casos se disminuye el peso de la estructura.

Tabla 30. Porcentaje de reducción del peso real respecto al segundo modelo

WReal (N)=		201645.2
	Wfinal (N)	Reducción
ciclo	Segundo modelo (34 variables)	del peso (%)
1	176858.9	12.2920%
2	205808.2	-2.0645%
3	203127.3	-0.7350%
4	194381.4	3.6023%
5	185811.2	7.8524%
6	198515.9	1.5519%
7	203184.7	-0.7635%
8	195103.8	3.2440%
9	190085.8	5.7325%
10	194521.1	3.5330%
Mean	194739.8	3.42%
Desv	8818.2	

WReal (N)=		201645.2
	Wfinal (N)	Reducción
ciclo	Tercer modelo (9 variables)	del peso (%)
1	193900.933	3.8405%
2	186633.759	7.4445%
3	191463.305	5.0494%
4	211106.414	-4.6920%
5	191098.643	5.2303%
6	197626.024	1.9932%
7	202418.67	-0.3836%
8	184038.321	8.7316%
9	196103.318	2.7483%
10	201647.628	-0.0012%
Mean	195603.7	3.00%
Desv	8043.0	

Tabla 31. Porcentaje de reducción del peso real respecto al tercer modelo

Aunque el porcentaje de disminución del peso no es tan elevado comparado con el proceso anterior, se obtiene un promedio de reducción de peso entre el 3% y 3.42% (para las 10 iteraciones en los modelos mostrados en las tablas No. 29, 30 y 31), valor que es coherente con la literatura encontrada. Sin embargo, analizando cada caso en particular, se ve que el algoritmo alcanza una reducción del 8.7% para el tercer modelo y del 12,29% para el segundo modelo del peso original de la torre (ver tablas No.30 y No.31) cuando se emplean el segundo y tercer modelo, respectivamente. El anterior es un resultado prometedor ya que puede traer altos beneficios económicos, considerando que, en proyectos de trasmisión de energía, que utilizan este tipo de estructuras, por lo general se construye un alto número de torres de transmisión para la instalación de la línea.

9. CONCLUSIONES

En este trabajo se programó y se verifico el algoritmo del temple simulado (*simulated annealing*) según las ecuaciones y los pseudocódigos, encontrados en la literatura (formulado en el capítulo 3), adaptándolo a un problema de optimización estructural de torres de transmisión de energía (la programación del algoritmo de optimización se presenta en el anexo E, y se utilizan los códigos presentados en los anexos A, B, C, D y F, como base para su adaptación). En estos anexos (A, B, C, D y F) se muestran: el código de la estructura (coordenadas de nodos, conectividad de elementos, propiedades mecánicas y tipo de elemento según ASCE 10-15); las cargas; los criterios de diseño con base a ASCE 10-15; el generador de una posible solución y el código que contiene los perfiles comerciales, respectivamente.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el capítulo 8 (secciones 8.1, 8.2 y 8.3), haciendo un ciclo de optimización de 500 iteraciones, para el primer modelo (554 variables), un ciclo en promedio dura 3175 segundos, en el segundo modelo (34 variables), tiene una duración de 204.9 segundos y el tercer modelo (9 variables), tiene una duración 112.5 segundos. Luego, al reducir el número de variables que hacen parte del proceso de optimización, el costo computacional medido en el tiempo de procesamiento, se reduce significativamente.

Dentro de los 10 ciclos desarrollados para cada modelo de optimización, se obtuvieron desviaciones estándar bajas y no se presentaron variaciones significativas en los resultados finales de la optimización en los 10 ciclos. Se puede concluir que el algoritmo desarrollado es estable. Si se hace un análisis detallado de los modelos desarrollados, el procedimiento de optimización es más eficiente en un problema con un espacio de búsqueda pequeño (citando los modelos de 34 y 9 variables) en donde se logran reducciones significativas cumplidas las 500

99

iteraciones. Sin embargo, el primer modelo (de 554 variables) debe tener un número mucho mayor para llegar a resultados similares

El desarrollo de un proceso de optimización considerando los dos últimos modelos planteados (de 34 y 9 variables, respectivamente) es una opción apropiada para la aplicación de la optimización ya que su costo computacional es bajo, lográndose reducciones de forma más rápida que en el modelo de 554 variables. Adicionalmente, las estructuras finales resultan más convenientes en un escenario real, debido a que la distribución de los perfiles es más uniforme.

Se debe resaltar que desarrollar un proceso de optimización con el temple simulado (simulated annealing), presenta resultados prometedores, en donde se obtuvo una reducción promedio de un 3% a 3.42%, sin embargo, el programa genero soluciones con reducciones de hasta un 12% del peso total de la torre, un porcentaje que puede considerarse significativo hablando en términos económicos, ya que la mayor parte de los proyectos de transmisión de energía eléctrica implican la construcción de un número elevado de torres para la instalación de la línea de transmisión de energía eléctrica.

10. OBSERVACIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Para futuros trabajos sería un avance significativo desarrollar el proceso de optimización con diferentes tipos de algoritmos, mostrando que tan eficaces y eficientes pueden llegar a ser los algoritmos, abordando este tipo de problemas de optimización estructural.

Para futuros trabajos sería un avance significativo desarrollar el proceso de optimización y se evalúe la influencia que tiene considerar como variables relacionadas como la geometría de la estructura (citando los valores de A y B de la programación desarrollada en el trabajo), en el proceso de optimización.

BIBLIOGRAFIA

ASCE and SEI, "ASCE Manual and Reports on Engineering Practice No. 74 - Guideline for Electrical Transmission Line Structural Loading." 2009.

ASCE, "Design of Latticed Steel Transmission Structures 10-15." 2015.

B. White, "Some destructive mechanisms activated by galloping conductors," in Report No. A79 106-6 IEEE WPM, New York, USA, 1979.

C. P. Pantelides and S. R. Tzan, "Optimal design of dynamically constrained structures," Comput. Struct., vol. 62, no. 1, pp. 141–149, 1997.

Computers and Structures Inc., "Sap2000." 2016.

Couceiro, J. París, S. Martínez, I. Colominas, F. Navarrina, and M. Casteleiro, "Structural optimization of lattice steel transmission towers," Eng. Struct., vol. 117, pp. 274–286, 2016.

D. E. C. Vargas, A. C. C. Lemonge, H. J. C. Barbosa, and H. S. Bernardino, "Um algoritmo baseado em evolução diferencial para problemas de otimização estrutural multiobjetivo com restrições," Rev. Int. Metod. Numer. para Calc. y Disen. en Ing., vol. 32, no. 2, pp. 91–99, 2016.

Diaz, F. Glover, H. m. Ghaziri, M. Laguna, P. Moscato, and F. T. Tseng, Optimización heurística y redes neuronales. Madrid, España: Editorial Paraninfo, 1996.

EPRI, "Transmission Line Reference Book." Palo alto, Cal, pp. 1–625, 1979.

F. Ahmed, K. Deb, and B. Bhattacharya, "Structural topology optimization using multi-objective genetic algorithm with constructive solid geometry representation," Appl. Soft Comput. J., vol. 39, pp. 240–250, 2016.

F. Holland, Transmission Line Design Manual. Denver, Co: United States Department of the Interior, Water and Power Resource Service, 1980.

García Serrano, INTELIGENCIA ARTIFICIAL Fundamentos, práctica y aplicaciones, Primera. Madrid, España: RC libros, 2012.

H. Hofmeyer and J. M. Davila Delgado, "Automated design studies: Topology versusOne-Step Evolutionary Structural Optimisation," Adv. Eng. Informatics, vol. 27, no.4, pp. 427–443, 2013.

IEEE, National Electrical Safety Code C2-2007. New York, USA, 2007.

J. S. Arora, Introduction to Optimum Design, Second. Oxford, UK: Elsevier, 2004. J. S. Arora, Introduction to Optimun Design, Third. Oxford, UK: Elsevier, 2012.

J. Sheppard and A. C. Parlmer, "Optimal Desing of Transmission Towers by Dinamic Programming," Comput. Struct., vol. 2, pp. 455–468, 1972.

K. Anjo, S. Yamasaki, Y. Matsubayashi, Y. Nakayama, A. Otsuki, and T. Fujimura, "An experimental study of bundle conductor galloping on the Kasatori-Yama test line for bulk power transmission.," in CIGRE 25h session, Vol.1., 1974, pp. 22-04.

M. A. Baenziger, S. Gupta, T. J. Wipf, F. Fanous, Y. H. Hahm, and H. B. White, "Structural failure analysis of 345 kV transmission line, and disucssion by B. White," in SM 441-6 PWRD, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1993. M. A. Baenziger, W. D. James, L. Li, and H. B. White, "Dynamic loads on transmission line structures due to galloping conductors, and discussion by B. White," WM 078-6 PWRD. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1993.

M. Casteleiro, J. París, S. Martinez, F. Navarrina, and I. Colominas, "Optimización estructural de torres de alta tensión," Asoc. Argentina Mecánica Comput., vol. XXIX, pp. 15–18, 2010.

M. J. Box, "A New Method of Constrained Optimization and a Comparison With Other Methods," Comput. J., vol. 8, no. 1, pp. 42–52, 1965.

MathWorks and Cleve Moler, "Matlab." 2016.

Min. Ambiente, "Reglamiento colombiano de construccion sismo resistente - NSR 10." Bogotá D.C., 2010.

O. Hasançebi, T. Teke, and O. Pekcan, "A bat-inspired algorithm for structural optimization," Comput. Struct., vol. 128, pp. 77–90, 2013.

Oktay, H. U. Akay, and O. T. Sehitoglu, "Three-dimensional structural topology optimization of aerial vehicles under aerodynamic loads," Comput. Fluids, vol. 92, pp. 225–232, 2014.

P. J. Freeman, Electric Power Engineering Handbook, Second. Boca Raton, Florida, USA: Taylor & Francis, 2006.

P. P. Cruz, Inteligencia Artificial con aplicaciones a la ingenieria, First. Mexico DF: Alfaomega, 2010.

Pay, "Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado," vol. 22, pp. 241–259, 2006.

R. Martí, "Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria," Dep. d'Estadística i Investig. Oper., pp. 1–60, 2001.

Rahami, "Truss Analysis." Teheran, Iran, 2007.

Rural Electrification Administration (REA), "Design Manual For High Voltage Transmission Lines," in Rural Electrification Administration Bulletin 62-I, United States Department of Agriculture, Washington, D.C., 1980.

S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and V. M. P., "Optimization by Simulated Annealing," vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 2007.

S. Madsen, N. P. Lange, L. Giuliani, G. Jomaas, B. S. Lazarov, and O. Sigmund, "Topology optimization for simplified structural fire safety," Eng. Struct., vol. 124, pp. 333–343, 2016.

S. Richardson, Longitudinal dynamic loading of steel pole transmission lines. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1986.

Scodeggio, G. Quaranta, G. C. Marano, G. Monti, and R. B. Fleischman, "Optimization of force-limiting seismic devices connecting structural subsystems," Comput. Struct., vol. 162, pp. 16–27, 2016.

Tort, S. Şahin, and O. Hasançebi, "Optimum design of steel lattice transmission line towers using simulated annealing and PLS-TOWER," Comput. Struct., vol. 179, pp. 75–94, 2017.

V. Rao, "Optimum designs for transmission line towers," Comput. Struct., vol. 57, no. 1, pp. 81–92, 1995.

V. S. Almeida, H. L. Simonetti, and F. De Assis Das Neves, "Seleção de topologias ótimas de estruturas elásticas 2D com restrição de tensão -via smooth evolutionary structural optimization," Rev. Int. Metod. Numer. para Calc. y Disen. en Ing., vol. 30, no. 2, pp. 69–76, 2014.

W. Hare, J. Nutini, and S. Tesfamariam, "A survey of non-gradient optimization methods in structural engineering," Adv. Eng. Softw., vol. 59, pp. 19–28, 2013.

Y. Zhang and C. Mueller, "Shear wall layout optimization for conceptual design of tall buildings," Eng. Struct., vol. 140, pp. 225–240, 2017.

ANEXOS

"Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la base de datos de la Biblioteca UIS"

- Anexo A. Modelo-Optimizacion-554
- Anexo B. Modelo-Optimización-Inv
- Anexo C. Modelo-Optimización-Mod