



**DISEÑO BASADO EN CONFIABILIDAD DE UNA  
ESTRUCTURA DE TELECOMUNICACIONES TIPO  
MONOPOLO**

**TESIS**

**PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. DAVID JOAQUIN DELGADO HERNANDEZ**

**PRESENTA:**

**VICTOR MANUEL ROCHA GUERRERO**

**TOLUCA, MEXICO, FEBRERO DE 2023**

# Resumen

Los monopolos hoy en día son estructuras muy recurrentes en la industria de las telecomunicaciones. Son estructuras que pueden autoportarse, es decir que no son necesarias las retenidas para viento que suelen usarse en estructuras de esta industria y que requieren un área más grande para su instalación. En este trabajo se desarrolla una metodología para realizar el análisis de incertidumbre de los monopolos. Donde se hace una muestra de 65 monopolos de distintas localidades de la república mexicana, la idea consiste en construir un modelo, que permita conocer propuestas de diseño más eficientes.

Como toda estructura, el monopocho corre el riesgo de una falla, para eso necesita de un diseño estructural y verificar que su eficiencia se comporte de manera favorable según reglamentación correspondiente (AWS y LRFD), de lo contrario su fabricación no procede.

Se hace el análisis de un diseño basado en confiabilidad, usando una red bayesiana que modela el proceso de diseño de un monopocho. El objetivo es que este método analice la incertidumbre de diseño usando variables para encontrar diseños válidos bajo una perspectiva de confiabilidad.

**Palabras clave:** monopolos, viento, instalación, análisis de incertidumbre, muestra, república mexicana, clientes, estructura, eficiencia, redes bayesianas, incertidumbre.

# Índice general

<b>Índice General</b>	<b>I</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>III</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>IV</b>
<b>1. DISEÑO DE PROYECTO</b>	<b>1</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA . . . . .	1
1.2. JUSTIFICACIÓN . . . . .	1
1.3. HIPÓTESIS . . . . .	2
1.4. OBJETIVO GENERAL . . . . .	3
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	3
1.6. METODOLOGÍA . . . . .	3
<b>2. ANÁLISIS BASADO EN CONFIABILIDAD</b>	<b>5</b>
2.1. REDES BAYESIANAS . . . . .	5
2.1.1. TIPOS DE REDES BAYESIANAS . . . . .	6
2.1.2. APLICACIONES DE LAS REDES BAYESIANAS EN LA ACTUALI- DAD . . . . .	6
2.2. ANÁLISIS BASADO DE LA CONFIABILIDAD. . . . .	7
2.3. LOS ORÍGENES Y LAS FUNCIONES DEL ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD:	8
2.3.1. Función de Densidad de Probabilidad (PDF): . . . . .	10
2.3.2. Función de Densidad Acumulativa (CDF): . . . . .	10
2.4. PRÁCTICA ACTUAL DEL ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD . . . . .	11
2.5. DISEÑO BASADO EN CONFIABILIDAD. . . . .	13
<b>3. ASPECTOS GENERALES DEL MONOPOLO</b>	<b>17</b>
3.1. DEFINICIÓN DE MONOPOLO . . . . .	17

3.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS MONOPOLOS . . . . .	19
<b>4. DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MONOPOLO</b>	<b>23</b>
4.1. PROCESO DE DISEÑO DEL MONOPOLO. . . . .	23
4.1.1. Geometría y pendiente del monopolo. . . . .	24
4.1.2. Geometría del monopolo en el software Staad Pro ®. . . . .	26
4.1.3. Carga de análisis (pesos). . . . .	29
4.1.4. Parámetros de entrada. . . . .	35
4.1.5. Cargas de viento. . . . .	42
4.1.6. Cargas de sismo. . . . .	46
4.1.7. Eficiencia estructural. . . . .	49
<b>5. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE CON EN EL PROGRAMA UNINET LIGHT-TWIST SOFTWARE</b>	<b>50</b>
5.1. UNINET LIGHT-TWIST SOFTWARE. . . . .	50
5.2. REDES BAYESIANAS CON EL SOFTWARE UNINET. . . . .	53
5.2.1. Ensamble de la red bayesiana en UNINET: . . . . .	53
5.2.2. Elementos de uso para el análisis de confiabilidad: . . . . .	55
5.3. ANÁLISIS PDF Y CDF EN UNINET. . . . .	66
5.3.1. Analytical Conditioning: . . . . .	66
5.4. OPTIMIZACIÓN DE LAS REDES BAYESIANAS EN LOS MONOPOLOS. .	72
5.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS. . . . .	72
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>73</b>
<b>GLOSARIO DE TERMINOS</b>	<b>74</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>86</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>95</b>

# Índice de figuras

2.1. Función de densidad de probabilidad (PDF) de la resistencia de un monopolo. . . . .	13
2.2. La falla ocurre en la región de superposición donde la carga $Q >$ Resistencia R. . . . .	14
3.1. Coeficiente de arrastre para formas geométricas: (a) Flujo supercrítico; (b) Variación del coeficiente cambiando dirección del viento. . . . .	18
3.2. Comportamiento mecánico del monopolo . . . . .	19
3.3. Monopolos en operación . . . . .	20
3.4. Solución tipo troncocónica . . . . .	21
4.1. Diagrama de flujo del proceso de un monopolo . . . . .	24
4.2. Elementos iniciales Staad Pro . . . . .	26
4.3. Coordenadas Staad Pro . . . . .	26
4.4. Miembros Incidentes . . . . .	27
4.5. Cuerpo de un monopolo que se modela como viga en Staad Pro . . . . .	27
4.6. Definición del material . . . . .	27
4.7. Geometría de la propuesta, diámetros internos y externos . . . . .	28
4.8. Espesor de pared . . . . .	29
4.9. Peso propio . . . . .	29
4.10. Peso de accesorios . . . . .	30
4.11. Frecuencia natural en las direcciones x, y & z . . . . .	35
4.12. Exposición del viento . . . . .	36
4.13. Alturas y nodos de los accesorios . . . . .	42
4.14. Cargas de viento en el cuerpo . . . . .	43
4.15. Viento de resistencia . . . . .	44
4.16. Viento de operación . . . . .	45
4.17. Combinaciones . . . . .	46
4.18. Espectro sísmico . . . . .	47
4.19. Condiciones de la carga de sismo . . . . .	48

4.20. Eficiencia estructural . . . . .	49
5.1. Nodos padre-hijo . . . . .	51
5.2. Red bayesiana . . . . .	52
5.3. Ensamble de la red . . . . .	53
5.4. Red completa de análisis . . . . .	54
5.5. Altura de análisis . . . . .	55
5.6. Nodos reglamento . . . . .	55
5.7. Red de distribución CFE . . . . .	56
5.8. Redes reglamento CFE . . . . .	57
5.9. Red de carga viento en el cuerpo del monopolo . . . . .	61
5.10. Pesos del monopolo . . . . .	63
5.11. Aceleraciones sísmicas . . . . .	63
5.12. Fuerza de viento en accesorios . . . . .	64
5.13. Red eficiencia, combinación diseño y espesores . . . . .	65
5.14. Diseño . . . . .	67
5.15. Peso Cuerpo Diseño 5 . . . . .	67
5.16. Eficiencia-Diseño 5 . . . . .	68
5.17. Histograma nuevo diseño 13 . . . . .	68
5.18. Peso Cuerpo Diseño 13 . . . . .	69
5.19. Eficiencia-Diseño 13 . . . . .	69
5.20. Histograma nuevo diseño 15 . . . . .	70
5.21. Peso Cuerpo Diseño 15 . . . . .	70
5.22. Histograma nuevo diseño 16 . . . . .	71
5.23. Peso Cuerpo Diseño 16 . . . . .	71
5.24. Altura de la torre monopolo . . . . .	74
5.25. Estructura del monopolo: a) Pendiente del monopolo, b) Diámetros externos e internos y espesor del monopolo . . . . .	78
5.26. Fuerza de viento en el cuerpo del monopolo . . . . .	79
5.27. Frecuencia natural . . . . .	80
5.28. Mapas de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 200 años. . . . .	82
5.29. Altura de análisis . . . . .	83
5.30. Torre Monopolo . . . . .	85

# Índice de tablas

4.1. Propuesta de geometría y espesor de placa del monopolo . . . . .	25
4.2. Entrada de accesorios . . . . .	31
4.3. Peso de soporte y los accesorios . . . . .	31
4.4. Identificar nodos . . . . .	32
4.5. Traslape . . . . .	33
4.6. Peso escalera y feeders . . . . .	34
5.1. Zona sísmica . . . . .	76
5.2. Tipo de Suelo . . . . .	76
5.3. Zona sísmica-Tipo de Suelo . . . . .	77
5.4. Reglamento . . . . .	77
5.5. Nomenclatura de los espesores . . . . .	81
5.6. Los valores de $\bar{b}$ y $\alpha'$ para cada categoría de terreno . . . . .	82
5.7. Valores de las constantes para obtener el índice de turbulencia . . . . .	82
5.8. Nomenclatura cliente . . . . .	84

# INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la civilización, el ser humano se ha visto en la necesidad de comunicarse con los demás. Dicha necesidad lo ha llevado a desarrollar innumerables técnicas de comunicación, partiendo de los métodos más rudimentarios, como la inclusión de jeroglíficos (3000 a. C.) y las señales de humo (150 a. C.), hasta evolucionar con la invención del telégrafo (1836), el teléfono (1860) y la radio (1907). Considerando actualmente la influencia de la globalización y las necesidades crecientes de la humanidad por establecer normas de comunicación estable, global que permitan acceder con facilidad a una comunicación más rápida, clara, confiable, se puede mencionar la importancia del fenómeno de las telecomunicaciones. Como el internet, las computadoras, la televisión, las plataformas y los teléfonos celulares, los cuales basan su funcionamiento en antenas de transmisión de datos y señales de manera inalámbrica. Por lo cual el presente trabajo tiene como finalidad el análisis de incertidumbre a través de las redes bayesianas del diseño de estas estructuras. Derivado de la proliferación de la industria de las telecomunicaciones se han propuesto tres soluciones para estas necesidades:

1. Torre autoportada.
2. Torre arriostrada.
3. Monopolo.

Las primeras dos exigen un área importante en caso de tratarse de estructuras superiores a los 60 m de altura. Más aún, la solución autoportada exige la experiencia del personal de montaje para su correcto funcionamiento.

La solución tipo monopolo exige un área pequeña, y un montaje menos demandante. Básicamente se trata de una columna esbelta generalmente de acero, que es capaz de soportar las antenas y sus cargas derivadas de exposición al viento y zona sísmica donde se ubiquen.

La aparición de la inferencia bayesiana dio inicio a una revolución estadística que involucra el resurgimiento de la teoría bayesiana. Es así como el uso de la metodología bayesiana es de progresivo interés, y aceptación en distintas áreas. La descripción general de las redes bayesianas y sus aplicaciones están en el análisis de incertidumbre del software UNINET (ref. en [1]).

En este aspecto, el presente trabajo está ilustrado con ejemplos de aplicación práctica con elementos bayesianos. Ya que los métodos bayesianos se han generalizado particularmente por que es útil para la solución de problemas en la toma de decisiones. La utilidad de estos métodos consiste básicamente en el uso de situaciones en las que existe información limitada acerca de un gran número de variables o cuando la información proviene de diferentes fuentes. Los modelos bayesianos primordialmente incorporan conocimiento previo para poder estimar modelos útiles dentro de un espacio muestral y de este modo poder estimar parámetros que provengan de la experiencia o de una teoría probabilística. La estadística bayesiana provee cantidades tanto conocidas como desconocidas lo que permite incorporar los datos conocidos dentro de la estimación de los parámetros dados inicialmente, logrando así un proceso de estimación más rico en información haciendo inferencias sobre las cantidades desconocidas. Todos los modelos bayesianos tienen en común la asignación de la probabilidad como medida de creencia de una hipótesis, así es que, la inferencia es un proceso de reajuste de medidas de creencia al conocerse nuevos axiomas. En específico las redes bayesianas se actualizan cuando nueva información se les incluye.

# Capítulo 1

## DISEÑO DE PROYECTO

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las torres de telecomunicaciones son estructuras delgadas, con características estructurales de bajo amortiguamiento y flexibles, lo que las hace realmente vulnerables a las acciones dinámicas, como el viento y el sismo. Uno de los problemas principales del diseño de estas torres radica en el uso de conceptos de mecánica de fluidos, dinámica estructural, entre otros. Lo que los hace susceptibles a un análisis estructural deficiente. Para darle una mayor eficacia al diseño del monopolo a través de las redes bayesianas, para ahorrar costos de diseño, dándole un sentido más práctico, así como para evitar el error humano al momento de calcular las cargas a través de los programas STAAD.Pro V8i (SELECTseries 4), UNINET y las diferentes herramientas de software (ref. en [7] y [1]).

### 1.2. JUSTIFICACIÓN

Desde el siglo XIX, debido al fenómeno de la revolución industrial, las estructuras metálicas se hicieron presentes en el desarrollo de las civilizaciones, permitiendo crear infraestructuras para diferentes necesidades (puentes, viaductos, torres, etc.). Con base en esto, las torres de celosía evolucionaron con la necesidad de soportar antenas de transmisión para diferentes medios de comunicación. La industria de las telecomunicaciones hoy en día demanda el diseño y construcción de estructuras sismorresistentes y capaces de soportar las cargas del viento. Para ello se requiere el empleo de datos actualizados y aproximados a las condiciones de carga en sitio. Por tanto, las herramientas computacionales surgen como un medio para que las empresas de este sector se mantengan competitivas. En especial el diseño basado en confiabilidad es de uso común, dada su flexibilidad, al considerar las incertidumbres propias de las estructuras instala-

das. Por tanto, un modelo que considere la incertidumbre y que además permita su actualización cuando la nueva evidencia esté disponible, es deseable para representar ahorros en una empresa encargada de esta tarea.

De nuevo, las Redes Bayesianas permiten estas dos condiciones y pueden resultar adecuadas dado su entorno gráfico para representarlas. Los reglamentos de diseño por viento y sismo en México involucran variables de tipo continuo y discreto, por lo que una red del tipo híbrido resultaría adecuada para la modelación de estas incertidumbres. La estructura del monopolo será analizada con carga de sismo y de viento. Llegado el momento, una empresa de este giro requiere de los parámetros iniciales de diseño, si estos son introducidos en la red bayesiana permitirían propagar la evidencia y actualizar las distribuciones de las variables de salida (diámetros y espesores de placa). Reduciendo el proceso de prueba y error de un diseño convencional.

Las Redes Bayesianas permiten modelar de una manera compacta y conjunta un problema, sino se hace esto se recurren a las técnicas de simulación como Monte Carlo (ref. en [2]). A través de la simulación se pueden resolver desde problemas muy sencillos a muy complejos. Sin embargo, la mayoría requieren el uso de programas informáticos como Excel, R Studio o Matlab. Sin estos programas, resolver determinados problemas llevaría más tiempo. Las Redes Bayesianas en vez de analizar cada variable de manera individual permiten analizar la probabilidad conjunta, es decir incluyendo todas las variables para que se respete todo el modelo real y tenga resultados más precisos (ref. en [5]). De igual manera, con ellas se analiza la incertidumbre de un modelo. La gran mayoría de los reglamentos de diseño de estructuras de ingeniería civil están basados en estos análisis (ref. en [14]). El fin de la estadística, específicamente de la estadística Bayesiana, es suministrar una metodología para estudiar adecuadamente la información mediante análisis de datos y decidir de manera acertada sobre la mejor forma de actuar. Los modelos bayesianos incorporan conocimiento previo para poder estimar modelos útiles dentro de un espacio muestral y de este modo poder estimar parámetros que provengan de la experiencia o de una teoría probabilística.

### 1.3. HIPÓTESIS

El tiempo de diseño de un monopolo se puede reducir en un 20% cuando se emplea un modelo de red bayesiana en contraste con las prácticas actuales basadas en los manuales de CFE del año 1993 y CFE 2008 (ref. [18], [6], [19], [21] y [4]). Siguiendo este diseño de confiabilidad que permitiera llegar a diseños de menor peso estructural. Por lo cual se obtendrán límites de exclusión para las distribuciones del proceso de diseño y excedencia para el problema.

## 1.4. OBJETIVO GENERAL

Diseñar una estructura de tipo monopolio basado en el criterio de confiabilidad, mediante las redes bayesianas.

## 1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Establecer un modelo de dependencia del tipo red bayesiana para representar el proceso de diseño de una estructura tipo monopolio.
2. Construir una base de datos de diseño de estructuras tipo monopolio.
3. Vaciado de resultados para así clasificarlos y desarrollarlos a través del software de UNINET.
4. Definición de límites de excedencia para las variables que involucra el diseño.
5. Comparar un diseño convencional con uno basado en confiabilidad.

## 1.6. METODOLOGÍA

De acuerdo a la naturaleza del estudio de la investigación, reúne por su nivel las características un estudio descriptivo, explicativo y correlacionado. A su vez se emplearon los siguientes métodos que se describen a continuación:

- **Análisis:** El estudio de incertidumbre de las redes bayesianas del monopolio.
- **Síntesis:** El análisis del muestreo de los datos estadísticos del diseño estructural del monopolio.
- **Deductivo:** El método a emplearse contiene la característica que es de fácil uso y es de carácter completo, ya que emplea un análisis de confiabilidad, debido a que este último usa diversas conexiones gráficas de probabilidad conjunta. Que nos facilitara su distribución al momento de hacer una muestra con las redes bayesianas.
- **Inductivo:** Se encontrarán límites de exclusión y excedencia para las variables involucradas en el diseño, haciendo uso de criterios de la teoría de las distribuciones de probabilidad.

- **Descriptivo:** A través de un sistema práctico y eficaz, de carácter no lineal, entre otros. Ya que por medio de las redes bayesianas que son híbridas se podrá describir de forma grafica y con probabilidad conjunta las variables para el muestreo estadístico del diseño del monopolio.
- **Estadístico:** Uso de datos del diseño estructural en excel; para comprobar sus eficiencia y su desarrollo a través del software de UNINET (ref. en [1]).
- **Probabilista:** Se hará a través del diseño basado en la teoría de confiabilidad, siguiendo los principios de estructuras similares. El modelo de dependencia que se construirá a través de las, llamadas redes bayesianas.

## Capítulo 2

# ANÁLISIS BASADO EN CONFIABILIDAD

### 2.1. REDES BAYESIANAS

También conocida como red de creencia, es una herramienta informática a la cual puede crearse diferentes modelos, dependiendo del caso de estudio según la concepción que se tenga y de las condiciones del comportamiento de las variables. De igual manera es un modelo probabilístico multivariado que relaciona un conjunto de variables aleatorias mediante un grafo dirigido que indica explícitamente influencia causal. Gracias a que pueden modelar problemas de incertidumbre, se pueden aplicar para procesos donde se involucran variables aleatorias como el diseño estructural. Las redes bayesianas (ref. en [17] y [26]) son una representación compacta de una distribución de probabilidad multivariada. Formalmente, una red Bayesiana es un gráfico acíclico dirigido, donde cada nodo representa una variable aleatoria y las dependencias entre variables.

En la red bayesiana (ref. en [9]) hay una distribución condicional de los padres de esa probabilidad de cada nodo, de modo que la distribución conjunta tiene en cuenta el producto de las distribuciones condicionales asociadas con los nodos de la red. A su vez las redes Bayesianas generalmente consideran variables discretas o nominales; entonces éstas deben ser discretizadas antes de construir el modelo. Aunque existen modelos de redes bayesianas con variables continuas, estas variables están limitadas a las relaciones gaussianas y lineales. Cabe hacer mención que las redes bayesianas modelan un fenómeno mediante un conjunto de variables y las relaciones de dependencia entre ellas. Dado que este modelo, nos permite hacer inferencia bayesiana; es decir, estimar la probabilidad posterior de las variables no conocidas, en base a las variables conocidas. Estos modelos pueden tener diversas aplicaciones, para clasificación, predicción,

diagnostico, etc. Además, pueden dar información interesante en cuanto a como se relacionan las variables del dominio, las cuales pueden ser interpretadas en ocasiones como relaciones de causa–efecto por tal razón los modelos inicialmente eran contruidos a mano basandose en un conocimiento experto, pero en los últimos años se han desarrollado diversas técnicas para aprender a partir de datos estadísticos, probabilísticos y de análisis estructural. Las redes bayesianas están basadas en una representación gráfica de dependencias para razonamiento probabilístico, en la cual los nodos representan variables aleatorias y los arcos representan relaciones de dependencia directa entre las variables.

### **2.1.1. TIPOS DE REDES BAYESIANAS**

Las Redes Bayesianas continuas son:

1. Aquellas que tienen un número infinito de posibles valores. En este tipo de redes resulta complicado determinar explícitamente las probabilidades condicionadas para cada valor de las variables, así que las probabilidades condicionadas se representan mediante una función de probabilidad. La mayoría de las variables reales son de carácter continuo. Una red Bayesiana cuyas variables sean todas continuas y estén todas representadas mediante funciones normales lineales, tiene una distribución normal multivariada.
2. Redes Bayesianas Dinámicas: En la exposición de procesos que contienen una variable aleatoria en cada intervalo de tiempo. El proceso que se está estudiando puede entenderse como una serie de procesos en un instante de tiempo. El estado de las variables se representa en un lapso de tiempo para poder representar los procesos dinámicos conocidos dentro de la red bayesiana. Las probabilidades condicionales de este modelo no cambian con el tiempo. Es decir, se repite las etapas temporales y las relaciones entre dichas etapas. La inferencia en una red bayesiana dinámica es la misma que para una red bayesiana, y por esto se emplean los mismos métodos. Esta inferencia resulta mediante la reproducción de los intervalos de tiempo, hasta que la red sea lo suficiente larga para captar todas las observaciones.

### **2.1.2. APLICACIONES DE LAS REDES BAYESIANAS EN LA ACTUALIDAD**

La utilización de las redes bayesianas ha sido muy difundida a lo largo de la historia moderna, de la ingeniería civil y en los diferentes campos como en la manipulación de sistemas, debido a la depuración de programas de inteligencia artificial, en la genética, en procesos de producción;

todos estos enfocados a la solución de problemas y en la identificación de probabilidades que disminuyan riesgo, como es el uso primordial que se le da en la rama financiera. El uso que se le da a la red bayesiana en el estudio y tratamiento de datos, consiste básicamente con mejorar el esquema de prevención de riesgo operacional; tal que sirva como sistema de ayuda a la toma de decisiones en una situación de emergencia y realizar mejoras en las estrategias de operacionales. Las redes bayesianas como herramienta de gestión de riesgo son de suma importancia para el gremio financiero debido a sus grandes aportes en la definición de condiciones probabilísticas de inferencia, con un amplio manejo de variables.

Las redes bayesianas son utilizadas para representar el conocimiento en métodos de razonamiento, explotación de información, análisis de los deudores del sistema financiero y predicción de ventas; basados en la teoría de la probabilidad, tal que se pueda predecir el valor de las variables no observadas y explicar los resultados arrojados de las variables observadas. El uso de las redes bayesianas permiten aprender sobre relaciones de dependencia y combinar conocimiento con nuevos datos. Y en el tema a desarrollar es una herramienta fundamental para obtener variables que forman parte de un modelo de probabilidad conjunta y con ello analizar las respectivas distribuciones probabilísticas del diseño de monopolio a través del programa UNINET.

## 2.2. ANÁLISIS BASADO DE LA CONFIABILIDAD.

Es la permanencia de la calidad de los productos (o servicios) a lo largo del tiempo. Capacidad de desarrollar adecuadamente su labor a lo largo del tiempo. La confiabilidad también es la característica de un dispositivo expresada por la probabilidad de que un dispositivo cumpla una función requerida en las condiciones de utilización y para un período de tiempo determinado.

El análisis basado en confiabilidad es un proceso basado en el análisis estadístico del tiempo para poder determinar las fallas a través del cálculo y nos permite evitar fallas de muestras de una prueba estadística basada en datos para cualquier disciplina (ref. [25]).

**PROBABILIDAD:** Es la relación número de casos favorables número de casos posibles asociada a un tiempo  $t$ . Se denomina  $R(t) = P(\text{cumplir una misión}) = P(\text{buen funcionamiento})$ . La probabilidad es una medida de la certidumbre asociada a un suceso o evento futuro y suele expresarse con un número entre 0 y 1 (0-100%).

**ESTADÍSTICA:** Es el estudio y aplicación de los métodos y procedimientos estadísticos para recoger, clasificar, resumir, hallar regularidades y analizar los datos, siempre y cuando la variabilidad y la incertidumbre sea una causa intrínseca de los mismos. El objetivo es explorar los

datos y realizar inferencias con la información disponible para comprender los procesos que generan los datos, ayudar a tomar decisiones y realizar predicciones. La exploración, descripción y análisis se limita al conjunto de datos observado mediante resúmenes numéricos y gráficos de la frecuencia.

Por otra parte, la inferencia extiende las conclusiones del estudio al proceso generador de la información mediante el uso de modelos probabilísticos o estocásticos. Además de ser el conjunto de métodos y técnicas que permiten a través de la información empírica obtenida proporcionar una muestra que sea correcta para obtener las conclusiones basadas en datos experimentales e información subjetiva tales como la inferencia bayesiana. El objetivo de la inferencia estadística y la inferencia bayesiana es evaluar la incertidumbre mediante la probabilidad y la estadística.

### **2.3. LOS ORÍGENES Y LAS FUNCIONES DEL ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD:**

La confiabilidad intenta garantizar que el producto permanecerá en buenas condiciones durante un periodo razonable de tiempo. Según las definiciones se tiene que pensar muy claramente qué significa:

- Funcionamiento satisfactorio.
- Tiempo de funcionamiento (Misión).
- Condiciones de funcionamiento.

La necesidad de la confiabilidad desde un punto de vista puramente económico, es deseable una alta confiabilidad para reducir los costos totales del producto. El hecho de que en algunos sistemas militares el costo anual de mantenimiento sea diez veces el costo original del mismo, pone de manifiesto esta necesidad (ciclo vida). También hay que considerar el aspecto de seguridad (el fallo de un sistema ABS en un automóvil puede ser catastrófico). Existen otros aspectos como retrasos de horarios, incomodidades, insatisfacción del cliente y pérdida de prestigio del fabricante. Cada vez son más las empresas y organismos que en sus contrataciones exigen ciertas normas de confiabilidad (ref. [22]).

La perspectiva histórica de la teoría de la confiabilidad nos habla de los inicios del análisis de confiabilidad en la sociedad:

Sus orígenes:

- Estudios para poder evaluar la mortalidad derivada de las epidemias.

- Compañías de seguros, para determinar los riesgos de sus pólizas de seguro de vida.
- Tablas de vida: La primera tabla de vida data de 1693 y es debida a Edmund Halley ya que se utilizaban los métodos actuariales tanto para estimar la supervivencia de pacientes sometidos a distintos tratamientos como para estudiar la confiabilidad de equipamientos, en particular de los ferrocarriles.

Siglo XX:

- En 1939 Waloddi Weibull, cuando era profesor del Royal Institute of Technology en Suecia, propuso una distribución para describir la duración de materiales, que más tarde llevaría su nombre.
- En 1951 Epstein y Sobel empezaron a trabajar con la distribución exponencial como modelo probabilístico para estudiar el tiempo de vida de dispositivos.

Para conocer los posibles ejemplos que podemos ver en el análisis de la confiabilidad:

- En la industria los equipos y sistemas crecen en complejidad.
- Existen mayores exigencias a la eficiencia de los costos del ciclo de vida útil de las máquinas de producción.
- Cada fabricante intenta llegar al objetivo de calidad exigido por el mercado al mínimo costo posible.

El objetivo de la Confiabilidad y Mantenibilidad desde el diseño existe la necesidad de entregar equipos o sistemas que tengan las prestaciones deseadas por el Cliente y que además sean Confiables, de fácil mantenimiento y con funcionamiento seguro y económico durante su vida útil.

La Teoría de la Confiabilidad incorpora la incertidumbre a la ingeniería, es decir que la certeza de un hecho (en nuestro contexto de falla del Monopolo) y también es un acontecimiento determinista con un resultado finito. En cambio la incertidumbre de un hecho sería un acontecimiento indeterminista con un resultado probabilístico.

La confiabilidad es la probabilidad de que un aparato, dispositivo o persona desarrolle una determinada función bajo condiciones fijadas durante un periodo de tiempo determinado. También que un elemento puede ser caracterizada a través de distintos modelos de probabilidades, que podamos describir varias distribuciones de fallas comunes y de ellas gestionar los recursos de mantenimiento. Así convirtiendo el conocimiento ganado de ellas en acciones *proactivas* de Mantenimiento y aplicarlas en el Diseño.

Las Herramientas de Confiabilidad estudian el análisis estadístico de datos de supervivencia, ISO (*Internacional Organization for Standardization*) define confiabilidad como la probabilidad de que un componente o sistema, desarrolle durante un periodo de tiempo dado, la tarea que tiene encomendada sin fallos, y en las condiciones establecidas. La Confiabilidad estudia duraciones de procesos que es común en muchas ciencias:

- Duración de un componente (Confiabilidad).
- Supervivencia de un paciente a un tratamiento (Medicina).
- Duración del desempleo (Economía).
- Edad de las personas (Demografía y sociología).

### **2.3.1. Función de Densidad de Probabilidad (PDF):**

La función de densidad de probabilidad (PROBABILITY DENSITY FUNCTION o PDF, por sus siglas en inglés) es una expresión estadística que define una distribución de probabilidad (la probabilidad de un resultado) para una variable aleatoria continua. La diferencia entre una variable aleatoria discreta es que se puede identificar un valor exacto de la variable. Cuando el PDF se representa gráficamente, el área debajo de la curva indicará el intervalo en el que caerá la variable. El área total en este intervalo de la gráfica es igual a la probabilidad de que ocurra una variable aleatoria discreta.

Los PDF se utilizan para medir la probabilidad de un valor en particular, por lo general se representan en un gráfico ver figura 2.1, con una curva de distribución normal que indica un riesgo neutral, y una distribución en cada extremo que indica mayor o menor riesgo / ganancia. Una distribución en el lado derecho de la curva sugiere una mayor ganancia, pero con menor probabilidad, mientras que una distribución a la izquierda indica un menor riesgo y una menor ganancia. Los ingenieros utilizan los PDF como una de las muchas herramientas para calcular el riesgo/ganancia general en sus proyectos.

### **2.3.2. Función de Densidad Acumulativa (CDF):**

La función de densidad acumulativa (CUMULATIVE DENSITY FUNCTION o CDF, por sus siglas en inglés) calcula la probabilidad acumulada para un valor  $x$  dado. La CDF se utiliza para determinar la probabilidad de que una observación aleatoria que se toma de la población

sea menor o igual que un determinado valor. También puede utilizar esta información para determinar la probabilidad de que una observación sea mayor que un determinado valor o entre dos valores, ver figura 2.2.

## 2.4. PRÁCTICA ACTUAL DEL ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD

El deseo de lograr confiabilidades estructurales más consistentes en todos los materiales fue el ímpetu para el desarrollo de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles llamado ASCE 74 (ref. [20]) de las "Directrices para la carga estructural de líneas de transmisión" (ASCE 1991, ref. [20]) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), los "Criterios de diseño de líneas aéreas de transmisión", llamadas IEC 60826 ( IEC 2002). A pesar de que el manual de ASCE 74 (ref. [20]); ofrece métodos consistentes para calcular cargas, todavía es necesario proporcionar métodos consistentes para calcular la resistencia a través de los materiales de los que estan hechos los monopolos (ref. [12]).

En cuanto a la resistencia nominal ( $R_n$ ), de un monopolo se calcula utilizando una variedad de enfoques y guías dependiendo del tipo de material del monopolo. Esta incluye por ejemplo: el Manual de la ASCE 72 (ref. [27]) para monopolos de acero (ASCE 1990, ref. [27]), ANSI O5.1-2002 (ref. [3]), en cuanto para los monopolos de madera existe la (ANSI 2002, ref.[3]), y el Instituto de Concreto Prefabricado / Pretensado (PCI), que se encuentra en la "Guía de especificación para monopolos de concreto pretensado" (PCI 1999). A su vez el manual ASCE 104 de la "Práctica recomendada para productos de polímeros reforzados con fibra para estructuras de líneas aéreas de servicios públicos". Por lo cual recientemente se ha desarrollado para los monopolos de polímero reforzado con fibra un Manual llamado (FRP) (ASCE 2003, ref. [16]) , ref. [12].

Además de estas guías, los fabricantes de monopolos suelen utilizar modelos internos para predecir la resistencia nominal de monopolos de concreto pretensado y de FRP (Fiber Reinforced Polymer/Polímero reforzado con fibra). Estas guías de resistencia, estándares de métodos internos han evolucionado esencialmente de manera independiente, por lo que hay poca consistencia en la definición de resistencia nominal en los materiales de los monopolos. Para algunos materiales de monopolos y métodos de diseño, el valor de resistencia nominal está cerca de una resistencia media, mientras que para otros materiales de monopolos la resistencia nominal representa un valor más conservador, como un límite de exclusión inferior (lím inf) / lower exclusion limit (LEL) del 5% o 10%. Como resultado, actualmente existe una amplia gama de posibilidades con respecto a lo que realmente representa la resistencia nominal de un monopolo.

Esto da como resultado niveles de confiabilidad inconsistentes y desconocidos para diferentes materiales de monopolos (ref. [12]).

Para ilustrar el problema antes mencionado, se construye la fig. 2.1. Y como resultado nos infiere que la resistencia lateral en una prueba en voladizo de un monopolo de madera de Clase 1, es una variable aleatoria resultado de probar 100 monopolos idénticos de la misma manera dará como resultado 100 valores diferentes de resistencia. Las muchas fuentes de incertidumbre en la resistencia del monopolo observada incluyen la variabilidad inherente de las propiedades del material, la variabilidad geométrica, los efectos de fabricación y la variación en el método de prueba. Dan como resultado que la resistencia de un monopolo puede caracterizarse por una función de densidad de probabilidad (PDF) con un valor medio ( $m$ ) y un coeficiente de variación (COV), como se muestra en la figura 2.1. El COV (la desviación estándar dividida por la media) varía de acuerdo al material del monopolo y el tipo de monopolo. El COV es más alto, por ejemplo, para monopolos de madera que para monopolos de acero. El COV más alto hace que la PDF (función de densidad de probabilidad) de los monopolos de madera sea más ancha y plana que la de los monopolos de acero. El procedimiento utilizado para calcular la resistencia nominal o característica del monopolo (ya sea por Manual de ASCE 72, ref. [27] o ANSI O5.1-2002 ref. [3]) produce una resistencia nominal  $R_n$  que cae en algún lugar del eje horizontal del PDF en la fig. 2.1 y ref. [12].

La figura 2.1 muestra tres posibles posiciones de la resistencia nominal:  $R_n = R_1, R_5, \text{ y } R_{50}$ , representando un 1%, 5% y 50% LEL, respectivamente. Por ejemplo, una fuerza nominal del 5% LEL (un percentil 5) es un valor que es logrado por el 5% de los monopolos. Para una función de densidad normal, el quinto percentil está en 1.645 desviaciones estándar por debajo de la media, ver la ecuación 2.1 y la figura 2.1:

$$R_5 = m - 1.645(m * COV) \quad (2.1)$$

Un 50% LEL o una resistencia nominal del percentil 50; es un valor no alcanzado por el 50% de los monopolos. Para una función de densidad normal se requiere que la resistencia  $R_{50}$ , es también la fuerza media que resulta de  $R_{50} > R_5 > R_1$  y la distancia entre estos valores crece con el aumento de los COV. Que claramente se observa a través de los métodos de diseño de resistencia para diferentes materiales de monopolos producen definiciones de valor nominal consistentes por ejemplo, en que todos los materiales al 5% LEL, tuviera un error en el método de confiabilidad y que los materiales empleados fueran defectuosos, ref. [12].



dad o factores de seguridad parciales a los valores de diseño medios o nominales). La distancia entre las medias de las dos curvas ( $M_R - M_Q$ ), medido en número de desviaciones estándar de ( $R - Q$ ), se conoce como el índice de confiabilidad (figura 2.2), ref. [12].

$$\beta = \frac{(M_R - M_Q)}{(\sigma_R^2 + \sigma_Q^2)^{0.5}} \quad (2.2)$$

El cálculo del índice de confiabilidad en la ecuación 2.2 y la figura 2.2 son válidas solo cuando ambos R y Q están normalmente distribuidos y no correlacionados, ver ref. [12].

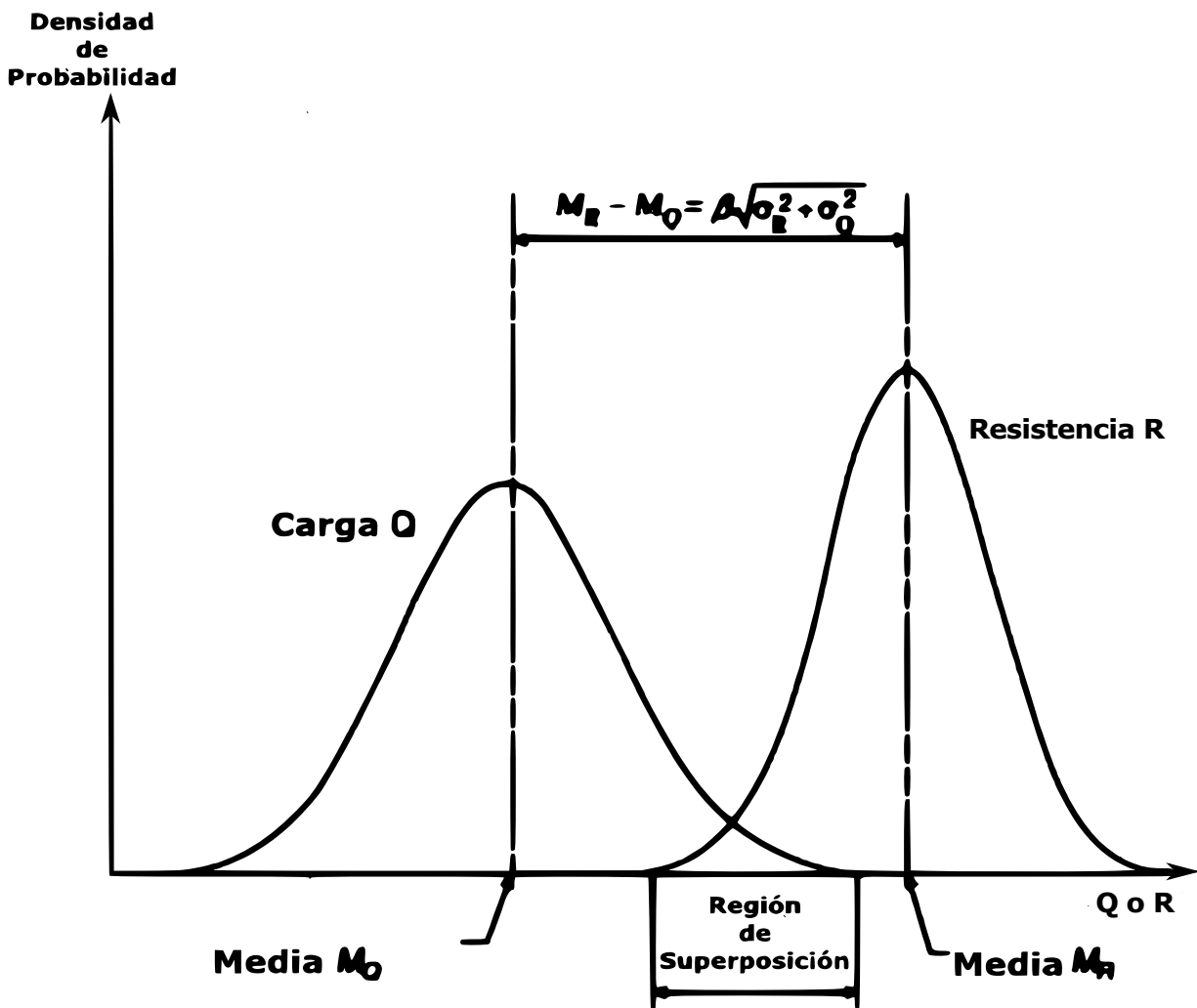


Figura 2.2: La falla ocurre en la región de superposición donde la carga  $Q >$  Resistencia  $R$ .

En este caso, el índice de confiabilidad  $\beta$  y la probabilidad de falla se relacionan de la siguiente manera en la ecuación 2.3:

$$\text{Probabilidad de falla} = 1 - \phi(\beta), \quad (2.3)$$

En el cual  $\phi$  es la función de densidad acumulativa (CDF) de la distribución normal. Índices de confiabilidad más grandes  $\beta$  significan más distancia entre las dos curvas en la figura 2.2 y una menor probabilidad de falla. Componentes con índices de confiabilidad equivalentes  $\beta$  tienen probabilidades de falla relativamente equivalentes, ref. [12].

El RBD (Diseño Basado en Confiabilidad o Reliability Based Design por sus siglas en inglés), los factores de carga y resistencia (también llamados factores de seguridad parciales), se seleccionan para que los componentes tengan índices de confiabilidad relativamente equivalentes  $\beta$  (ref. [13]). Los índices de confiabilidad objetivo para diseños convencionales generalmente se seleccionan mediante calibración de confiabilidad. Los métodos RBD para líneas de transmisión se describen en "Criterios de diseño de líneas aéreas de transmisión", IEC 60826 (IEC 2002), "Diseño basado en la confiabilidad de estructuras de líneas de transmisión" (ref. [28]) y "Diseño basado en confiabilidad de cimientos para estructuras de líneas de transmisión" (ref. [30]). Estos documentos proporcionan referencias y detalles adicionales para realizar evaluaciones de confiabilidad estructural, incluidos cálculos de índices de confiabilidad, calibraciones de confiabilidad de nuevos métodos de RBD y metodologías de diseño de factores de carga y resistencia (LRFD) [12].

Este enfoque RBD está calibrado para producir niveles de confiabilidad promedio consistentes con años de historia y práctica con enfoques de diseño deterministas existentes (ref. [12]).

Esta metodología se esfuerza por corregir el problema de confiabilidad inconsistente entre diferentes tipos de materiales. Se recomiendan niveles mínimos de confiabilidad para diferentes grados de construcción. La simple selección de diferentes períodos de retorno en el diseño de la línea T / D (Transmisión/Distribución) varía cuantificablemente los niveles de confiabilidad. El método utiliza un conjunto de carga y factores de carga independientemente del tipo de material. Los factores de reducción de la resistencia dependen del tipo de material; las ecuaciones se basan en la resistencia inicial antes de que ocurra la degradación del material, ref. [12].

Al describir cargas en un sistema de línea T / D, es conveniente distinguir entre los eventos que producen las cargas y las cargas resultantes en los componentes de los subsistemas. Las cargas son fuerzas directas sobre los conductores, cables de tierra o estructuras. Los eventos que producen las cargas se pueden clasificar como eventos relacionados con el clima, accidentales y

de construcción y mantenimiento (C&M), ref. [12].

Los valores nominales de diseño se especifican normalmente en un reglamento o agenda de carga de tal manera que su riesgo de superarlo es relativamente bajo. Un valor nominal que se utiliza con frecuencia es el valor de la variable que tiene la probabilidad  $1 / PR$  de superarse en un año. Se dice que dicho valor tiene un período de retorno de años PR. El subíndice PR indica aquí un valor nominal para un evento meteorológico o una carga con un período de retorno de año PR. Por ejemplo, una velocidad del viento PR de 50 años,  $V_{50}$ , tiene una probabilidad de 0.02 (2%) de ser excedido en cualquier año, ver figura 5.28 y ref. [12].

Dado que existe una relación directa entre los eventos meteorológicos y efectos de carga correspondientes, el efecto de carga de un evento relacionado con el clima con un período de retorno del año PR también tiene un período de retorno del año PR, diseñar ecuaciones que constituyen el requisito de confiabilidad utilizada para eventos relacionados con el clima y las cargas correspondientes con un PR especificado como eventos y cargas nominales.

## Capítulo 3

# ASPECTOS GENERALES DEL MONOPOLO

### 3.1. DEFINICIÓN DE MONOPOLO

Son postes conicos huecos que pueden ser contruidos de diversos materiales como acero galvanizado, pudiendo tener una altura hasta de 60 metros de alto. También se les conoce como antenas de trasmisión de frecuencia que sirven para la señal de radio, telefonía, electricidad, internet, cuyo uso es indispensable para la ingeniería.

Los monopolos son estructuras con elementos mecánicos que trabajan a flexión y que contiene equipos de electricidad o de telecomunicaciones. El modelo de estas estructuras para este trabajo se limitará a una viga de 41 nodos y 40 elementos a flexión del tipo barra con un atributo de (DIS) diámetro interno superior y (DII) diámetro interno inferior con posible espesor de pared (3/16", 1/4", 5/16", 3/8", 1/2", 5/8", 3/4" y 7/8") según la práctica de la industria nacional. Para entender la geometría del monopolo (pendiente, diámetros y espesores) observar la figura 5.25b.

El monopolo es una estructura conformada por dos partes, el cuerpo de la torre y la parte superior donde se instalan los accesorios. El cuerpo o monopolo está compuesto por varias secciones dependiendo de la altura total de la estructura. Se caracteriza por ser de forma tubular o con secciones cercanas a esta forma ideales para brindar estética en lugares y conveniencia aerodinámica donde se requiera.

Su modelado mecánico es una viga en voladizo, con cargas puntuales (pesos, viento, sismo) o distribuidas; aplicadas lateralmente o en el eje axial ver figura 3.2. Al seleccionar esta solución se tienen ciertas ventajas, entre las que destacan:

- Área de colocación reducida

- Montaje en menor tiempo, tomando como referencia la solución autosoportada
- Estructura que se modela de una manera simple ver figura 3.2
- Tiempos de construcción y montaje reducidos

Sin embargo, algunas de sus desventajas son:

- Solución inviable económicamente en alturas mayores a 60 metros.
- Aspectos técnicos de manufactura (soldadura, continuidad, uniformidad, etc)
- Calidad en fabricación

También existen estructuras de este tipo de concreto, dado que es un material más barato y rígido lo que permite menores deflexiones y giros. La lógica detrás del uso de una sección circular radica en dos razones, como la carga predominante es la de viento, esta forma permite que el coeficiente de arrastre sea cercano a 0.5 ver sub-figura (a) 3.1a en un flujo supercrítico; que es hasta tres veces menor que los coeficientes para la forma triangular y rectangular, ver la sub-figura (b) 3.1b:

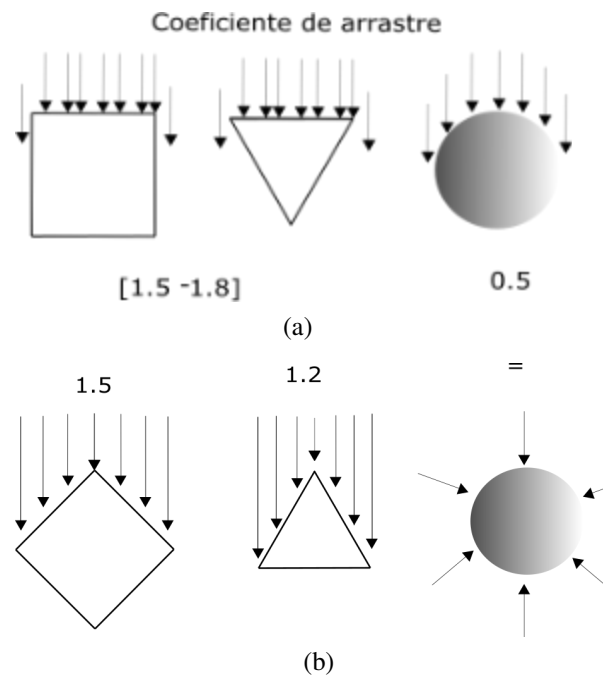


Figura 3.1: Coeficiente de arrastre para formas geométricas: (a) Flujo supercrítico; (b) Variación del coeficiente cambiando dirección del viento.

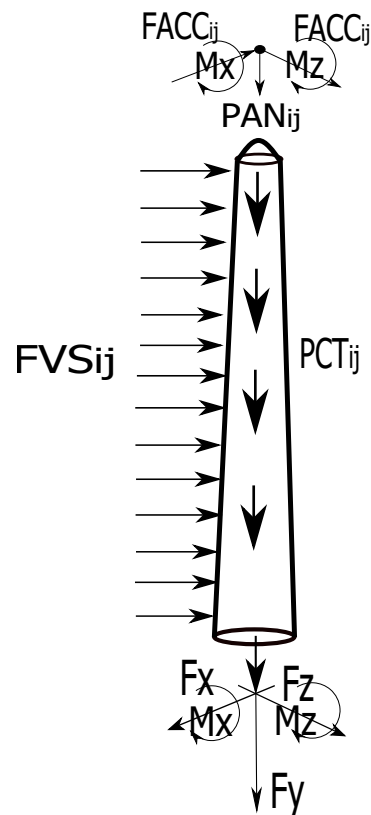


Figura 3.2: Comportamiento mecánico del monopolo

En la figura 3.2 el cuerpo es modelado como una viga, en el programa estructural se divide en 41 nodos y 40 elementos, una carga distribuida en el cuerpo (FVS) que representa la carga lateral debida al viento.

Un peso propio que se descompone en 40 elementos, una fuerza lateral en accesorio (antena, rru, herrajes, parábola)  $F_{ACCij}$ , el peso de esos accesorios  $PANij$  (carga nodal hacia abajo) y el PCT como el peso del cuerpo del monopolo como una carga en el programa estructural, ver figura 3.2.

## 3.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS MONOPOLOS

Cada monopolo es fabricado con su respectiva escalera de acceso, escalerillas de guía de onda, línea de vida y su correspondiente plataforma. Estas estructuras surgen para la industria de energía eléctrica, así como la transmisión de señales en los teléfonos celulares. Existen diversos elementos que estas torres deben soportar, como antenas de transmisión y equipos para teleco-

municaciones, entre otros. La mayoría de los monopolos son ligeros, por lo que en su diseño influye mucho los esfuerzos que genera el viento y pesan menos que las autosoprtadas o arriostradas, los sismos son movimientos telúricos que afectan a este tipo de estructuras, sobretodo en un análisis dinámico. Para determinar la localización de estas antenas y su altura, para que funcionen correctamente, se deberá contar con la ayuda de departamentos de Radiofrecuencia y Transmisión.

Los monopolos se conforman por diversos accesorios como son antenas RF, soporte de antena, camuflaje bandera, ramas pino, RRU, parábolas, pararrayos y remate torre. El monopolo en la actualidad es muy utilizado para resolver problemas como de radio frecuencia, el cableado electrónico, la señal de telefonía, sobre todo desde islas o costas donde no existe una señal viable.

En la figura 3.3 muestra los tipos de monopolo en su estado físico tanto en el cuerpo como en sus accesorios, pueden nombrarse troncocónico y bridado.



(a) Solución tipo troncocónica



(b) Solución bridada

Figura 3.3: Monopolos en operación

En la práctica los diámetros en la base de una estructura de este tipo oscila entre 0.8-1.8 m. En virtud de que el manejo de diámetros superiores a 36" o mayor es por pedido especial en la república mexicana, la unión de placas longitudinalmente ha conducido a la solución del tipo troncocónico ver figura3.4.

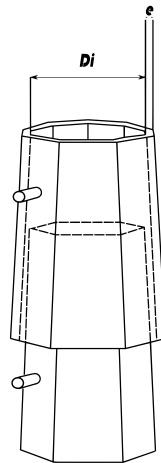


Figura 3.4: Solución tipo troncocónica

Ahora bien, en lo que se refiere a las cargas primordiales a las que está sujeta una estructura de este tipo son dinámicas de naturaleza, y se tiene que las más significativas son viento y sismo. Existe una reglamentación vigente para cada una del año 1993 y su actualización en 2008 elaborados por la CFE.

En la práctica actual de la industria mexicana se exige el CFE 93 y 2008 para viento y para el sismo un análisis dinámico espectral en CFE 93, cabe mencionar que existe reglamentación del año 2015 pero la práctica de la industria aún no aprueba su uso. Por las exigencias actuales, el diseño de una estructura de este tipo requiere hacerse en el menor tiempo posible. Conduciendo así a la búsqueda de herramientas de optimización del diseño.

En las torres de comunicación monopolo, se realiza una inspección de calidad al 100% antes de salir de la fábrica, al igual que cualquier otro producto, como por ejemplo, tanques de almacenamiento, estructuras metálicas, barandas metálicas, entre otros. Todas la torres deben estar calificadas para su perfecto funcionamiento y que los usuarios puedan sentirse seguros, ver sección 2.3.

En este contexto, el diseño basado en confiabilidad es una herramienta que permite determinar las variables de diseño con ciertos límites de exclusión y excedencia. Ha venido siendo útil, por ejemplo, para el formato LRFD (Load and Resistance Factor Design) de la ASCE. Para efectuar un diseño de este tipo se requiere formular un modelo de incertidumbre, con parámetros de entrada, intermedios y de salida. Proponiendo escenarios de posibles estados de carga y estableciendo límites de exclusión para resistencias y cargas [12], así como de sus espesores, diámetros y pesos. Como parte de los requisitos del modelo, es necesario que represente de manera conjunta las interrelaciones estadísticas entre las variables y el comportamiento en los escenarios estudiados. En este sentido, las redes bayesianas son herramientas del campo de la

inteligencia artificial capaces de cumplir estos dos requerimientos [15]. Especialmente las redes bayesianas híbridas, que contienen variables discretas y continuas han resultado ser una solución interesante para evaluar estructuras civiles [23].

En algunas partes de latinoamérica aún no existe una norma especializada en torres monopo- lo a diferencia de México y la Unión Europea, en Estados Unidos de Norteamérica y Canadá; es por esto que su aplicación se vuelve de suma importancia para una correcta conducción energética y de telecomunicaciones entre otras, esta investigación desarrolla una guía de diseño estructural, partiendo de un análisis detallado de las estructuras e incertidumbre, utilizando normativa internacional aplicado a la CFE, para distintas condiciones geográficas y climáticas. El proceso de diseño consiste en utilizar el software STAAD PRO V8i (SELECTseries 4) especializado para determinar soluciones óptimas la geometría, pesos, frecuencia natural, eficiencia estructural, cargas por viento y cargas por sismo. A fin de implementar torres cuyos rangos de alturas estén comprendidos desde el más chico que es de 24 metros hasta el más alto de 60 metros.

## Capítulo 4

# DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MONOPOLO

### 4.1. PROCESO DE DISEÑO DEL MONOPOLO.

El proceso de diseño no constructivo del monopolo es para saber los pasos a seguir al momento de construir esta estructura. El primer paso es tener la ubicación del monopolo, la carga del cliente en sus accesorios y la altura del monopolo. Con los datos de entrada del monopolo son la velocidad regional de la ubicación seleccionada se estiman su categoría de terreno, su factor topográfico, la temperatura ambiental del lugar y su Altura sobre el nivel mar. Después se propone la geometría de la torre y también se estiman la zona sísmica de la región y el tipo de terreno.

Una vez hecho esto siguen los parámetros de entrada donde se dará relevancia la presión dinámica de base del monopolo porque esta estructura depende mucho de este análisis y las áreas expuestas. Una vez analizado los parámetros según el reglamento establecido se analizan las cargas por viento en el cuerpo de la estructura y sus accesorios, como también su análisis sísmico. Para saber si el diseño es satisfactorio o no, se analizan las barras de la estructura siendo su material acero, con el método LRFD (Diseño por Factores de Carga y Resistencia) o AWS (Allowable Stress por sus siglas en inglés/Esfuerzos Permisibles en español). Si el diseño es satisfactorio se finaliza el proceso y si no es satisfactorio se reinicia para una propuesta geométrica hasta que sea satisfactorio.

Para entender el proceso se muestra con un diagrama de flujo de la figura 4.1.

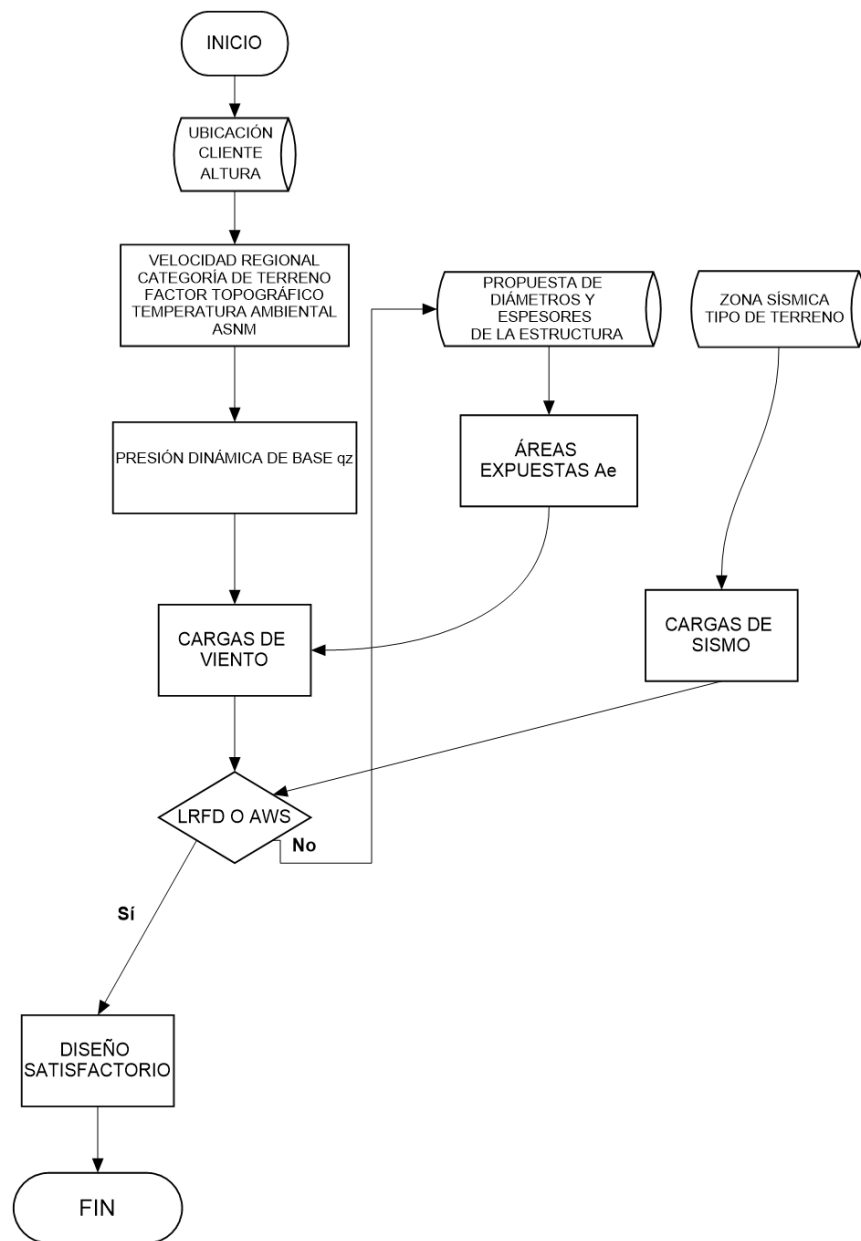


Figura 4.1: Diagrama de flujo del proceso de un monopolo

#### 4.1.1. Geometría y pendiente del monopolo.

Para empezar el proceso se escoge como ejemplo un diseño del monopolo. Comenzaremos a desarrollar el análisis estructural, para hacerlo se tendrá que proponer la pendiente y la geometría.

Para iniciar el análisis se procede hacer la propuesta de pendiente y diámetro inicial, ver figuras 3.4 y 5.25a. La geometría propuesta es la mostrada en la tabla 4.1.

En este caso se trata de un diámetro interno inferior de 1.40 m, la última celda de la quinta columna en la tabla 4.1. Después se propone la pendiente, el tramo inicial y se determina una geometría para llegar al diámetro interno superior, en este caso el diámetro es de 0.4835 m. Se ajusta el diámetro hasta que se alcance la geometría deseada, para este caso es con pendiente 0.8101.

DIÁMETRO EXTERNO	DIÁMETRO INTERNO	ESPEJOR (PLG)	EXTERNO (m)	INTERNO (m)
0.4835	0.5068	1/4	0.5068	0.4941
0.5068	0.5300	1/4	0.5300	0.5173
0.5300	0.5532	1/4	0.5532	0.5405
0.5532	0.5765	1/4	0.5765	0.5638
0.5765	0.5997	1/4	0.5997	0.5870
0.5997	0.6229	1/4	0.6229	0.6102
0.6229	0.6461	1/4	0.6461	0.6334
0.6461	0.6694	1/4	0.6694	0.6567
0.6694	0.6926	1/4	0.6926	0.6799
0.6926	0.7158	1/4	0.7158	0.7031
0.7158	0.7391	1/4	0.7391	0.7264
0.7391	0.7623	1/4	0.7623	0.7496
0.7623	0.7855	1/4	0.7855	0.7728
0.7855	0.8087	1/4	0.8087	0.7960
0.8087	0.8320	1/4	0.8320	0.8193
0.8320	0.8552	1/4	0.8552	0.8425
0.8552	0.8784	1/4	0.8784	0.8657
0.8784	0.9017	1/4	0.9017	0.8890
0.9017	0.9249	1/4	0.9249	0.9122
0.9249	0.9481	1/4	0.9481	0.9354
0.9481	0.9713	1/4	0.9713	0.9586
0.9713	0.9946	1/4	0.9946	0.9819
0.9946	1.0178	1/4	1.0178	1.0051
1.0178	1.0410	1/4	1.0410	1.0283
1.0410	1.0643	1/4	1.0643	1.0516
1.0643	1.0875	1/4	1.0875	1.0748
1.0875	1.1107	1/4	1.1107	1.0980
1.1107	1.1340	1/4	1.1340	1.1213
1.1340	1.1572	1/4	1.1572	1.1445
1.1572	1.1804	1/4	1.1804	1.1677
1.1804	1.2036	1/4	1.2036	1.1909
1.2036	1.2269	1/4	1.2269	1.2142
1.2269	1.2501	1/4	1.2501	1.2374
1.2501	1.2733	1/4	1.2733	1.2606
1.2733	1.2966	1/4	1.2966	1.2839
1.2966	1.3198	1/4	1.3198	1.3071
1.3198	1.3430	1/4	1.3430	1.3303
1.3430	1.3662	1/4	1.3662	1.3535
1.3662	1.3895	1/4	1.3895	1.3768
1.3895	1.4127	1/4	1.4127	1.4000

Tabla 4.1: Propuesta de geometría y espesor de placa del monopolo

## 4.1.2. Geometría del monopolo en el software Staad Pro ®.

### 4.1.2.1. Elementos Staad Pro:

Para empezar, se definen los elementos más fundamentales, en los programas de diseño estructural son los nodos. En el editor se definen sus coordenadas y las unidades utilizadas, ver figura 4.2.

```
5 INPUT WIDTH 79
6 UNIT METER KG
7 JOINT COORDINATES
```

Figura 4.2: Elementos iniciales Staad Pro

### 4.1.2.2. Coordenadas Staad Pro:

El primer comando sirve para señalar el ancho en que se codificará o procesará la solución, existen dos tamaños: el más usado 79 y el que es más ancho en 118 (ver figura 4.2). El segundo comando define las unidades en que se trabajara el modelo. El siguiente comando indica las coordenadas de los nodos. El formato que reconoce el programa es definiendo el número del elemento y sus coordenadas en las direcciones x, y, z; y separado por punto y coma. En este caso es un monopolo de 36 m, ver figura 4.3.

```
8 | 1 0 0 0; 2 0 0.9 0; 3 0 1.8 0; 4 0 2.7 0; 5 0 3.6 0; 6 0 4.5 0; 7 0 5.4 0;
9 | 8 0 6.3 0; 9 0 7.2 0; 10 0 8.1 0; 11 0 9 0; 12 0 9.9 0; 13 0 10.8 0;
10 | 14 0 11.7 0; 15 0 12.6 0; 16 0 13.5 0; 17 0 14.4 0; 18 0 15.3 0; 19 0 16.2 0;
11 | 20 0 17.1 0; 21 0 18 0; 22 0 18.9 0; 23 0 19.8 0; 24 0 20.7 0; 25 0 21.6 0;
12 | 26 0 22.5 0; 27 0 23.4 0; 28 0 24.3 0; 29 0 25.2 0; 30 0 26.1 0; 31 0 27 0;
13 | 32 0 27.9 0; 33 0 28.8 0; 34 0 29.7 0; 35 0 30.6 0; 36 0 31.5 0; 37 0 32.4 0;
14 | 38 0 33.3 0; 39 0 34.2 0; 40 0 35.1 0; 41 0 36 0;
```

Figura 4.3: Coordenadas Staad Pro

### 4.1.2.3. Miembros Incidentes:

Una vez que se definieron los nodos, se determinan las incidencias de los miembros que definirán la estructura; en este caso elementos del tipo barra. Es decir, el elemento n va del nodo x al nodo z. Se conserva una nomenclatura similar a la de la definición de los nodos. En este caso se definen 40 barras y 41 nodos, ver figura del editor de StaadPro 4.4 y una imagen real donde se puede ver el monopolo de la figura 4.5.

```

15 MEMBER INCIDENCES
16 1 1 2; 2 2 3; 3 3 4; 4 4 5; 5 5 6; 6 6 7; 7 7 8; 8 8 9; 9 9 10; 10 10 11;
17 11 11 12; 12 12 13; 13 13 14; 14 14 15; 15 15 16; 16 16 17; 17 17 18; 18 18 19;
18 19 19 20; 20 20 21; 21 21 22; 22 22 23; 23 23 24; 24 24 25; 25 25 26; 26 26 27;
19 27 27 28; 28 28 29; 29 29 30; 30 30 31; 31 31 32; 32 32 33; 33 33 34; 34 34 35;
20 35 35 36; 36 36 37; 37 37 38; 38 38 39; 39 39 40; 40 40 41;

```

Figura 4.4: Miembros Incidentes

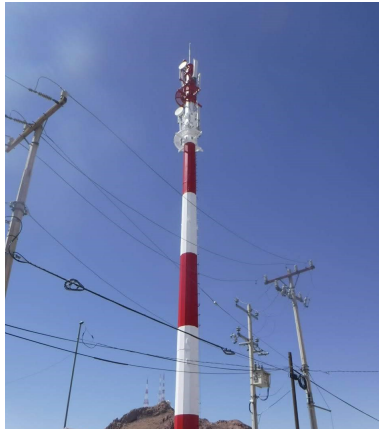


Figura 4.5: Cuerpo de un monopolo que se modela como viga en Staad Pro

#### 4.1.2.4. Definición del material y sus parámetros:

```

21 DEFINE MATERIAL START
22 ISOTROPIC STEEL
23 E 2.039e+010
24 POISSON 0.3
25 DENSITY 7833.41
26 ALPHA 1.2e-005
27 DAMP 0.03
28 END DEFINE MATERIAL

```

Figura 4.6: Definición del material

Se define el tipo de material que es un acero isotrópico, es decir que presenta las mismas propiedades mecánicas en todas las direcciones, ver figura 4.6. El módulo de elasticidad, la relación de Poisson que define como se deforma el material en la dirección ortogonal del esfuerzo (ref. [7][29]).

La densidad del material, el parámetro alpha se refiere al coeficiente de expansión térmica del material. El término damp se refiere al porcentaje de amortiguamiento para cada nodo, en caso de diseñar con un análisis dinámico.

Tanto como la definición de la geometría (longitud de barras y perfiles) dependen de la creatividad del diseñador.

*\*Ver las figuras 5.24 y 5.25a del glosario de términos donde se puede entender la geometría del monopolo.*

Esta geometría se anexa al modelo de Staad Pro ® en el modo de edición, copiando los valores de las celdas correspondientes de la hoja de cálculo (ver figura 4.7).

```

29  MEMBER PROPERTY AMERICAN
30  40 TABLE ST PIPE OD 0.506767108500092 ID 0.494067108500092
31  39 TABLE ST PIPE OD 0.529996124451372 ID 0.517296124451372
32  38 TABLE ST PIPE OD 0.553225140402652 ID 0.540525140402652
33  37 TABLE ST PIPE OD 0.576454156353932 ID 0.563754156353932
34  36 TABLE ST PIPE OD 0.599683172305212 ID 0.586983172305212
35  35 TABLE ST PIPE OD 0.622912188256492 ID 0.610212188256492
36  34 TABLE ST PIPE OD 0.646141204207772 ID 0.633441204207772
37  33 TABLE ST PIPE OD 0.669370220159052 ID 0.656670220159052
38  32 TABLE ST PIPE OD 0.692599236110332 ID 0.679899236110332
39  31 TABLE ST PIPE OD 0.715828252061612 ID 0.703128252061612
40  30 TABLE ST PIPE OD 0.739057268012892 ID 0.726357268012892
41  29 TABLE ST PIPE OD 0.762286283964172 ID 0.749586283964172
42  28 TABLE ST PIPE OD 0.785515299915452 ID 0.772815299915452
43  27 TABLE ST PIPE OD 0.808744315866732 ID 0.796044315866732
44  26 TABLE ST PIPE OD 0.831973331818012 ID 0.819273331818012
45  25 TABLE ST PIPE OD 0.855202347769292 ID 0.842502347769292
46  24 TABLE ST PIPE OD 0.878431363720572 ID 0.865731363720572
47  23 TABLE ST PIPE OD 0.901660379671852 ID 0.888960379671852
48  22 TABLE ST PIPE OD 0.924889395623132 ID 0.912189395623132
49  21 TABLE ST PIPE OD 0.948118411574412 ID 0.935418411574412
50  20 TABLE ST PIPE OD 0.971347427525692 ID 0.958647427525692
51  19 TABLE ST PIPE OD 0.994576443476972 ID 0.981876443476972
52  18 TABLE ST PIPE OD 1.01780545942825 ID 1.00510545942825
53  17 TABLE ST PIPE OD 1.04103447537953 ID 1.02833447537953
54  16 TABLE ST PIPE OD 1.06426349133081 ID 1.05156349133081
55  15 TABLE ST PIPE OD 1.08749250728209 ID 1.07479250728209
56  14 TABLE ST PIPE OD 1.11072152323337 ID 1.09802152323337
57  13 TABLE ST PIPE OD 1.13395053918465 ID 1.12125053918465
58  12 TABLE ST PIPE OD 1.15717955513593 ID 1.14447955513593
59  11 TABLE ST PIPE OD 1.18040857108721 ID 1.16770857108721
60  10 TABLE ST PIPE OD 1.20363758703849 ID 1.19093758703849
61  9 TABLE ST PIPE OD 1.22686660298977 ID 1.21416660298977
62  8 TABLE ST PIPE OD 1.25009561894105 ID 1.23739561894105
63  7 TABLE ST PIPE OD 1.27332463489233 ID 1.26062463489233
64  6 TABLE ST PIPE OD 1.29655365084361 ID 1.28385365084361
65  5 TABLE ST PIPE OD 1.31978266679489 ID 1.30708266679489
66  4 TABLE ST PIPE OD 1.34301168274617 ID 1.33031168274617
67  3 TABLE ST PIPE OD 1.36624069869745 ID 1.35354069869745
68  2 TABLE ST PIPE OD 1.38946971464873 ID 1.37676971464873
69  1 TABLE ST PIPE OD 1.41269873060001 ID 1.39999873060001

```

Figura 4.7: Geometría de la propuesta, diámetros internos y externos

Se puede observar en la figura del software las iniciales OD (OUTER DIAMETER/DIÁMETRO EXTERNO) e ID (INTERNAL DIAMETER/DIÁMETRO INTERNO) y se agrega como los 40 elementos de la geometría del monopolo, también hay espesores de pared donde en la figura 4.8 se puede ver como son las dimensiones del espesor de un monopolo:

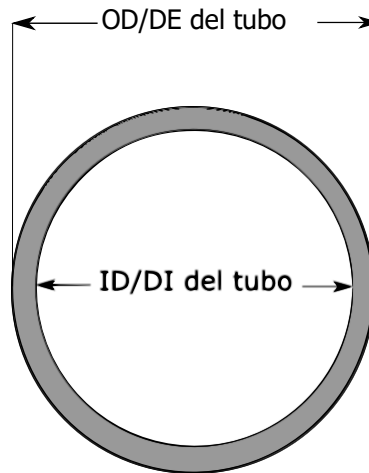


Figura 4.8: Espesor de pared

### 4.1.3. Carga de análisis (pesos).

- *Peso propio de la propuesta:* Después de ello, se define la carga por el peso de la propuesta y los accesorios que le corresponden. El comando selfweight indica que se considera el peso propio y el signo es negativo, ver figura 4.9 y PCTij de la figura 3.2.

```
74 | LOAD 1 PESO PROPIO
75 | SELFWEIGHT Y -1
76 | LOAD 2 CARGA MUERTA
```

Figura 4.9: Peso propio

- *Peso accesorios de la propuesta:* Se trata de una carga puntual repartida en los nodos. Dependiente de las líneas necesarias y el peso de cada una de ellas (que se obtiene del fabricante).

```

76  □ LOAD 2 CARGA MUERTA
77  □ JOINT LOAD
78  * PESO DE SOPORTE 4 ANTENAS RF
79  41 FY -600
80  * PESO DE SOPORTE 3 ANTENAS RF
81  36 FY -450
82  * PESO DE 12 RRU
83  41 FY -300
84  * PESO DE 9 RRU
85  36 FY -225
86  * PESO DE REMATE TORRE
87  41 FY -25
88  * PESO DE PARARRAYOS
89  41 FY -10
90  * PESO DE 12 ANTENA RF
91  41 FY -324
92  * PESO DE 1 PARÁBOLA 4'
93  39 FY -157
94  * PESO DE 9 ANTENA RF
95  36 FY -243
96  * PESO DE 1 PARÁBOLA 4'
97  39 FY -157
98  * PESO DE 1 PARÁBOLA 2'
99  39 FY -53.5
100 * PESO DE FEEDERS
101 2 TO 41 FY -6.847199999999998
102 * PESO DE ESCALERA
103 2 TO 41 FY -8.549999999999998
104 * PESO DE TRASLAPES
105 37 38 FY -50.6713
106 32 33 FY -60.8806
107 26 27 FY -73.1318
108 21 22 FY -83.3412
109 16 17 FY -93.5505
110 11 12 FY -103.7599
111 6 7 FY -113.9692

```

Figura 4.10: Peso de accesorios

Como se aprecia en la figura 4.10 hay 41 nodos, entre los cuales se repartirá la carga para la primera definición, tiene un signo negativo porque en el eje Y va hacia la parte negativa (hacia abajo) donde se aprecia el peso de los accesorios (soporte antenas, rru, remate torre, antenas y parabolos). Al cargar del nodo 2 al 41 (ver figura 4.10), se aprecia que son los pesos de la escalera y los feeders (líneas alimentadoras). Esto debido a que el nodo 1, no permite descansar estos accesorios. Ahondando en la carga de los nodos 2 al 41, es la de las líneas (cables) alimentadoras; dado que van desde el equipo puesto en tierra hasta las antenas.

Para calcular los pesos de accesorios, peso de feeders, peso de escalera y peso de traslapes debemos iniciar con los datos de entrada de accesorios como se muestra en la siguiente tabla 4.2:

CONCEPTO	PZAS	PESO (kg/pza)	ALTURA
SOPORTE 4 ANTENAS RF	3	200	36
SOPORTE 3 ANTENAS RF	3	150	31.5
RRU	12	25	36
RRU	9	25	31.5
REMATE TORRE	1	25	36
PARARRAYOS	1	10	36

CONCEPTO	CANTIDAD	PESO (kg)	ANGULO (°)	Ma (kg)	ALTURA (m)
ANTENA RF	12	27	0	0	36
PARÁBOLA 4'	1	157	0	0	33.75
ANTENA RF	9	27	0	0	31.5
PARÁBOLA 4'	1	157	90	87.37711956	33.75
PARÁBOLA 2'	1	53.5	0	0	33.75
LINEA 7/8"	ML	6	0.508	36	
LINEA 7/8"	ML	6	0.508	36	
LINEA 1/2"	ML	2	0.253	36	
LINEA 1/2"	ML	2	0.253	36	
LINEA 3/4"	ML	1	0.5	36	
ESCALERA	ML	1	9.5	36	

Tabla 4.2: Entrada de accesorios

La siguiente tabla 4.3 muestra el cálculo de soporte y accesorios que mostramos en la tabla anterior 4.2, para el cálculo de cada una de las celdas se necesita multiplicar la cantidad/pzas por el peso. La siguiente ecuación 4.1 se muestra un ejemplo de como se desarrolla cada celda:

$$SOPORTE\ 4\ ANTENAS\ RF = (3)(200) = 600\ kg \tag{4.1}$$

Concepto	Peso de soporte y accesorios	Altura de soportes y accesorios
SOPORTE 4 ANTENAS RF	600.00	36.00
SOPORTE 3 ANTENAS RF	450.00	31.50
RRU	300.00	36.00
RRU	225.00	31.50
REMATE TORRE	25.00	36.00
PARARRAYOS	10.00	36.00
ANTENA RF	324.00	36.00
PARÁBOLA 4'	157.00	33.75
ANTENA RF	243.00	31.50
PARÁBOLA 4'	157.00	33.75
PARÁBOLA 2'	53.50	33.75

Tabla 4.3: Peso de soporte y los accesorios

Para identificar los nodos en cada accesorio se necesita los siguientes datos: H (Altura total del monopolo), DIST/T (Distancia entre Tramo), Total nodos, Total miembros y la Altura total de los accesorios (Hacc) para calcular los nodos de cada accesorio mostrados de la figura anterior 4.3.

Se muestra un ejemplo de como calcular el primer nodo del accesorio (Soporte 4 Antenas RF) con la ecuación 4.2, después se identificará el nodo del accesorio con la ecuación 4.3, se redondea el nodo y el nodo N muestra el nodo donde se ubica el accesorio en el monopolo, por último se procede a llenar los demás accesorios como se muestra en la siguiente tabla 4.4:

$$\text{Calcular nodo} = \frac{(H - H_{acc})}{DIST/T} = \frac{(36 - 36)}{0.9} = \text{Nodo } 0, \quad (4.2)$$

$$\text{Identificar nodo} = \text{Total nodos} - \text{calcular nodo} = \text{Nodo } 41 - \text{Nodo } 0 = \text{Nodo } 41. \quad (4.3)$$

Concepto	Calcular nodo	Identificar nodo	Redondeo	Nodo N
SOPORTE 4 ANTENAS RF	0	41	41	NODO 41
SOPORTE 3 ANTENAS RF	5	36	36	NODO 36
RRU	0	41	41	NODO 41
RRU	5	36	36	NODO 36
REMATE TORRE	0	41	41	NODO 41
PARARRAYOS	0	41	41	NODO 41
ANTENA RF	0	41	41	NODO 41
PARÁBOLA 4'	3	39	39	NODO 39
ANTENA RF	5	36	36	NODO 36
PARÁBOLA 4'	3	39	39	NODO 39
PARÁBOLA 2'	3	39	39	NODO 39

Tabla 4.4: Identificar nodos

\*Nótese que H y DIST/T son números fijos y el Hacc depende cada accesorio en el monopolo.

Lo siguiente es identificar los nodos de los traslapes (figura 3.4), una vez identificados se procede a calcular y se tiene como referencia la tabla 4.1.

Para calcular los traslapes seguiremos una ecuación 4.4 y sus resultados en la tabla 4.5:

$$\text{Traslape (37-38)} = \frac{((\text{Espesor} * 0.0254) * (\Pi * \text{Externo}) * (\text{DIST}/T * 1.25) * (7833.41))}{2} \quad (4.4)$$

$$\text{Traslape (37-38)} = 50.6713 \text{ kg}$$

Donde:

El espesor está en pulgadas (plg),

0.0254 es para convertir el espesor a metros (m),

$\Pi = 3.14159265359$ ,

Externo es el diámetro interno del tramo escogido donde el traslape 37-38 es 0.5765 m, el traslape 32-33 es 0.6926 m, el traslape 26-27 es 0.8320 m, el traslape 21-22 es 0.9481 m, el traslape 16-17 es 1.0643 m, el traslape 11-12 es 1.1804 m y el traslape 6-7 es 1.2966 m,

$\text{DIST}/T = 36 \text{ m}/40 \text{ barras del monopolo} = 0.9 \text{ m}$ ,

1.25 es el 25 % de la longitud y

$7833.41 \text{ kg/m}^3$  es el peso volumétrico del acero.

TRASLAPES	ALTURA	REDONDEO
37 38	50.67126631	50.6713
32 33	60.88060941	60.8806
26 27	73.13182114	73.1318
21 22	83.34116424	83.3412
16 17	93.55050735	93.5505
11 12	103.7598505	103.7599
6 7	113.9691936	113.9692

Tabla 4.5: Traslape

Y para calcular el peso de escalera y feeders se tiene como referencia los datos de la tabla 4.2, por lo cual se usarán las siguientes ecuaciones 4.5 y 4.6:

$$\text{Peso feeders (LINEA 7/8")} = \frac{(\text{Cantidad}) * (\text{Peso}) * (\text{Altura})}{\text{Total Miembros}} = \frac{(6) * (0.508) * (36)}{40} = 2.7432 \text{ kg}, \quad (4.5)$$

$$\text{Peso escalera} = \frac{(\text{Cantidad}) * (\text{Peso}) * (\text{Altura})}{\text{Total Miembros}} = \frac{(1) * (9.5) * (36)}{40} = 8.55 \text{ kg}. \quad (4.6)$$

Concepto	Definición de Concepto	Total Feeders
FEEDERS	LINEA 7/8"	2.7432
FEEDERS	LINEA 7/8"	2.7432
FEEDERS	LINEA 1/2"	0.4554
FEEDERS	LINEA 1/2"	0.4554
FEEDERS	LINEA 3/4"	0.45
<b>Total</b>		<b>6.8472</b>

Concepto	Definición de Concepto	Total Escalera
ESCALERA	ESCALERA	8.55
<b>Total</b>		<b>8.55</b>

Tabla 4.6: Peso escalera y feeders

Con la tabla anterior 4.6 se observan los resultados de los feeders y escalera, es un peso repartido en la longitud y luego lo dividimos entre los nodos, ver figura 4.10.

### 4.1.4. Parámetros de entrada.

Cargas de viento:

Los parámetros necesarios para estimar esta carga, bajo el reglamento CFE 93 son:

VR (Velocidad regional)= 120 km/h

CT (Categoría de terreno según rugosidad)= 2

FT (Factor de topografía local)= 1.2

Temperatura ambiental= 13.7 °C

ASNM= 2628 m

Primero se determina el peso de los accesorios y el modelo de staad en la segunda carga, carga muerta (ver figura 4.10). Si no se cuentan con datos de los pesos de los accesorios, dependerá del cliente para replicar sus requerimientos. Después de colocar los pesos de los accesorios se llena la carga número 4, que consiste en el cálculo de la frecuencia natural de la estructura. Es el resultado de colocar el peso de los accesorios en las tres direcciones de análisis. Como se observa en la figura 4.11 en las direcciones Fx, Fy & Fz, se replican los estimados de peso para el cálculo de la frecuencia natural, de la cual depende la estimación de las cargas de viento. El valor de la frecuencia natural de la estructura es de 0.60736 Hertz (Hz).

116	LOAD 4 CALCULO DE LA FRECUENCIA NATURAL	142	41 FY 600	163	41 FZ 600
117	SELFWEIGHT X 1	143	36 FY 450	164	36 FZ 450
118	SELFWEIGHT Y 1	144	41 FY 300	165	41 FZ 300
119	SELFWEIGHT Z 1	145	36 FY 225	166	36 FZ 225
120	JOINT LOAD	146	41 FY 25	167	41 FZ 25
121	41 FX 600	147	41 FY 10	168	41 FZ 10
122	36 FX 450	148	41 FY 324	169	41 FZ 324
123	41 FX 300	149	39 FY 157	170	39 FZ 157
124	36 FX 225	150	36 FY 243	171	36 FZ 243
125	41 FX 25	151	39 FY 157	172	39 FZ 157
126	41 FX 10	152	39 FY 53.5	173	39 FZ 53.5
127	41 FX 324	153	2 TO 41 FY 6.847199999999998	174	2 TO 41 FZ 6.847199999999998
128	39 FX 157	154	2 TO 41 FY 8.549999999999998	175	2 TO 41 FZ 8.549999999999998
129	36 FX 243	155	37 38 FY 50.6713	176	37 38 FZ 50.6713
130	39 FX 157	156	32 33 FY 60.8806	177	32 33 FZ 60.8806
131	39 FX 53.5	157	26 27 FY 73.1318	178	26 27 FZ 73.1318
132	2 TO 41 FX 6.847199999999998	158	21 22 FY 83.3412	179	21 22 FZ 83.3412
133	2 TO 41 FX 8.549999999999998	159	16 17 FY 93.5505	180	16 17 FZ 93.5505
134	37 38 FX 50.6713	160	11 12 FY 103.7599	181	11 12 FZ 103.7599
135	32 33 FX 60.8806	161	6 7 FY 113.9692	182	6 7 FZ 113.9692
136	26 27 FX 73.1318				
137	21 22 FX 83.3412				
138	16 17 FX 93.5505				
139	11 12 FX 103.7599				
140	6 7 FX 113.9692				

Figura 4.11: Frecuencia natural en las direcciones x, y & z

- Exposición del viento:

Dado que para la carga de viento se requieren las áreas y las formas (redondas, planas) de la propuesta a evaluar y retomando lo comentado en el apartado longitudes y perfiles se determinan las áreas expuestas. Es muy importante mencionar que se tiene que definir como es que se colocara la exposición al viento. Para este caso se analizarán los dos esquemas mostrados en las sub-figuras 3.1a y 3.1b y también en la figura 4.12.

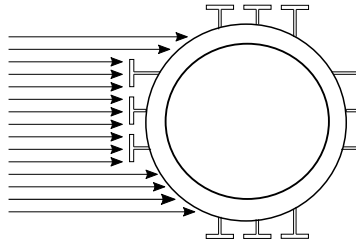


Figura 4.12: Exposición del viento

- Áreas expuestas:

Se calculan las siguientes áreas de los accesorios y antenas colocadas. En el caso de las antenas será a través de una práctica común para las empresas de telecomunicaciones mexicanas. Se calcularán áreas expuestas para los accesorios del monopolo y sus ecuaciones son las siguientes; 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12:

$$Atotp1 = \text{Soporte 4 Antenas} * Aep1 = 3pzas * 0.85m^2 / Pza = 2.55 m^2, \quad (4.7)$$

$$Atotp2 = \text{Soporte 3 Antenas} * Aep2 = 3pzas * 0.85m^2 / Pza = 2.55 m^2, \quad (4.8)$$

$$Atotp3 = 12 RRU * Aep3 = 12pzas * 0.063m^2 / Pza = 0.76 m^2, \quad (4.9)$$

$$Atotp4 = 9 RRU * Aep4 = 9pzas * 0.063m^2 / Pza = 0.57 m^2, \quad (4.10)$$

$$Atotp5 = \text{Remate Torre} * Aep5 = 1pza * 0.12m^2 / Pza = 0.12 m^2, \quad (4.11)$$

$$Atotp6 = \text{Pararrayos} * Aep6 = 1pza * 0.06m^2 / Pza = 0.06 m^2. \quad (4.12)$$

■ *Cálculo de los parámetros CFE 93:*

En este apartado se realizan los cálculos de los parámetros del CFE 93 para el análisis de la carga de viento. Para este análisis necesitamos seguir criterios en base al reglamento, obtener las fuerzas de viento en los accesorios y el cuerpo del monopolo, según el proceso de presión dinámica de base en el diagrama de flujo de la figura 4.1. A continuación se muestra un ejemplo de esos cálculos:

**Grupo al que pertenece la estructura**

A (CFE 93, ref. [18])

**Tipo de estructura de acuerdo a su respuesta al viento**

2

**Clase de la estructura según su tamaño**

B (según altura de la estructura  $H= 36$  m)

**Dimensión de desplante de la estructura**

$b=1.412698731$  m

**Factor de excitación de fondo B**

$b/H= 1.412698731 /36=0.03924$

$B= 1.365$  (Interpolación figura I.20 CFE 93 C.I pág. 1.4.75, ref. [18])

**Cálculo del factor  $C\alpha'$**

*Altura gradiente (Tabla I.29 CFE 93, ref. [18] C.I pág 1.4.72)*

$\delta=315$  m

*Cálculo del factor  $\alpha'$*

$\alpha'$  para terreno categoría 2= 0.18;

$\therefore$ Entonces  $C\alpha'=2.282$

**Factor de rugosidad del terreno**

$k_r$  para terreno categoría 2 = 0.08

**Coefficiente de amortiguamiento crítico**

$$\xi = 0.01$$

**Determinación de la frecuencia natural de la estructura (colocar los pesos necesarios en el modelo de StaadPro)**

Frecuencia natural  $n_0 = 0.60736$  Hz

**Factor que determina la influencia del tamaño de la construcción, adimensional (C.I pág 1.4.19 Tabla I.3 CFE 93 [18])**

$$F_c = 1.0$$

**Estimación de Frzmax**

*Cálculo  $\alpha$  (C.I pág 1.4.20 Tabla I.4 CFE 93, ref. [18])*

$$\alpha = 0.131$$

$$Frz = 1.56 * [H/\delta]^\alpha = 1.56 * [36/315]^{0.131} = 1.1741$$

**Estimación de Factor de exposición ( $F_\alpha$ )**

$$F_\alpha = F_c * Frz = 1.1741$$

**Estimación de la velocidad de diseño máxima ( $VH_{max}$ )**

$$VH_{max} = VD_{max} = FT * F_{\alpha_{max}} * VR = (1.2) * (1.1741) * (120) = 169.07681 \text{ km/h}$$

**Factor de ráfaga  $g_H$  (CFE 93, ref. [18] C.I pág 1.4.72 inciso 4.9.3.3)**

$$g_H = 1.44805$$

**Estimación de la velocidad media de diseño a la altura H (km/h)  $VH'$** 

$$VH' = (1/g_H) VH_{max} = 116.76152 \text{ km/h}$$

**Factor de reducción por tamaño**

$$VH = 169.07681 \text{ km/h}$$

$$gH = 1.44805$$

$$VH' = VH/gH = 116.76152 \text{ km/h}$$

$$3.6 n_0 (H/VH') = 0.67414$$

$$3.6 n_0/VH' = 0.01873 \text{ ondas/m}$$

$$S = 0.317 \text{ (Figura I.20 C.I pág. 1.4.75, ref. [18])}$$

**Estimación del factor que representa la relación de la energía de ráfaga con la frecuencia natural de la estructura E (figura I.20 C.I pág. 1.4.75 CFE 93, ref. [18])**

$$E = 0.138$$

**Variación de la carga debida a la turbulencia del viento ( $\sigma/\mu$ )**

$$\frac{\sigma}{\mu} = \sqrt{\frac{kr}{C\alpha'} \left( B + \frac{S * E}{\zeta} \right)} \quad (4.13)$$

$$\sigma/\mu = 0.44787$$

**Determinación de factores  $k'$  y  $\eta$  (Tabla I.29 CFE 93, ref. [18] C.I pág 1.4.72)**

$$k' = 1.288$$

$$\eta = -0.054$$

**Factor de corrección por temperatura y por altura respecto al nivel del mar**

$\Omega$  = Presión barométrica en mm de Hg (C.I Tabla I.7 CFE 93, ref. [18] pág 1.4.28)

$\tau$  = Temperatura ambiental en ° C

$$G = (0.392 \Omega)/(273 + \tau) = (0.392 (556.04))/(273 + 13.7) = 0.7603$$

### Presión dinámica de base

En mecánica, una presión se define como una fuerza repartida en área. Por ello el área propuesta al definir las longitudes y los perfiles, es la que se interpondrá al flujo del viento.

$$q_z = 0.0048 * G * V_D^2 = 0.0048 * 0.7603 * 169.07681 = 104.3215 \text{ kg/m}^2$$

### Factor de respuesta dinámica debida a ráfagas

$$F_g = \frac{1}{g^2} [1 + g_p(\sigma/\mu)] \quad (4.14)$$

$g$  = factor de ráfaga, variable con la altura  $z$  (sección 4.9.3.3 CFE 93, ref. [18] pág 1.4.72)

$\sigma/\mu$  = relación entre la desviación estándar, de la carga por viento y el valor medio de la carga por viento.

$g_p$  = factor pico o de efecto máximo de la carga por viento.

$$g = k' \left[ \frac{36}{\delta} \right]^\eta = 1.288 \left[ \frac{36}{315} \right]^{(-0.054)} = 1.44805$$

Las variables  $k'$  y  $\eta$  son adimensionales dependen de la rugosidad del terreno de desplante.

Estos dos parámetros y  $\delta$  son calculados de acuerdo a la tabla I.29 CFE 93, ref. [18] pág 1.4.72 .

$g_p$  se puede calcular de las gráficas mostradas en la figura I.20. Para calcular el factor pico, se obtiene en función del coeficiente de rapidez de fluctuación promedio  $v$ , en Hz, el cual se define mediante:

$$v = n_0 \sqrt{\frac{S * E}{S * E + \zeta * B}} = 0.60736 \sqrt{\frac{0.317 * 0.138}{0.317 * 0.138 + 0.01 * 1.365}} = 0.53 \text{ Hz} \quad (4.15)$$

$$\therefore \text{Entonces } g_p = 4.02051$$

Por tanto:

$$F_g = \frac{1}{(1.44805)^2} [1 + 4.02051 * 0.44787]$$

$$\therefore F_g = 1.335649$$

**Presión total en la dirección de viento**

$$p_z = F_g * C_a * q_z \quad (4.16)$$

$F_g$ : factor de respuesta dinámica debida a ráfagas adimensional ( sección 4.9.3.3)

$C_a$ : Coeficiente de arrastre

$q_z$ : presión dinámica de base

En excel se sigue la siguiente fórmula para calcular la presión total en la dirección de viento:

$$p_z = F_g * C_a \textit{Plataforma} * q_z = 1.335649 * 1.40 * 104.3215 = 195.0716 \textit{kg/m}^2$$

**Fuerza en la dirección de viento**

$$F = \Sigma F_z = \Sigma p_z A_e \quad (4.17)$$

$F_z$ : Fuerza total F sobre la estructura en kg

$p_z$ : Presión total

$A_e$ : Área efectiva

$$F_z = (195.0716) * \left(\frac{1}{3} * 2.55\right) = (195.0716) * (0.85) = 165.8108 \textit{kg}$$

Terminando con el cálculo de los parámetros CFE 93, se analizarán las cargas de la estructura de viento para las condiciones de supervivencia y operación.

### 4.1.5. Cargas de viento.

- *Viento para las condiciones de supervivencia y operación:*

Las condiciones del viento en supervivencia dependen de la velocidad regional de la localidad, en la figura 4.15 se puede observar los resultados del viento en accesorios y en el cuerpo del monopolo.

Las cargas de viento en accesorios en el nodo 41 dependen de la altura total del monopolo  $H=36$  m calculado anteriormente en la sección 4.1.4, en el nodo 39 está en la altura  $H=33.75$  m y en el nodo 36 en la altura  $H=31.50$  m, están en la figura 4.13.

Concepto	Altura de soprtes y accesorios	Nodo N
SOPORTE 4 ANTENAS RF	36.00	<b>NODO 41</b>
SOPORTE 3 ANTENAS RF	31.50	<b>NODO 36</b>
RRU	36.00	<b>NODO 41</b>
RRU	31.50	<b>NODO 36</b>
REMATE TORRE	36.00	<b>NODO 41</b>
PARARRAYOS	36.00	<b>NODO 41</b>
ANTENA RF	36.00	<b>NODO 41</b>
PARÁBOLA 4'	33.75	<b>NODO 39</b>
ANTENA RF	31.50	<b>NODO 36</b>
PARÁBOLA 4'	33.75	<b>NODO 39</b>
PARÁBOLA 2'	33.75	<b>NODO 39</b>

Figura 4.13: Alturas y nodos de los accesorios

Las cargas de viento del cuerpo de monopolo se analiza toda las barras de la estructura a diferencia de los accesorios que van a cada sección de la barra, los resultados se muestran en la figura 4.14:

## ELEMENTOS QUE CORRESPONDEN A UN ANÁLISIS DINÁMICO

BAHIA	No.	ALTURA	Frz	Fu	Vd	qz	g	Fg	H/b	Ca	Ae	pz	Fz	HT	Fz
1	1	36.00000	1.17414	1.174144	169.07681	104.3215	1.44805	1.33565	1.81762	1.00000	0.4456	139.3368	62.0937	0.9	68.992979
2	2	35.10000	1.17026	1.170257	168.51697	103.6318	1.45003	1.33200	1.73617	1.00000	0.4665	138.0377	64.4006	0.9	71.556206
3	3	34.20000	1.16628	1.166281	167.94452	102.9289	1.45207	1.32827	1.66171	1.00000	0.4874	136.7174	66.6428	0.9	74.047597
4	4	33.30000	1.16221	1.162214	167.35882	102.2122	1.45416	1.32445	1.59337	1.00000	0.5084	135.3750	68.8187	0.9	76.465167
5	5	32.40000	1.15805	1.158050	166.75920	101.4811	1.45631	1.32054	1.53043	1.00000	0.5293	134.0095	70.9261	0.9	78.806788
6	6	31.50000	1.15378	1.153784	166.14493	100.7349	1.45853	1.31652	1.47228	1.00000	0.5502	132.6200	72.9633	0.9	81.070298
7	7	30.60000	1.14941	1.149411	165.51521	99.9727	1.46082	1.31241	1.41838	1.00000	0.5711	131.2052	74.9279	0.9	83.253202
8	8	29.70000	1.14492	1.144925	164.86919	99.1938	1.46317	1.30819	1.36829	1.00000	0.5920	129.7639	76.8177	0.9	85.352946
9	9	28.80000	1.14032	1.140319	164.20593	98.3973	1.46561	1.30384	1.32162	1.00000	0.6129	128.2948	78.6301	0.9	87.366799
10	10	27.90000	1.13559	1.135586	163.52440	97.5822	1.46812	1.29938	1.27802	1.00000	0.6338	126.7966	80.3627	0.9	89.291908
11	11	27.00000	1.13072	1.130719	162.82349	96.7475	1.47072	1.29479	1.23721	1.00000	0.6547	125.2675	82.0124	0.9	91.124936
12	12	26.10000	1.12571	1.125708	162.10198	95.8920	1.47342	1.29006	1.19893	1.00000	0.6756	123.7061	83.5764	0.9	92.862678
13	13	25.20000	1.12055	1.120545	161.35851	95.0144	1.47621	1.28518	1.16294	1.00000	0.6965	122.1103	85.0511	0.9	94.501258
14	14	24.30000	1.11522	1.115219	160.59160	94.1134	1.47911	1.28014	1.12905	1.00000	0.7174	120.4782	86.4331	0.9	96.036764
15	15	23.40000	1.10972	1.109719	159.79960	93.1874	1.48213	1.27493	1.09708	1.00000	0.7383	118.8075	87.7183	0.9	97.464781
16	16	22.50000	1.10403	1.104032	158.98067	92.2347	1.48527	1.26954	1.06687	1.00000	0.7592	117.0959	88.9026	0.9	98.780677
17	17	21.60000	1.09814	1.098144	158.13276	91.2535	1.48855	1.26396	1.03828	1.00000	0.7801	115.3405	89.9812	0.9	99.97909
18	18	20.70000	1.09204	1.092039	157.25357	90.2416	1.49198	1.25816	1.01118	1.00000	0.8010	113.5385	90.9490	0.9	101.05447
19	19	19.80000	1.08570	1.085698	156.34052	89.1967	1.49556	1.25214	0.98546	1.00000	0.8219	111.6864	91.8003	0.9	102.00038
20	20	18.90000	1.07910	1.079102	155.39066	88.1161	1.49932	1.24586	0.96102	1.00000	0.8429	109.7804	92.5288	0.9	102.80977
21	21	18.00000	1.07223	1.072227	154.40064	86.9969	1.50328	1.23931	0.93776	1.00000	0.8638	107.8164	93.1275	0.9	103.47495
22	22	17.10000	1.06505	1.065046	153.36664	85.8356	1.50745	1.23247	0.91560	1.00000	0.8847	105.7895	93.5883	0.9	103.98705
23	23	16.20000	1.05753	1.057529	152.28421	84.6283	1.51186	1.22529	0.89446	1.00000	0.9056	103.6942	93.9025	0.9	104.33617
24	24	15.30000	1.04964	1.049640	151.14820	83.3703	1.51653	1.21775	0.87428	1.00000	0.9265	101.5243	94.0600	0.9	104.51114
25	25	14.40000	1.04134	1.041337	149.95256	82.0566	1.52150	1.20980	0.85499	1.00000	0.9474	99.2723	94.0490	0.9	104.49889
26	26	13.50000	1.03257	1.032570	148.69013	80.6807	1.52682	1.20140	0.83653	1.00000	0.9683	96.9298	93.8562	0.9	104.28464
27	27	12.60000	1.02328	1.023280	147.35231	79.2355	1.53251	1.19248	0.81885	1.00000	0.9892	94.4868	93.4660	0.9	103.85511
28	28	11.70000	1.01339	1.013394	145.92871	77.7118	1.53866	1.18298	0.80190	1.00000	1.0101	91.9312	92.8599	0.9	103.1777
29	29	10.80000	1.00282	1.002823	144.40656	76.0991	1.54532	1.17279	0.78564	1.00000	1.0310	89.2485	92.0160	0.9	102.23996
30	30	9.90000	0.99276	0.992764	142.95798	74.5800	1.55176	1.16309	0.77002	1.00000	1.0519	86.7429	91.2461	0.9	101.38459
31	31	9.00000	0.99276	0.992764	142.95798	74.5800	1.55176	1.16309	0.75502	1.00000	1.0728	86.7429	93.0596	0.9	103.39954
32	32	8.10000	0.99276	0.992764	142.95798	74.5800	1.55176	1.16309	0.74059	1.00000	1.0937	86.7429	94.8730	0.9	105.41449
33	33	7.20000	0.99276	0.992764	142.95798	74.5800	1.55176	1.16309	0.72670	1.00000	1.1146	86.7429	96.6865	0.9	107.42944

Figura 4.14: Cargas de viento en el cuerpo

En total son 40 barras, su altura total de 36 m y su distribución entre tramos es de 0.9 m. Para obtener los valores de Frz, Fa, Vd, qz, g y Fg se pueden calcular de la misma manera que en la sección 4.1.4. La siguientes columnas son:

- La relación de solidez H/b,
- el coeficiente de arrastre del monopolo  $Ca=1.0$ ,
- área expuesta  $Ae=((base\ menor+base\ mayor)/2)*DIST/T$  donde la base menor es el diámetro interno y la base mayor el diámetro externo,
- pz es la presión total del viento calculada de la misma manera que en los parámetros cfe 93 con la ecuación 4.16 con la diferencia que el Ca es igual a 1.0,
- Fz es la fuerza total del viento calculada de la misma manera que en los parámetros cfe 93 con la ecuación 4.17,
- HT es la distribución entre tramos (DIST/T) donde se divide la altura total monopolo  $H=36\ m / 40\ barras$  dando como resultado 0.9 m,
- FZ es la fuerza total de cada uno de las barras  $Fz/HT=68.89375\ kg/m$ .

```

184 LOAD 5 VIENTO EN DIRECCION Z (CONDICION DE RESISTENCIA)
185 JOINT LOAD
186 * VIENTO EN SOPORTE 4 ANTENAS RF
187 41 FZ -165.810822790932
188 * VIENTO EN SOPORTE 3 ANTENAS RF
189 36 FZ -157.817752404889
190 * VIENTO EN RRU
191 41 FZ -147.474096505817
192 * VIENTO EN RRU
193 36 FZ -105.273724251261
194 * VIENTO EN REMATE TORRE
195 41 FZ -23.7831241349064
196 * VIENTO EN PARARRAYOS
197 41 FZ -10.0322514629808
198 * VIENTO EN ANTENA RF
199 41 FZ -523.945493299501 FX 0 MY 0
200 * VIENTO EN PARÁBOLA 4'
201 39 FZ -202.148854527132
202 * VIENTO EN ANTENA RF
203 36 FZ -379.449060983994 FX 0 MY 0
204 * VIENTO EN PARÁBOLA 4'
205 39 FZ -100.135655493316 FX 17.5237397113304 MY 69.2199734876208
206 * VIENTO EN PARÁBOLA 2'
207 39 FZ -66.5980881374001

```

(a) Viento en accesorios

```

208 MEMBER LOAD
209 * VIENTO EN ESTRUCTURA PRINCIPAL
210 40 UNI GZ -68.9929788687555
211 39 UNI GZ -71.5562060605921
212 38 UNI GZ -74.0475974777768
213 37 UNI GZ -76.4651673992113
214 36 UNI GZ -78.8067876724738
215 35 UNI GZ -81.0702983588466
216 34 UNI GZ -83.2532020844761
217 33 UNI GZ -85.3529464601971
218 32 UNI GZ -87.3667994990947
219 31 UNI GZ -89.2919084233714
220 30 UNI GZ -91.1249359429665
221 29 UNI GZ -92.862677787615
222 28 UNI GZ -94.501257874008
223 27 UNI GZ -96.0367644210646
224 26 UNI GZ -97.4647809636526
225 25 UNI GZ -98.7806773296935
226 24 UNI GZ -99.9790895500484
227 23 UNI GZ -101.05447320358
228 22 UNI GZ -102.000384411753
229 21 UNI GZ -102.809773138635
230 20 UNI GZ -103.474948347376
231 19 UNI GZ -103.987051675718
232 18 UNI GZ -104.336165758117
233 17 UNI GZ -104.511141596703
234 16 UNI GZ -104.49888567033
235 15 UNI GZ -104.284639297175
236 14 UNI GZ -103.851104729254
237 13 UNI GZ -103.177698152282
238 12 UNI GZ -102.239962111485
239 11 UNI GZ -101.384586537081
240 10 UNI GZ -103.399538744841
241 9 UNI GZ -105.414490952601
242 8 UNI GZ -107.429443160362
243 7 UNI GZ -109.444395368122
244 6 UNI GZ -111.459347575882
245 5 UNI GZ -113.474299783643
246 4 UNI GZ -115.489251991403
247 3 UNI GZ -117.504204199163
248 2 UNI GZ -119.519156406923
249 1 UNI GZ -121.534108614684

```

(b) Viento en el cuerpo

Figura 4.15: Viento de resistencia

Y las condiciones del viento en operación dependen del 70% de la velocidad regional dando una VR=90 km/h, en la figura 4.16 se puede observar los resultados del viento en accesorios y en el cuerpo del monopolo.

```

250  LOAD 6 VIENTO EN DIRECCION Z (CONDICION DE OPERACION)
251  JOINT LOAD
252 * VIENTO EN SOPORTE 4 ANTENAS RF
253 41 FZ -84.6234734875794
254 * VIENTO EN SOPORTE 3 ANTENAS RF
255 36 FZ -80.5441174569388
256 * VIENTO EN RRU
257 41 FZ -75.2651128901294
258 * VIENTO EN RRU
259 36 FZ -53.7276642330404
260 * VIENTO EN REMATE TORRE
261 41 FZ -12.1379928089479
262 * VIENTO EN PARARRAYOS
263 41 FZ -5.12007570681153
264 * VIENTO EN ANTENA RF
265 41 FZ -294.719339980969 FX 0 MY 0
266 * VIENTO EN PARÁBOLA 4'
267 39 FZ -113.708730671512
268 * VIENTO EN ANTENA RF
269 36 FZ -213.440096803496 FX 0 MY 0
270 * VIENTO EN PARÁBOLA 4'
271 39 FZ -56.3263062149904 FX 9.85710358762332 MY 38.9362350867867
272 * VIENTO EN PARÁBOLA 2'
273 39 FZ -37.4614245772876

```

## (a) Viento en accesorios

```

274  MEMBER LOAD
275 * VIENTO EN ESTRUCTURA PRINCIPAL
276 40 UNI GZ -35.2113907590149
277 39 UNI GZ -36.5195183372605
278 38 UNI GZ -37.7910443607845
279 37 UNI GZ -39.0248842743859
280 36 UNI GZ -40.2199565800917
281 35 UNI GZ -41.3751333218972
282 34 UNI GZ -42.4892400857657
283 33 UNI GZ -43.5608586729147
284 32 UNI GZ -44.5887008471296
285 31 UNI GZ -45.5711502286658
286 30 UNI GZ -46.5066523018736
287 29 UNI GZ -47.3935124426808
288 28 UNI GZ -48.2298069140059
289 27 UNI GZ -49.0134393497227
290 26 UNI GZ -49.7422932119175
291 25 UNI GZ -50.4138216114764
292 24 UNI GZ -51.0255209401677
293 23 UNI GZ -51.5743310675472
294 22 UNI GZ -52.0570339058621
295 21 UNI GZ -52.4701597596609
296 20 UNI GZ -52.8095918181175
297 19 UNI GZ -53.0709995634589
298 18 UNI GZ -53.2491344372994
299 17 UNI GZ -53.338469133062
300 16 UNI GZ -53.3322502118931
301 15 UNI GZ -53.2229315110907
302 14 UNI GZ -53.0015781325645
303 13 UNI GZ -52.6578741458676
304 12 UNI GZ -52.1793423331042
305 11 UNI GZ -51.7427469327619
306 10 UNI GZ -52.7711001147283
307 9 UNI GZ -53.7994532966947
308 8 UNI GZ -54.827806478661
309 7 UNI GZ -55.8561596606274
310 6 UNI GZ -56.8845128425937
311 5 UNI GZ -57.9128660245601
312 4 UNI GZ -58.9412192065264
313 3 UNI GZ -59.9695723884928
314 2 UNI GZ -60.9979255704592
315 1 UNI GZ -62.0262787524255

```

## (b) Viento en el cuerpo

Figura 4.16: Viento de operación

### 4.1.6. Cargas de sismo.

Una vez que se carga la estructura con la carga de viento, se verifican las resistencias antes de efectuar el análisis sísmico. Se corre el modelo en el software Staad Pro ® para calcular el peso de la estructura (PP + accesorios) ver figura 4.17 y se calcula el cortante basal dinámico ver figura 4.19.

```

716 * COMBINACIONES PARA REVISION DE LA ESTRUCTURA (CONDICION DE RESISTENCIA)
717 LOAD COMB 11 1.00 X (PP + CM + CV)
718 | 1 1.0 2 1.0 3 1.0
719 LOAD COMB 12 0.75 X (PP + CM + CV + VIENTO SUPERVIVENCIA)
720 | 1 0.75 2 0.75 3 0.75 5 0.75
721 LOAD COMB 13 0.75 X (PP + CM + CV - VIENTO SUPERVIVENCIA)
722 | 1 0.75 2 0.75 3 0.75 5 -0.75
723 LOAD COMB 14 0.75 X (PP + CM + CV + 1.0 SISMO Z 0.30 SISMO X)
724 | 1 0.75 2 0.75 3 0.75 8 0.75
725 LOAD COMB 15 0.75 X (PP + CM + CV + 1.0 SISMO X 0.30 SISMO Z)
726 | 1 0.75 2 0.75 3 0.75 7 0.75
727 LOAD COMB 16 0.75 X (PP + CM + CV - 1.0 SISMO Z 0.30 SISMO X)
728 | 1 0.75 2 0.75 3 0.75 8 -0.75
729 LOAD COMB 17 0.75 X (PP + CM + CV - 1.0 SISMO X 0.30 SISMO Z)
730 | 1 0.75 2 0.75 3 0.75 7 -0.75

```

(a) Combinaciones de resistencia

```

731 * COMBINACIONES DE CARGA PARA DESPLAZAMIENTOS
732 LOAD COMB 18 1.0 X (PP + CM + CV)
733 | 1 1.0 2 1.0 3 1.0
734 LOAD COMB 19 1.0 X (PP + CM + CV + VIENTO OPERACION)
735 | 1 1.0 2 1.0 3 1.0 6 1.0
736 LOAD COMB 20 1.0 X (PP + CM + CV - VIENTO OPERACION)
737 | 1 1.0 2 1.0 3 1.0 6 -1.0
738 LOAD COMB 21 1.0 X (PP + CM + CV + 1.0 SISMO ZD 0.30 SISMO XD)
739 | 1 1.0 2 1.0 3 1.0 10 1.0
740 LOAD COMB 22 1.0 X (PP + CM + CV + 1.0 SISMO XD 0.30 SISMO ZD)
741 | 1 1.0 2 1.0 3 1.0 9 1.0
742 LOAD COMB 23 1.0 X (PP + CM + CV - 1.0 SISMO ZD 0.30 SISMO XD)
743 | 1 1.0 2 1.0 3 1.0 10 -1.0
744 LOAD COMB 24 1.0 X (PP + CM + CV - 1.0 SISMO XD 0.30 SISMO ZD)
745 | 1 1.0 2 1.0 3 1.0 9 -1.0

```

(b) Combinaciones de desplazamientos

```

746 * COMBINACIONES DE CARGA PARA DISEÑO DE CIMENTACION
747 LOAD COMB 25 1.0 X (PP + CM + CV)
748 | 1 1.0 2 1.0 3 1.0
749 LOAD COMB 26 1.0 X (0.90 PP + 0.90 CM + 0.90 CV + VIENTO SUPERVIVENCIA)
750 | 1 0.9 2 0.9 3 0.9 5 1.0
751 LOAD COMB 27 1.0 X (0.90 PP + 0.90 CM + 0.90 CV - VIENTO SUPERVIVENCIA)
752 | 1 0.9 2 0.9 3 0.9 5 -1.0
753 LOAD COMB 28 1.0 X (0.90 PP + 0.90 CM + 0.90 CV + 1.0 SISMO Z 0.30 SISMO Z)
754 | 1 0.9 2 0.9 3 0.9 8 1.0
755 LOAD COMB 29 1.0 X (0.90 PP + 0.90 CM + 0.90 CV + 1.0 SISMO X 0.30 SISMO Z)
756 | 1 0.9 2 0.9 3 0.9 7 1.0
757 LOAD COMB 30 1.0 X (0.90 PP + 0.90 CM + 0.90 CV - 1.0 SISMO Z 0.30 SISMO Z)
758 | 1 0.9 2 0.9 3 0.9 8 -1.0
759 LOAD COMB 31 1.0 X (0.90 PP + 0.90 CM + 0.90 CV - 1.0 SISMO X 0.30 SISMO Z)
760 | 1 0.9 2 0.9 3 0.9 7 -1.0

```

(c) Combinaciones de cimentación

Figura 4.17: Combinaciones

Como la estructura se localiza en zona sísmica tipo B y suelo del tipo II se coloca el espectro sísmico sin corregir, para obtener el cortante basal dinámico. Se hace el cálculo del espectro corregido, ver figura 4.18 y se colocan esos estados de carga para la estructura. Se corre el modelo en el software de Staad Pro ® y se verifica que cumpla las condiciones de resistencia.

La condición es que el cortante basal dinámico  $V_d$  sea mayor al 0.75 del cortante basal estático  $V_e$ .

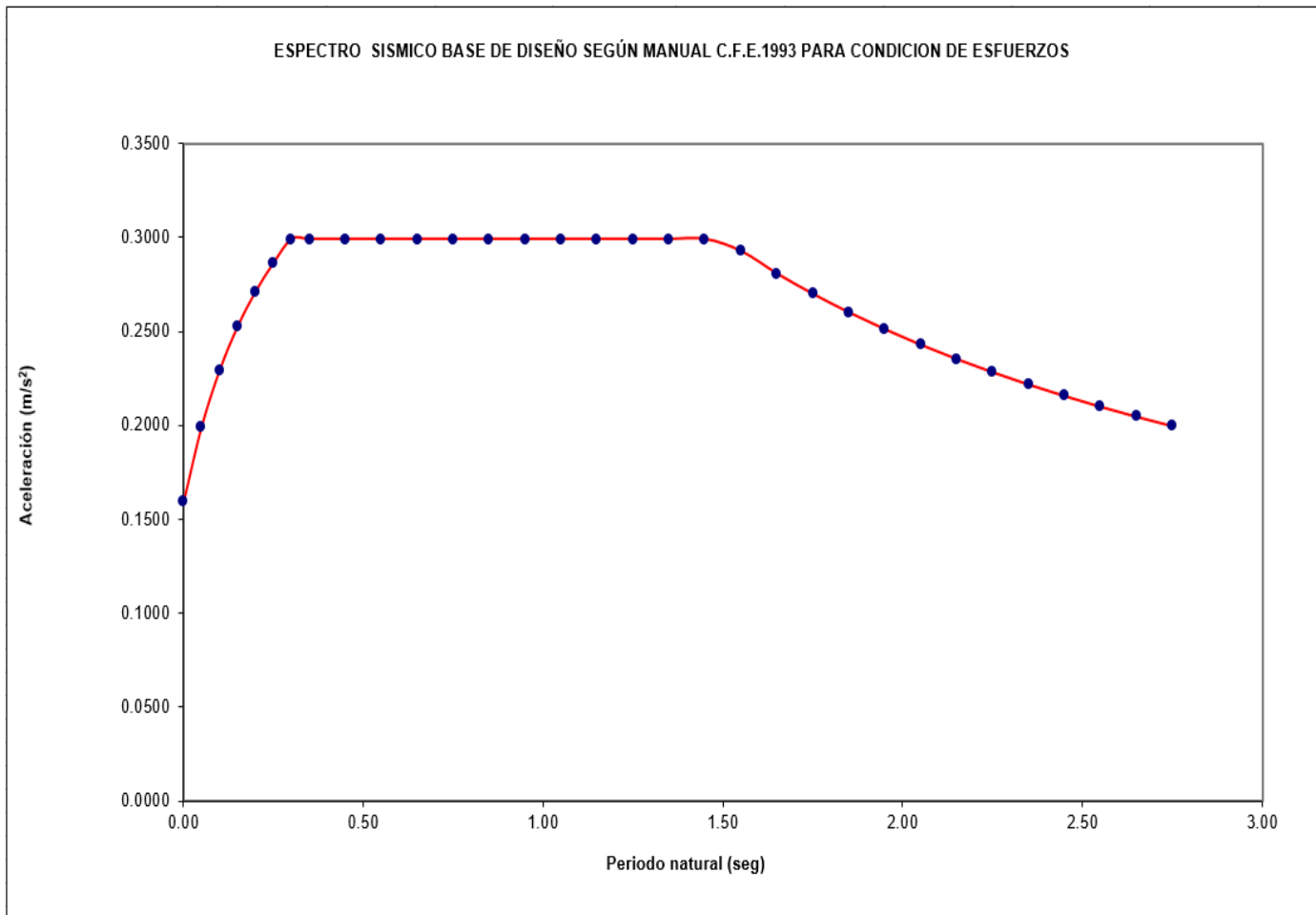


Figura 4.18: Espectro sísmico

Para eso se hace el análisis de la figura 4.19 en donde se puede observar el método estático, cortante basal estático ( $V_e$ ) y el cortante basal dinámico ( $V_d$ ) finalizando con su respectiva condición:

1. Método estático: Empezando con este método se empieza a calcular  $1.5 \cdot c/Q$ , para conocer los valores se revisa el espectro de diseño para estructuras (Ref. C.I. 1.3.27 tabla 3.1 C.F.E. DISEÑO POR SISMO 1993 [6]) donde se conoce la zona sísmica y el tipo de suelo, por lo tanto el coeficiente  $c$  es igual a 0.3 y se usará un factor de comportamiento  $Q=2$  dando como resultado  $1.5 \cdot (0.3)/2 = 0.225$ . Después se obtiene el peso total del monopolo en el software StaadPro y es de 10027.37 kg.
2. Cortante basal dinámico ( $V_d$ ): Se inicia calculando el espectro sin factorizar en el software StaadPro con sus 32 aceleraciones sísmicas que se obtienen en una tabla del manual CFE Sismo 1993. Ponemos esas aceleraciones en el editor del programa en la dirección  $x$ ,  $z$ ,

$\Delta x$  y  $\Delta z$ , se hace el análisis y se busca el resultado en la carga 7 (CQC) dando 1634.24 kg. Lo siguiente es hacer la corrección con el espectro factorizado en la dirección x y z, y el espectro por desplazamiento en la dirección  $\Delta x$  y  $\Delta z$ , se hace el análisis en el editor del programa y se busca la carga 7 (CQC) dando como resultado 3167.97 kg, se verifica la condición cumpla con el criterio  $V_d > 0.75V_e$ .

### METODO ESTATICO

$$1.5 c/Q = 0.225$$

$$W_{STAAD} = 9982.45 \text{ kg}$$

#### Cortante Basal estatico "Ve" :

$$1.5 c/Q (W_{STAAD}) = 3551.3188 \text{ kg}$$

$$\text{No. de nodos} = 40$$

$$\text{Fuerza x nodo} = 88.7830 \text{ kg/nodo}$$

$$\text{Cortante Basal dinamico "Vd" : } 3167.97 \text{ kg}$$

#### Condición

$$V_d > 0.75 V_e$$

$$3167.97 \text{ OK } 2663.4891 \text{ kg}$$

Por lo tanto se tiene que afectar el espectro:

$$0.75 (V_e/V_d) = 0.8408$$

Figura 4.19: Condiciones de la carga de sismo

Como cumple con las condiciones de resistencia del sismo es más probable que la estructura se comporte de manera favorable.

### 4.1.7. Eficiencia estructural.

Para saber si la estructura sea favorable para su construcción usaremos el modelo en el software Staad Pro, el objetivo a analizar es el monopolo en una estructura en cantilever (voladizo) de 40 barras y como es una carga axial se usará como peso (o sea flecha hacia abajo). El monopolo será eficiente si las 40 barras estan en un rango de 0 a 1.

0.26
0.239
0.285
0.298
0.308
0.391
0.395
0.398
0.405
0.41
0.413
0.416
0.421
0.426
0.433
0.438
0.442
0.446
0.449
0.454
0.458
0.461
0.464
0.466
0.47
0.473
0.476
0.478
0.48
0.482
0.485
0.487
0.488
0.49
0.492
0.494
0.496
0.497
0.499
0.5

Figura 4.20: Eficiencia estructural

En la figura 4.20 se puede observar que todos las barras están dentro del rango, por lo tanto el monopolo es satisfactorio y que la eficiencia más elevada es la primer barra el 0.5 que está en la cimentación, mientras van subiendo las barras la eficiencia tiende a ser más baja hasta llegar a la barra 40. En el capítulo 5 se modelará este proceso como una red bayesiana.

## Capítulo 5

# ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE CON EN EL PROGRAMA UNINET LIGHT-TWIST SOFTWARE

### 5.1. UNINET LIGHT-TWIST SOFTWARE.

Es un paquete de software de análisis de incertidumbre independiente. Su enfoque principal es el modelado de dependencia para distribuciones de probabilidad. Las variables aleatorias se pueden acoplar utilizando una red bayesiana, ráncimos de probabilidad o árboles de dependencia.

UNINET es un programa independiente que utiliza redes bayesianas (BBN) para modelado y para minería de datos ordinal multivariante. Está diseñado por el Grupo y Riesgo de modelado ambiental en el Departamento de Matemáticas de la Universidad de Delft, bajo contrato con el Ministerio de Transporte holandés. Programador jefe es Dan Ababei, el vice programador es Daniel Lewandowski. El apoyo matemático es proporcionado por Daniel Lewandowski, Anca Hanea, Oswaldo Morales, Dorota Kurowicka y Roger Cooke. Las funciones de UNINET junto con el paquete de gráficos UNIGRAPH y el programa de análisis de sensibilidad UNISENS. Algunas funciones también funcionan en conjunto con el programa de análisis de incertidumbre de propósito general UNICORN (ref.[1]).

Un BBN es una estructura gráfica conocida como Gráfico Acíclico Dirigido (DAG). Un DAG es un conjunto de nodos y arcos, o aristas dirigidas, entre nodos, de modo que no hay ciclo dirigido. En una BBN, los nodos representan variables aleatorias univariadas y los arcos representan influencias. Nodo 1 es un padre de Nodo 2, si hay un arco dirigido que va desde Nodo 1 hacia Nodo 2 ver figura 5.1. Nodo 1 es un antepasado de Nodo 2 si hay una ruta dirigida

desde Nodo 1 a Nodo 2. Un nodo con un conjunto de padres no vacío es un nodo hijo. Un nodo sin padres es un nodo fuente , un nodo sin hijos es un nodo receptor (ref. [1]).



Figura 5.1: Nodos padre-hijo

■ Tipos de BBN

Se pueden distinguir tres tipos de BBN; discreta, normal (o discreto-normal) y no paramétrico continuo-discreto. Los dos primeros están disponibles en otros paquetes comerciales. Todos los BBN pueden tener nodos funcionales (nodos que son funciones de sus padres), ver ejemplo en la figura 5.10; las diferencias se relacionan con el tratamiento de los nodos probabilísticos. La discusión subsiguiente se refiere a nodos probabilísticos, ref. [1].

1. Discreto: Las variables aleatorias tienen distribuciones discretas. Los nodos de origen están asignados (marginales) en distribuciones, a cada nodo hijo se le asigna una tabla de probabilidad condicional, dando la distribución sobre los posibles valores del hijo, condicionada a cada posible combinación de valores de los padres. El número de probabilidades que deben evaluarse y mantenerse para un nodo hijo es exponencial en el número de padres. Agregar nuevos nodos padre requiere reevaluar todas las influencias de los nodos hijo. Si se conocen distribuciones marginales para nodos hijos, no hay forma de ingresar esta información directamente; en lugar condicional las tablas de probabilidad deben ajustarse para cumplir con todos los datos marginales. Los BBN discretos tienen una pesada carga de evaluación / mantenimiento y son adecuados solo para problemas pequeños (ref. [1]).
2. Discreto normal: En este caso, se supone que el conjunto de variables sigue una distribución normal conjunta (ciertas los nodos de origen pueden ser discretos). Cada hijo está asociado con un valor medio y varianza condicional. Cada influencia está asociada con un coeficiente de regresión parcial. En términos generales, el coeficiente de regresión parcial por ejemplo para 5 con respecto a 1 dice cuánto media condicional de 5 cambios como resultado de un cambio unitario en el valor del padre 1. Los BBN normales discretos funcionan bien si se cumplen los supuestos de normalidad. Sino entonces las variables

individuales deben transformarse a normales (lo que requiere, por supuesto, las distribuciones marginales). Si  $F$  es la función de distribución acumulativa de la variable aleatoria  $X$  (continua, invertible), y  $\Phi$  es la función de distribución acumulativa normal estándar, entonces  $\Phi^{-1}(F(X))$  transforma  $X$  en normal (a veces llamado la versión normal de  $X$ ), la varianza condicional en unidades normales debe ser constante; esta es la varianza con respecto a las unidades para las que la distribución es normal. Los coeficientes de la regresión parcial se aplican a las unidades normales de las variables transformadas, no a las unidades originales. Esto impone una pesada carga a cualquier consulta de expertos, y es dudoso en la mayoría de los casos reales de aplicaciones, a menos que la transformación a normal sea casi lineal. Si se agrega o elimina un nodo principal después de la cuantificación, entonces deben reevaluarse los coeficientes de regresión parcial (ref. [1]).

3. No paramétrico continuo/discreto: UNINET admite BBNs continuos / discretos no paramétricos con importantes características distintivas, ref. [1].

Para hacer más claro el panorama, se presenta una versión pequeña del modelo de Red Bayesiana, que incluye las siguientes variables de la figura 5.2:

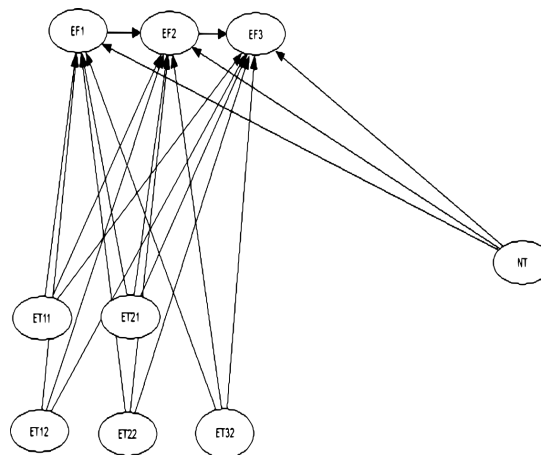


Figura 5.2: Red bayesiana

El primer renglón corresponde a una estructura de dos elementos y sus espesores de placa. El segundo renglón es una estructura de tres elementos. La parte de arriba corresponde a las eficiencias del monopolo, que es la verificación que el diseño es satisfactorio. Suponiendo que todos los modelos de la empresa se dividen invariablemente en tres componentes, entonces la variable NT es un condicionante para tomar o no el primer o segundo renglón. Si el número de tramos es 2, únicamente tomara los valores del primer renglón y si es 3 tomara los del segundo renglón. Es por ello que las variables de espesores convergen en cada eficiencia.

## 5.2. REDES BAYESIANAS CON EL SOFTWARE UNINET.

### 5.2.1. Ensamble de la red bayesiana en UNINET:

Para ensamblar la red que se va a analizar debemos guiarnos por la figura 5.3:

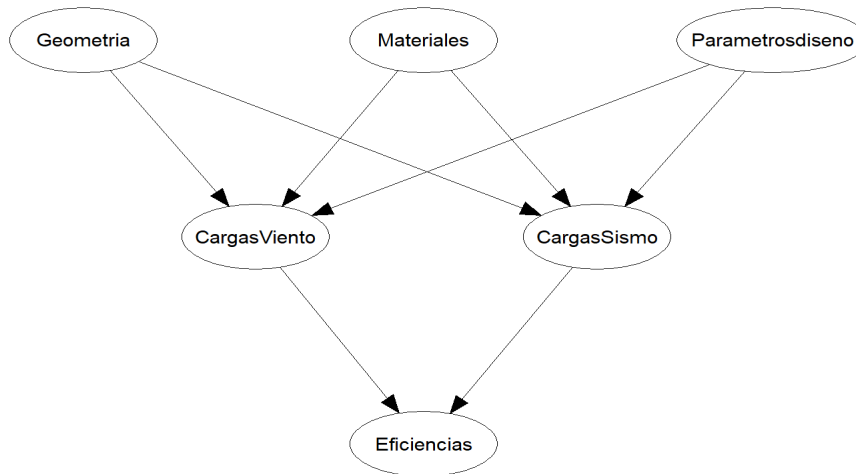


Figura 5.3: Ensamble de la red

Donde la geometría, los materiales y los parámetros de diseño van a conectarse a las cargas de viento y las cargas de sismo, para que finalmente las cargas se conecten a las eficiencias donde se analiza si el monopolo es satisfactorio.

Cuando se propone un diseño de monopolo, se proponen geometrías y materiales que derivan en solicitaciones de tipo sísmico y de viento. Al final se hace una validación de la propuesta bajo una reglamentación (eficiencias).

Terminando el proceso de diseño estructural del monopolo, se conectan las redes bayesianas en el software UNINET para el análisis de confiabilidad donde hay nodos probabilísticas y funcionales. Siendo el primero obtenido por la estadística calculada de las muestras de los monopolos y el segundo expresan una funciones de los nodos como sum, sin, cos, if, sqrt, etc.

Una vez creados y conectados los nodos donde los coeficientes en análisis sean idénticos como se muestra en el capítulo 4, se condicionan las variables y se analiza el diseño del monopolo más económico.

La idea es que termine en una red completa como se observa la figura 5.4:

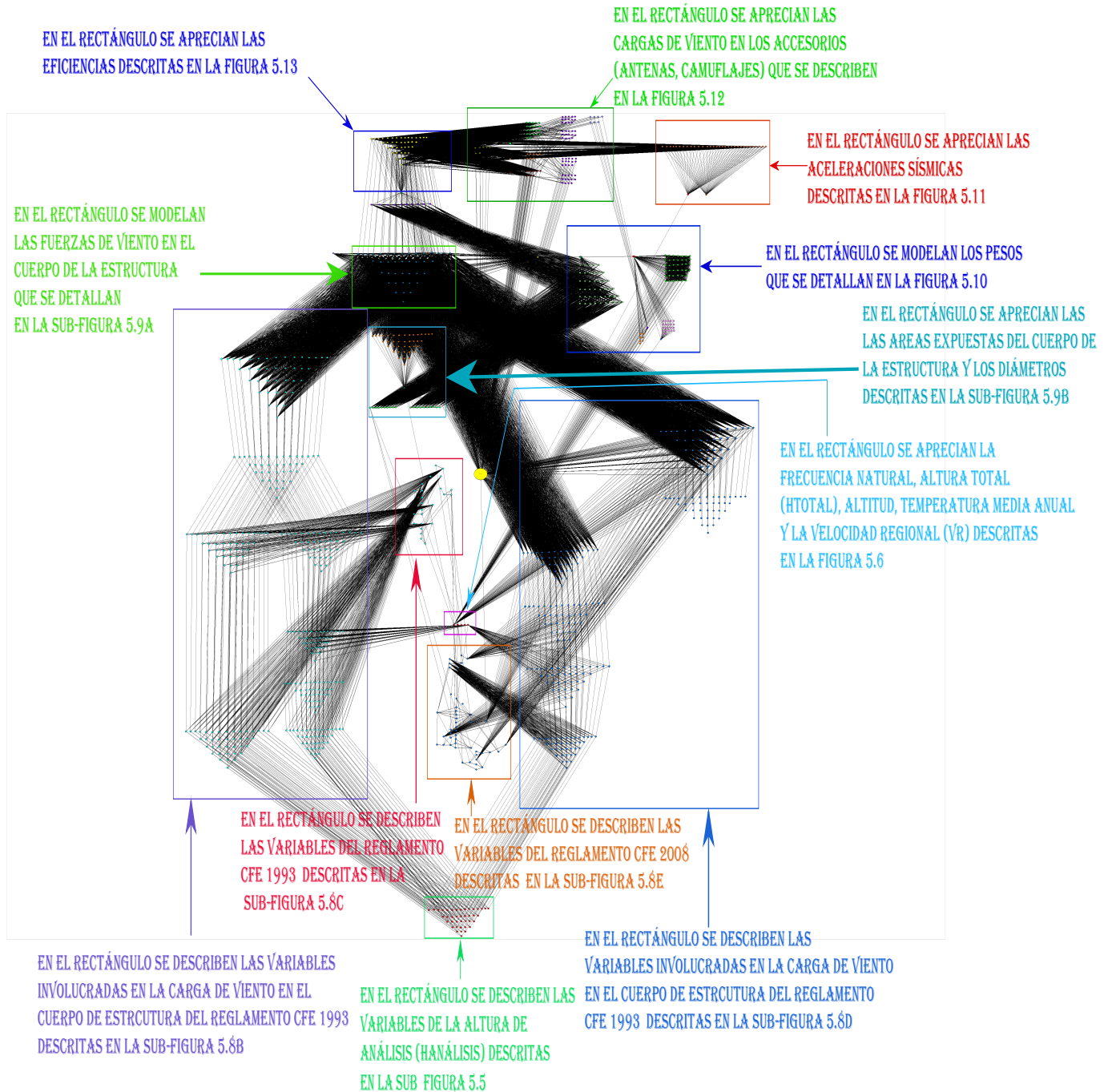


Figura 5.4: Red completa de análisis

### 5.2.2. Elementos de uso para el análisis de confiabilidad:

Las elementos que se van a aplicar para el análisis serán las variables de entrada, intermedias y de salida. Siendo las entradas los datos iniciales del monopolo como su altura, velocidad regional, pendiente, altura sobre el nivel del mar (asnm), temperatura media anual, categoría de terreno, factor topográfico, zona sísmica, tipo de terreno, reglamento y cliente, para ver las descripción de estas variables ver el glosario de términos. Las intermedias son todas las cargas que afectan al monopolo como son la frecuencia natural, las cargas de viento, las cargas de sismo y el peso de accesorios ver figura 3.2, la descripción de estas variables también se puede ver en el glosario. Y por último las salidas que son el número de tramos del diseño propuesto, los diámetros de ese diseño, espesores, pesos del cuerpo del monopolo y las eficiencias.

#### 5.2.2.1. Altura de análisis:

La pirámide de altura de análisis (Hanálisis) donde es el comienzo de todo el análisis de la red. Son las alturas del modelo estructural a la cual se estiman los parámetros de las fuerzas de viento, siendo 40 nodos de tipo continuo, ver esto en la figura 5.5:

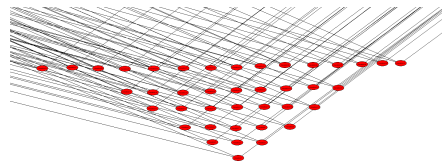


Figura 5.5: Altura de análisis

#### 5.2.2.2. Coeficientes para reglamento CFE y pesos:

Los nodos frecuencia natural (FN), altura total (Htotal), altura sobre el nivel del mar (altitud), temperatura media anual (.t) y velocidad regional (VR) de la figura 5.6 se utilizan para coeficientes de ambos reglamentos CFE 1993 Y 2008 respectivamente. También FN se utiliza para factores de pesos, cargas de sismo y cargas de viento.

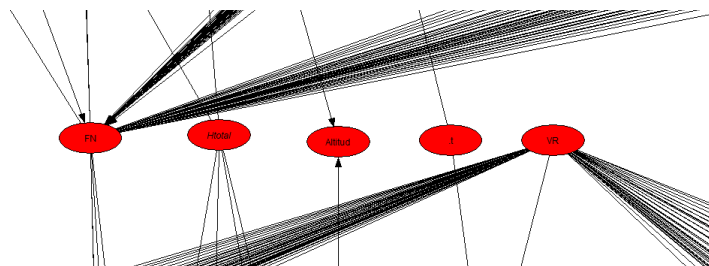


Figura 5.6: Nodos reglamento

### 5.2.2.3. Reglamento CFE:

Las siguientes variables a analizar son los reglamentos CFE 93 y CFE 2008 donde hay un nodo discreto Reglamento CFE (color amarillo) donde se condiciona 1 como CFE 93 (azul cian) y 2 como CFE 2008 (azul marino). Los reglamentos tienen factores únicos conectados a sus cargas en el cuerpo del monopolo, para comprender ver sus cuadros de diálogo de la figura 5.4. Estas variables también están conectadas a unos coeficientes vistos anteriormente en la sección 5.2.2.2. La última pirámide Hanálisis (en la parte baja de color rojo) es el comienzo de análisis de toda la red que no depende del reglamento y donde la altura de cada nodo varía empezando la altura total y reduciendo su valor dependiendo de la distancia entre tramo. Para entender sus conexiones del reglamento de manera completa podemos observar la figura 5.7 :

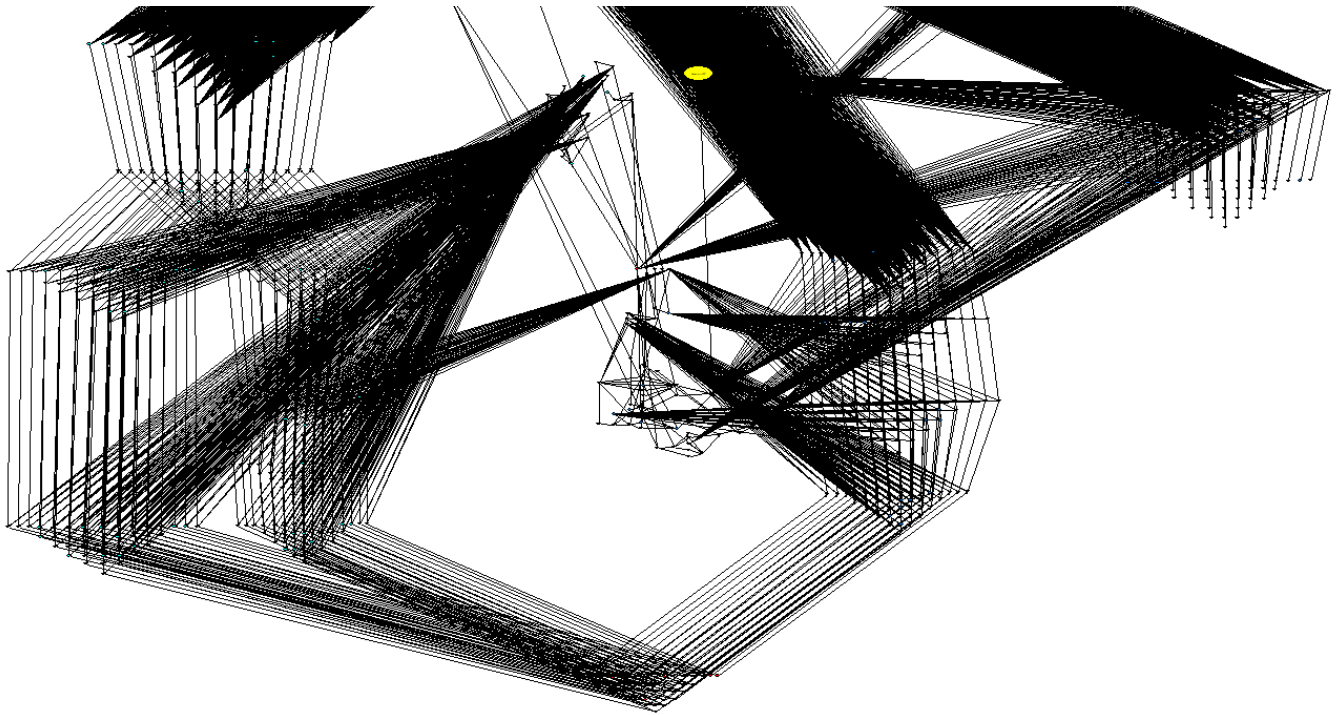


Figura 5.7: Red de distribución CFE

Lo siguiente es analizar las conexiones de la red completa CFE en diferentes partes como se pueden ver en las sub-figuras 5.8a, 5.8b, 5.8c, 5.8d y 5.8e:

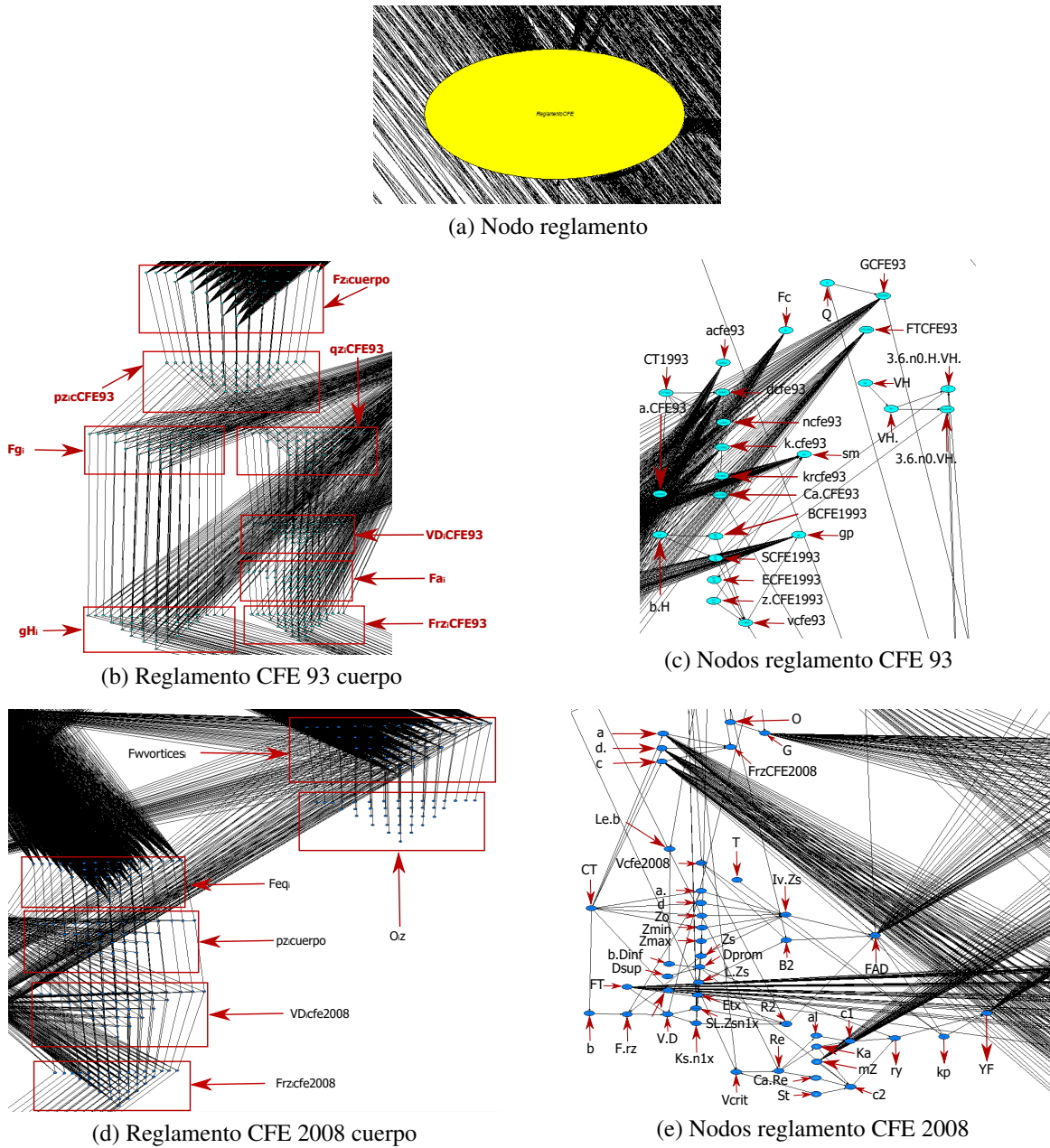


Figura 5.8: Redes reglamento CFE

El nodo Reglamento CFE de la sub-figura 5.8a es nodo padre de  $FVS_i$  (5.9a),  $FZ_i$ ,  $FX_i$ ,  $MY_i$  (5.12) y Eficiencia  $EFT_i$  (5.13). El nodo reglamento es nodo hijo o depende de Factor de Amplificación Dinámica (FAD),  $Fwvortices_i$ , Fuerza dinámica equivalente  $Feq_i$  y Presión de diseño del viento en accesorios  $pzACC$ . Para mayor referencia observar nomenclatura.

En los párrafos siguientes se describen los factores del reglamento donde las variables sin paréntesis son los nodos mostrados para UNINET y las variables con paréntesis son la nomenclatura original del reglamento referenciados, esto se debe a que los nodos UNINET no acepta simbología griega, latina, acentos, espacios, ni factores repetidos. También el coeficiente  $n_0$  es la frecuencia natural FN para los factores de CFE 1993 y  $n_{1,x}$  es la frecuencia para CFE 2008.

En la sub-figura 5.8b se describe el reglamento cfe 1993 para el cuerpo del monopolio donde la pirámide  $Frz_i$ :CFE93 es padre de  $Fa_i$  y es hijo Hanálisis,  $acfe93$  ( $\alpha$ ) y  $dcfe93$  ( $\delta$ ). La pirámide  $gH_i$  (g) es padre de  $Fg_i$  y es hijo de Hanálisis,  $dcfe93$  ( $\delta$ ),  $ncfe93$  ( $\eta$ ) y  $k$ :CFE93 ( $k'$ ). La pirámide  $Fa_i$  es padre de  $VD_i$ :CFE93 y es hijo de  $Fc$  y  $Frz_i$ :CFE93. La pirámide  $VD_i$ :CFE93 es padre de  $qz_i$ :CFE93 y es hijo de  $Fa_i$ ,  $FTCFE93$  (FT) y  $VR$ . La pirámide  $qz_i$ :CFE93 es padre de  $pz_i$ :CFE93 y es hijo de  $VD_i$ :CFE93 y  $GCFE93$  (G). La pirámide  $Fg_i$  es padre  $pz_i$ :CFE93 y hijo de  $gH_i$ ,  $sm$  ( $\sigma/\mu$ ) y  $gp$ . La pirámide  $pz_i$ :CFE93 es padre de  $Fz_i$ :cuerpo y es hijo de  $qz_i$ :CFE93 y  $Fg_i$ . La pirámide  $Fz_i$ :cuerpo es padre de  $FVS_i$  y es hijo de  $pz_i$ :CFE93.

En la sub-figura 5.8c se describen los factores del reglamento cfe 1993. La presión barométrica  $Q$  ( $\Omega$ ) es nodo padre de  $GCFE93$  (G) y  $Altitud$  (ASNM). El nodo  $GCFE93$  (G) es padre de  $qz_i$ :CFE93 y nodo hijo de  $Q$  ( $\Omega$ ) y  $temperatura$  media anual .t ( $\tau$ ). El nodo  $FTCFE93$  (FT) es padre de  $VD_i$ :CFE93 y no es nodo hijo. El nodo  $Fc$  es padre de  $Fa_i$  y no es nodos hijo. El nodo  $acfe93$  ( $\alpha$ ) es padre de  $Frz_i$ :CFE93 y no es nodo hijo. El nodo  $CT1993$  (CT) es padre de  $dcfe93$  ( $\delta$ ),  $ncfe93$  ( $\eta$ ),  $k$ :CFE93 ( $k'$ ),  $krcfe93$  (kr) y  $a$ :CFE93 ( $\alpha'$ ), no tiene nodos hijos. El nodo  $dcfe93$  ( $\delta$ ) es padre de  $Frz_i$ :CFE93,  $gH_i$  y  $Ca$ :CFE93 ( $Ca'$ ), es nodo hijo de  $CT1993$  (CT). El nodo  $ncfe93$  ( $\eta$ ) es padre de  $gH_i$  y es nodo hijo de  $CT1993$  (CT). El nodo  $k$ :CFE93 ( $k'$ ) es padre de  $gH_i$  y es nodo hijo de  $CT1993$  (CT). El nodo  $krcfe93$  (kr) es padre de  $sm$  ( $\sigma/\mu$ ) y es nodo hijo de  $CT1993$  (CT). El nodo  $a$ :CFE93 ( $\alpha'$ ) es padre de  $Ca$ :CFE93 ( $Ca'$ ) y es nodo hijo de  $CT1993$  (CT). El nodo  $Ca$ :CFE93 ( $Ca'$ ) es padre de  $sm$  ( $\sigma/\mu$ ) y es hijo  $a$ :CFE93 ( $\alpha'$ ),  $FTCFE93$  (FT),  $dcfe93$  ( $\delta$ ) y  $Htotal$  (H). El nodo  $sm$  ( $\sigma/\mu$ ) es padre de  $Fg_i$  y es hijo de  $z$ :CFE1993 ( $\zeta$ ),  $krcfe93$  (kr),  $Ca$ :CFE93 ( $Ca'$ ),  $BCFE1993$  (B),  $SCFE1993$  (S) y  $ECFE1993$  (E). El nodo  $b$ :H (b/H) es padre de  $BCFE1993$  (B) y  $SCFE1993$  (S) e hijo de  $DIIT16$  (b). El nodo  $BCFE1993$  (B) es padre  $sm$  ( $\sigma/\mu$ ) y  $vcfe93$  (v), es hijo de  $b$ :H (b/H). El nodo  $SCFE1993$  (S) es padre  $sm$  ( $\sigma/\mu$ ) y  $vcfe93$  (v), es hijo de  $b$ :H (b/H) y  $3.6.n0.H.VH$ . ( $3.6*n_0*(H/VH')$ ). El nodo  $ECFE1993$  (E) es padre de  $sm$  ( $\sigma/\mu$ ) y  $vcfe93$  (v), es hijo de  $3.6.n0.VH$ . ( $3.6*n_0*/VH'$ ). El nodo  $z$ :CFE1993 ( $\zeta$ ) es padre  $sm$  ( $\sigma/\mu$ ) y  $vcfe93$  (v), no es nodo hijo. El nodo  $gp$  es padre de  $Fg_i$  y es hijo de  $vcfe93$  (v). El nodo  $vcfe93$  (v) es padre de  $gp$  y es hijo de  $BCFE1993$  (B),  $SCFE1993$  (S),  $ECFE1993$  (E),  $z$ :CFE1993 ( $\zeta$ ) y  $FN$  ( $n_0$ ). El nodo  $VH$  es padre de  $VH$ . ( $VH'$ ), el coeficiente  $VH$  es la velocidad de diseño  $VD$ . El nodo  $VH$ . ( $VH'$ ) es padre  $3.6.n0.H.VH$ . ( $3.6*n_0*(H/VH')$ ) y  $3.6.n0.VH$ . ( $3.6*n_0*/VH'$ ), es hijo de  $VH=VD$ . El nodo  $3.6.n0.H.VH$ . ( $3.6*n_0*(H/VH')$ ) es padre de  $SC-$

FE1993 (S) e hijo de VH. (VH'), FN ( $n_0$ ) y Htotal (H). El nodo 3.6.n0.VH. ( $3.6*n_0*/VH'$ ) es padre de ECFE1993 (E) e hijo de VH. (VH') y FN ( $n_0$ ).

En la sub-figura 5.8d se describe el reglamento cfe 2008 para el cuerpo del monopolio donde la pirámide Frz<sub>i</sub>CFE2008 es padre de VD<sub>i</sub>CFE2008 y es hijo de Hanálisis, a ( $\alpha$ ), d. ( $\delta$ ) y c. La pirámide VD<sub>i</sub>CFE2008 es padre de pz<sub>i</sub>cuerpo e hijo de Frz<sub>i</sub>CFE2008, FT y VR. La pirámide pz<sub>i</sub>cuerpo es padre de Feq<sub>i</sub> e hijo de VD<sub>i</sub>CFE2008 y G. La pirámide Feq<sub>i</sub> es padre de Reglamento CFE y FVS<sub>i</sub> e hijo de pz<sub>i</sub>cuerpo y FAD. La pirámide O<sub>i</sub>z ( $\Phi_{1,x}(Z)$ ) es padre de Fwvortices<sub>i</sub> ( $F_w(Z)$ ), no es pirámide hijo. La pirámide Fwvortices<sub>i</sub> ( $F_w(Z)$ ) es padre de Reglamento CFE y FVS<sub>i</sub> e hijo O<sub>i</sub>z ( $\Phi_{1,x}(Z)$ ), YF ( $Y_F$ ), mZ ( $m(Z)$ ) y FN ( $n_{1,x}$ ).

En la sub-figura 5.8e se describen los factores del reglamento cfe 2008. La presión barométrica O ( $\Omega$ ) es nodo padre de G y Altitud (ASNМ). El nodo G es padre de pz<sub>i</sub>cuerpo y nodo hijo de O ( $\Omega$ ) y temperatura media anual .t ( $\tau$ ). El nodo FrzCFE2008 (Frz) es hijo de Htotal (H), a ( $\alpha$ ), d. ( $\delta$ ) y c, no es nodo padre. El nodo a ( $\alpha$ ) es padre del nodo FrzCFE2008 (Frz) y la pirámide Frz<sub>i</sub>CFE2008 e hijo de categoría de terreno CT. El nodo d. ( $\delta$ ) es padre del nodo FrzCFE2008 (Frz) y la pirámide Frz<sub>i</sub>CFE2008 e hijo de categoría de terreno CT. El nodo c es padre del nodo FrzCFE2008 (Frz) y la pirámide Frz<sub>i</sub>CFE2008 e hijo de categoría de terreno CT. El nodo Le.b (Le/b ó H/b ( $D_{inf}$ )) es nodo hijo de Htotal (H) y b.Dinf (b ( $D_{inf}$ )), no es nodo padre. El nodo CT es padre de a ( $\alpha$ ), d. ( $\delta$ ), c, a. ( $\alpha'$ ), d ( $\delta$ ),  $Z_0$ ,  $Z_{mín}$ , a.. ( $\bar{\alpha}$ ) y b ( $\bar{b}$ ), no es nodo hijo. El nodo b ( $\bar{b}$ ) es padre de F.rz ( $F'_{rz}$ ) y es hijo de CT. El nodo Vcfe2008 (v) es padre  $k_p$  e hijo de frecuencia natural FN ( $n_{1,x}$ ), R2 ( $R^2$ ) y B2 ( $B^2$ ). El nodo T es padre de  $k_p$ , no es nodo hijo. El nodo a. ( $\alpha'$ ) es padre de F.rz ( $F'_{rz}$ ) y de Iv.Zs ( $I_v(Z_s)$ ), es hijo de CT. El nodo d. ( $\delta$ ) es padre de Iv.Zs ( $I_v(Z_s)$ ) e hijo de CT. El nodo  $Z_0$  es padre de Iv.Zs ( $I_v(Z_s)$ ) e hijo de CT. El nodo  $Z_{mín}$  es padre de L.Zs ( $L(Z_s)$ ) y de Iv.Zs ( $I_v(Z_s)$ ) e hijo de CT. El nodo  $Z_{máx}$  es padre de Iv.Zs ( $I_v(Z_s)$ ), no es nodo hijo. El nodo  $Z_s$  es padre de F.rz ( $F'_{rz}$ ), L.Zs ( $L(Z_s)$ ), Ks.n1x ( $K_s(n_{1,x})$ ) y de Iv.Zs ( $I_v(Z_s)$ ), es hijo de Htotal (H). El nodo b.Dinf (b ( $D_{inf}$ )) es padre de Le.b (Le/b) y  $D_{prom}$ , no es nodo hijo. El nodo  $D_{sup}$  es padre de  $D_{prom}$ , no es nodo hijo. El nodo FT es padre de V.D (V'D) y VD<sub>i</sub>CFE2008, no es nodo hijo. El nodo a.. ( $\bar{\alpha}$ ) es padre de L.Zs ( $L(Z_s)$ ) e hijo de CT. El nodo F.rz ( $F'_{rz}$ ) es padre de V.D (V'D) e hijo de b ( $\bar{b}$ ), a. ( $\alpha'$ ) y  $Z_s$ . El nodo V.D (V'D) es padre SL.Zsn1x ( $S_L(Z_s, n_{1,x})$ ) y Ks.n1x ( $K_s(n_{1,x})$ ) e hijo de FT, F.rz ( $F'_{rz}$ ) y VR. El nodo  $D_{prom}$  es padre de Ks.n1x ( $K_s(n_{1,x})$ ),  $c_2$  y ry ( $\sigma_y$ ) e hijo de  $D_{sup}$  y b.Dinf (b ( $D_{inf}$ )). El nodo L.Zs ( $L(Z_s)$ ) es padre de B2 ( $B^2$ ) y SL.Zsn1x ( $S_L(Z_s, n_{1,x})$ ), es hijo de  $Z_{mín}$ ,  $Z_s$  y a.. ( $\bar{\alpha}$ ). El nodo Etx ( $\zeta_{t,x}$ ) es padre de R2 ( $R^2$ ), no es nodo hijo. El nodo SL.Zsn1x ( $S_L(Z_s, n_{1,x})$ ) es padre de R2 ( $R^2$ ) e hijo de V.D (V'D), L.Zs ( $L(Z_s)$ ) y FN ( $n_{1,x}$ ). El nodo Ks.n1x ( $K_s(n_{1,x})$ ) es padre de R2 ( $R^2$ ) e hijo de V.D (V'D),  $D_{prom}$ ,  $Z_s$  y FN ( $n_{1,x}$ ). El nodo Iv.Zs ( $I_v(Z_s)$ ) es padre  $F_{AD}$  e hijo de  $Z_s$ , a. ( $\alpha'$ ),  $Z_{máx}$ ,  $Z_{mín}$ ,  $Z_0$  y d. ( $\delta$ ). El nodo B2 ( $B^2$ ) es padre de Vcfe2008 (v) y  $F_{AD}$ , es hijo de Htotal (H) y

L.Zs ( $L(Z_s)$ ). El nodo R2 ( $R^2$ ) es padre de Vcfe2008 ( $v$ ) y  $F_{AD}$ , es hijo de Etx ( $\zeta_{t,x}$ ), SL.Zsn1x ( $S_L(Z_s, n_{1,x})$ ) y Ks.n1x ( $K_s(n_{1,x})$ ). El nodo  $V_{crit}$  es padre  $R_e$  e hijo de  $S_t$ , DIIT16 ( $b(D_{inf})$ ) y FN ( $n_{1,x}$ ). El nodo  $R_e$  es padre de  $a_L$ ,  $K_a$  y el coeficiente de arrastre del número de Reynolds Ca.Re, es hijo  $V_{crit}$  y DIIT16 ( $b(D_{inf})$ ). El nodo  $a_L$  es padre de  $c_1$  e hijo de  $R_e$ . El nodo  $K_a$  es padre de  $c_1$  y  $c_2$  e hijo de  $R_e$ . El nodo  $mZ$  ( $m(Z)$ ) es padre de  $c_1$ ,  $c_2$  y  $F_{wvortices_i}$  ( $F_w(Z)$ ), no es nodo hijo. El nodo Ca.Re es padre de  $c_2$  e hijo de  $R_e$ . El nodo  $S_t$  es padre de  $V_{crit}$  y  $c_2$ , no es nodo hijo. El nodo  $c_1$  es padre  $\sigma_y$  ( $\sigma_y$ ) e hijo de  $mZ$  ( $m(Z)$ ),  $a_L$  y  $K_a$ . El nodo  $c_2$  es padre de  $\sigma_y$  ( $\sigma_y$ ) e hijo de  $K_a$ , Ca.Re,  $D_{prom}$ ,  $mZ$  ( $m(Z)$ ) y  $S_t$ . El nodo  $\sigma_y$  ( $\sigma_y$ ) es padre de YF e hijo de  $D_{prom}$ ,  $c_1$  y  $c_2$ . El nodo  $kp$  es padre de YF y  $F_{AD}$  e hijo de Vcfe2008 ( $v$ ) y T. El nodo YF es padre de  $F_{wvortices_i}$  ( $F_w(Z)$ ) e hijo de  $\sigma_y$  ( $\sigma_y$ ) y  $kp$ . El nodo  $F_{AD}$  es padre de Reglamento CFE y  $Feq_i$  e hijo de B2 ( $B^2$ ), R2 ( $R^2$ ), Iv.Zs ( $I_v(Z_s)$ ) y  $kp$ .

#### 5.2.2.4. Fuerzas de viento en el cuerpo del monopolo:

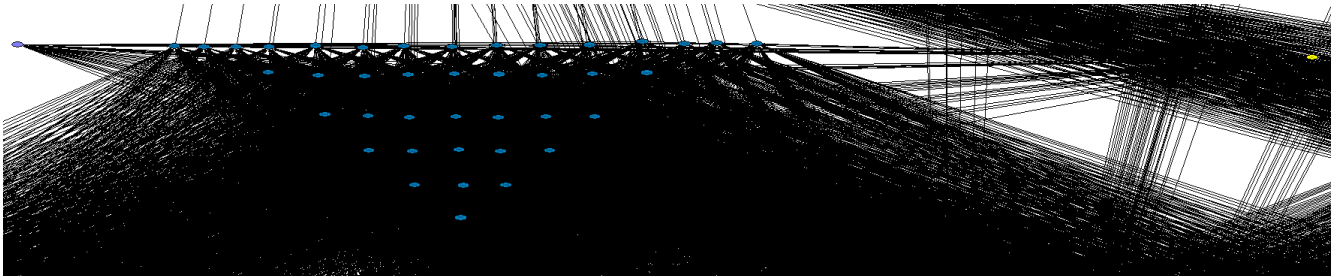
Las variables intermedias de diseño implican las fuerzas de viento del cuerpo del monopolo por tramo ( $FVS_i$ ) ver figura 4.20, donde se ven que son 40 fuerzas repartidas en las barras. En la sub-figura 5.9a se aprecian los nodos que modelan la carga de viento (de color azul), representan los que se observan en la figura 3.2 a lo largo del cuerpo de la estructura. La red de viento en el cuerpo del monopolo están conectados entre sí donde  $FVS_1$  se conecta con las 39 restantes,  $FVS_2$  con la  $FVS_3$  y sucesivas hasta la  $FVS_{40}$ . También se puede observar en la sub-figura 5.9a los nodos conectados a los extremos de las fuerzas de viento  $FVS_i$  que son el coeficiente de arrastre del cuerpo  $C_{acuerpo}$  (de color morado) y el número de tramos NT (de color amarillo).

En la sub-figura 5.9b las áreas expuestas (de color naranja) del cuerpo están conectadas a la fuerza de viento  $FVS_i$  de la sub-figura 5.9a. La pendiente (de color verde esmeralda) está conectado a las áreas expuestas y los diámetros internos inferiores  $DIIT_{ij}$  y los diámetros internos superiores  $DIST_{ij}$  están conectadas a la pendiente. En la sub-figura 5.9b se modelan los diámetros internos inferiores  $DIIT_{ij}$  (color verde limón) del lado izquierdo y los diámetros internos superiores  $DIST_{ij}$  (color verde limón) del lado derecho en nodos probabilísticos ambas variables conectados entre sí. Los diámetros del lado izquierdo está conectado desde DIIT16 hasta DIIT10\_6 y los diámetros del lado derecho está conectado desde DIST16 hasta DIST10\_6 donde dependen de la cantidad de espesores que se evaluen en el diseño. En la figura 5.4 se pueden observar estas conexiones.

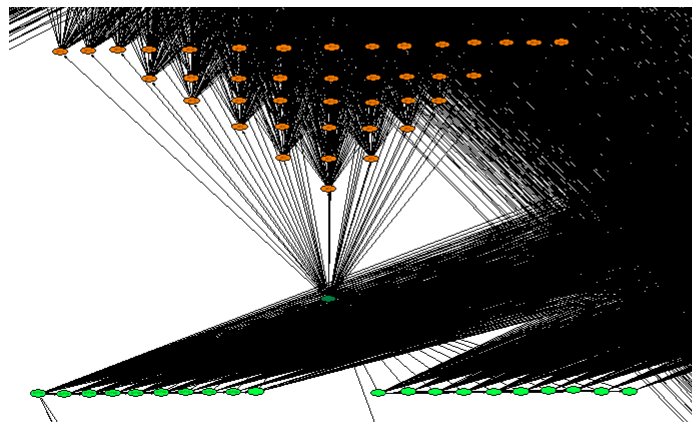
Las dependencias de las variables de la sub-figura a son: Coeficiencia de arrastre del cuerpo  $C_{acuerpo}$  no tienen dependencias, número de tramos NT no tiene dependencias y las fuerzas de viento del cuerpo del monopolo  $FVS_i$  depende del número de tramos NT, las áreas expuestas del cuerpo  $AE_i$ , Reglamento CFE, Fuerza de inercia por unidad de longitud perpendicular al flujo

del viento  $F_{wvortices_i}$ , Fuerza dinámica equivalente  $F_{eq_i}$  y Fuerza de viento del cuerpo aplicada a una altura  $Z$  ( $F_{z_i \text{ cuerpo}}$ ).

Las dependencias de las variables de la sub-figura b son: Las áreas expuestas del cuerpo dependen de la pendiente, la pendiente depende los diámetros  $DIIT_{ij}$  y los diámetros  $DIST_{ij}$ , y los diámetros  $DIIT16$  y  $DIST16$  no tiene dependencias mientras los diámetros  $DIIT26-DIIT10\_6$  y  $DIST26-DIST10\_6$  dependen de sus nodos predecesores.



(a) Fuerza de viento en el cuerpo



(b) Diámetros, Pendiente y Áreas del cuerpo

Figura 5.9: Red de carga viento en el cuerpo del monopolo

#### 5.2.2.5. Pesos:

En esta parte toca analizar los pesos que están subdivididos en varias partes (Peso de Accesorios, Peso del Cuerpo, Peso por Tramo, Peso de Equipo y Pesos de Camuflaje todos conectados a Peso Total) que se pueden ver en la figura 5.10:

1. Pesos de Accesorios  $PAN_i$  (de color verde limón) son nodos probabilísticos conectadas entre sí y están conectadas a Peso Total (de color rojo) que es un nodo funcional donde  $i$  es de 2 a 41, los pesos que se consideran son los Fedders (Líneas alimentadoras), Escalera y Cama Guía (Ondas).

2. Peso Cuerpo (de color verde esmeralda) también es un nodo funcional conectado a Peso Total y es el peso total de todo el monopolo analizando las barras.
3. Peso por tramo  $PT_{ij}$  (de color verde menta) son nodos probabilísticos conectados entre sí y al nodo funcional Peso Cuerpo. Sirve para analizar las barras del monopolo por tramo y varía según la cantidad de espesores y diámetros a utilizar en el diseño, tenemos 6 opciones de pesos por tramo (si en el número de tramos es 5 se suman el tramo PT11-PT51 primer renglón de la pirámide izquierda y se excluyen las demás, si en el número de tramos es 6 se suman el tramo PT12-PT62 segundo renglón de la pirámide izquierda, si en el número de tramos es 7 se suman el tramo PT13-PT73 tercer renglón de la pirámide izquierda, si en el número de tramos es 8 se suman el tramo PT14-PT84 cuarto renglón de la pirámide izquierda, si en el número de tramos es 9 se suman el tramo PT15-PT95 quinto renglón de la pirámide izquierda o si en el número de tramos es 10 se suman el tramo PT16-PT10\_6 sexto renglón de la pirámide izquierda).
4. Peso de Equipo  $PEquipo_i$  (de color rosa) son nodos probabilísticos conectados al Peso Total donde  $i$  varía de 17 a 41 según el nodo, donde está conectado el accesorio del equipo a la barra y también dependiendo de las conexiones que requiere cada cliente (o proveedor) que también está conectada al Peso Total y a la Frecuencia Natural FN.
5. Peso de Camuflaje  $PCamuflaje_i$  (de color naranja) son nodos probabilísticos conectados al nodo probabilístico de variable discreta Camuflaje (de color morado) y al nodo funcional Peso Total. Por último, el nodo Camuflaje está conectado a la Frecuencia Natural FN y al Peso Total.

Las dependencias de las variables son: Peso de Accesorios del nodo 2 no tiene dependencias mientras los nodos 3-41 dependen de los nodos predecesores de accesorios. Peso Cuerpo depende del número de tramos NT (color amarillo) y los Pesos por Tramo  $PT_{ij}$ , Pesos por Tramo depende de los espesores por tramo, los diámetros por tramo y de los pesos por tramo predecesor dependiendo el tramo de análisis. Peso de Equipo no tiene dependencias, Cliente depende de los nodos Peso de Equipo, Peso de Camuflaje y Camuflaje depende los nodos Pesos de Camuflaje y de los CamuflajeFz.

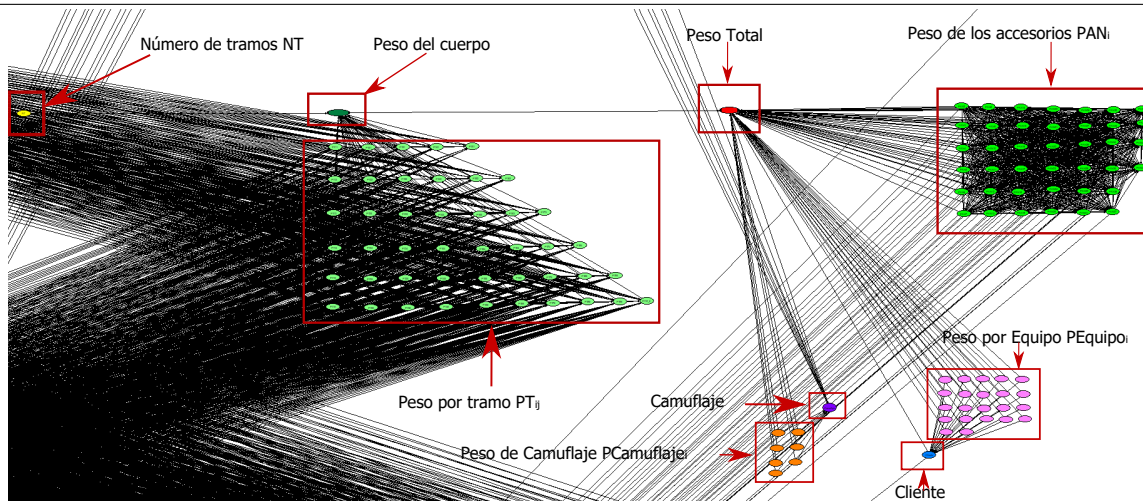


Figura 5.10: Pesos del monopolo

**5.2.2.6. Aceleración sísmica:**

En esta ocasión toca observar las cargas por sismo, en la figura 5.11 las aceleraciones sísmicas AC1-AC32 (de color naranja) están conectadas a las eficiencias, el cortante basal dinámico CBD (de color rojo) y  $Zona_{ij}$  o Zona Sísmica-Tipo de Terreno (de color café) están conectadas a las aceleraciones sísmicas. Las eficiencias se pueden observar en la figura 5.13.

Las aceleraciones sísmicas son el espectro sísmico en 32 coeficientes donde hay espectro base (espectro no factorizado o 1a. iteración), espectro de refuerzo (espectro factorizado o 2a. iteración) y espectro de desplazamientos. Después de terminar las dos iteraciones se obtiene el cortante basal dinámico (CBD), el análisis se puede ver en la subsección 4.1.6.

Las dependencias de las variables son: las aceleraciones sísmicas dependen de Cortante Basal Dinámico y  $Zona_{ij}$ , Cortante Basal Dinámico depende de Frecuencia Natural FN y  $Zona_{ij}$  no tiene dependencias.

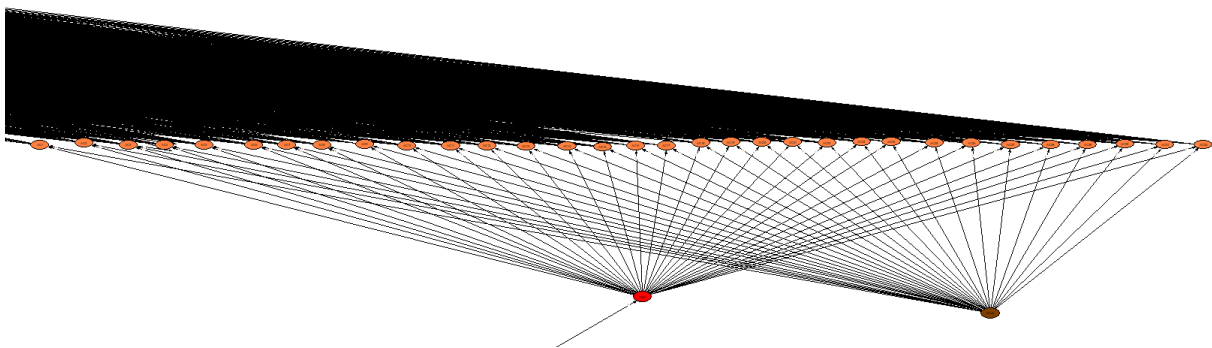


Figura 5.11: Aceleraciones sísmicas

**5.2.2.7. Fuerzas de viento en accesorios:**

Los coeficientes de esta sección son las fuerzas de vientos de viento de los accesorios, las cargas tendrán dos opciones de análisis donde unos diseños tienen camuflaje y los otros diseños no lo tienen. Estas fuerzas de camuflaje sólo lo tienen 3 diseños de los 65 establecidos en la muestra, el fin de estos de estos camuflajes en los monopolos es darle un modo estético a la estructura y la red se encargará de condicionarlo donde el número 1 no tiene camuflaje y el número 2 si tiene camuflaje, ver explicación en este inciso 5 de la sección pesos. Las cargas con camuflaje que se usarán para esta sección son las fuerzas de viento en accesorios con camuflaje FVACC y CamufleFz.

En la figura 5.12 las fuerzas de viento en accesorios con camuflaje FVACC (de color verde olivo) están conectados a las eficiencias, el coeficiente de arrastre con radome Ca.Radome está conectado a las fuerzas de viento de accesorios sin camuflaje con Radome FZ (de color verde limón) y son nodos padres de las eficiencias, el coeficiente Cs está conectado a las fuerzas de viento de accesorios sin camuflaje con Radome FX (de color naranja) que conectan a las eficiencias, el coeficiente Cm está conectado a las fuerzas de viento en momento en accesorios sin Camuflaje con Radome MY (de color shiraz = una mezcla de color rosa y rojo) que están conectadas a las eficiencias. Las variables de color morado son las cargas de viento en accesorios como coeficiente de arrastre sin radome  $CaACC_i$ , área expuesta en accesorios  $AeACC_i$ , presión actuante en accesorios  $pZACC_i$ , las fuerzas de viento en accesorios sin camuflaje sin Radome  $FzACC_i$  están conectadas a las variables  $FZ_i$ ,  $FX_i$  y  $MY_i$  y  $CamufleFz_i$  también está conectada a las variables antes mencionadas y a la variable Camuflaje.

Las dependencias de las variables son: las fuerzas de viento de accesorios con camuflaje FVACC dependen de reglamento CFE, los coeficientes Ca.Radome, Cs y Cm no tienen dependencias, las variables  $FZ_i$  dependen de Ca.Radome y reglamento CFE, las variables  $FX_i$  dependen de Cs y reglamento CFE, las variables MY dependen de Cm y reglamento CFE. Las variables  $CaACC_i$ ,  $AeACC_i$ ,  $pZACC_i$ ,  $FzACC_i$  y  $CamufleFz_i$  no tienen dependencias.

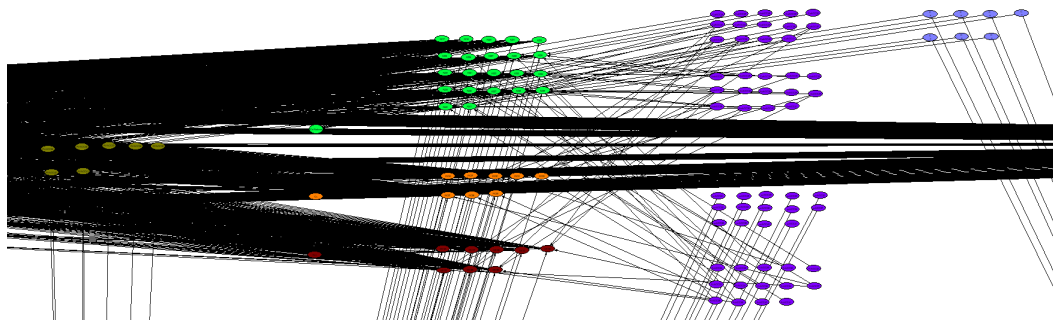


Figura 5.12: Fuerza de viento en accesorios

**5.2.2.8. Eficiencia:**

Las salidas implican determinar los diámetros internos por diseño, pesos de los tramos de acuerdo al diseño, espesores por tramos y eficiencias por tramo. En la figura 5.13 se aprecia la construcción del modelo de dependencia, considerando que el modelo estructural se divide en 40 barras (ver figura 4.20) para las eficiencias ( $EFT_i$ ), son nodos probabilísticos de color amarillo. El monopolo de la figura 5.13 se revisa de acuerdo a los formatos AWS o LRFD bajo sus condiciones aisc-h1-3 [24] en las barras del 1 al 29 y aisc-h1-1 [24] de la barra 30 al 40, por lo tanto las combinaciones de resistencia van conectadas a las eficiencias de cada barra para seguir el reglamento AISC para estructuras de acero.

Las eficiencias ( $EFT_i$ ) también están conectados a los espesores de la figura 5.25b se modelan en la parte baja de la figura 5.13 como nodos discretos (de color morado), que representan los espesores que pueden ser 3/16", 1/4", 5/16", 3/8", 1/2", 5/8", 3/4" y 7/8". Podrían ser los 10 por qué cubren todas los posibles diseños, y están conectados entre si para determinar la influencia entre ellos.

La variable diseño de color verde es una variable discreta que representa opciones de diseño, siendo el diseño 1 con 8 tramos donde el ET1 es de 1/4" de espesor, ET2 es de 5/16" de espesor, ET3 es de 3/8" de espesor, ET4 es de 1/2" de espesor, ET5-ET6 son de 5/8" de espesor, ET7 es de 3/4" de espesor y ET8 es de 7/8" de espesor. El diseño 2 tiene 7 tramos donde el ET1-ET7 son de 1/4" de espesor, etc.

Las dependencias de las variables son las siguientes: los espesores no tienen dependencias, diseño depende de los espesores ET1-ET10 y las eficiencias EFT1-40 dependen de diseño, reglamento CFE, fuerza de viento de accesorios con camuflaje FVACC17-41, fuerza de viento de accesorios sin camuflaje FZ17-41, fuerza de viento de accesorios sin camuflaje con Radome FX17-41, fuerza de viento en momento en accesorios sin Camuflaje con Radome MY17-41 y aceleraciones sísmicas o espectro sísmico AC1-32.

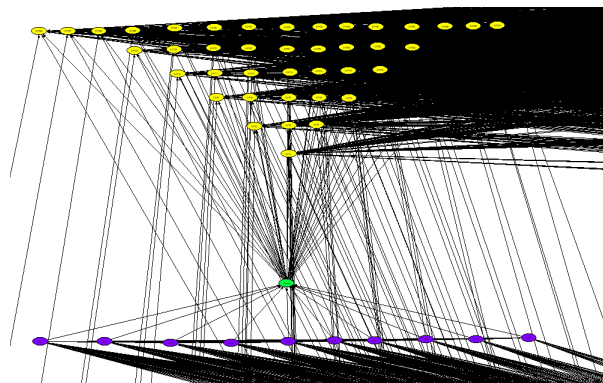


Figura 5.13: Red eficiencia, combinación diseño y espesores

## **5.3. ANÁLISIS PDF Y CDF EN UNINET.**

Esta última sección se describen las variables en UNINET con muestreo en modo Analytical Conditioning y Análisis de sensibilidad UNISENS o UNIGRAPH. Mientras está en el modo ANALYTICAL CONDITIONING, el usuario puede muestrear una distribución (condicional) eligiendo el menú SAMPLE (MUESTRA) y seleccionando SAMPLE BAYESIAN BELIEF NET. El usuario debe elegir uno o más tipos de archivo y nombres de archivo. \*.SAM y \*.SAE son archivos ascii, el primero es una lista simple, el último es un archivo separado por comas compatible con XLS. Cuando la condicionalización está activa, la muestra condicional se escribe en el archivo. Estos pueden verse y analizarse desde el menú POST-PROCESAMIENTO eligiendo UNIGRAPH o UNISENS ( ref. [1]).

### **5.3.1. Analytical Conditioning:**

La elección del modo MODELO DE MUESTREO activa el condicionamiento basado en muestras. Esto se puede aplicar tanto a nodos probabilísticos como funcionales. Mientras que el condicionamiento analítico condiciona valores únicos de las variables de condicionamiento (probabilidad), el condicionamiento basado en muestras condiciona en intervalos. Al elegir CONDICIONAMIENTO BASADO EN MUESTRA, se le pide al usuario que especifique los nodos de entrada y salida. Los nodos de entrada son aquellos sobre los que deseamos condicionar. Los nodos de salida son aquellos para los que deseamos ver los efectos de la condicionalización (ref. [1]).

#### **5.3.1.1. Variables condicionadas:**

En esta sección se busca que la distribución de los monopolos sea lo menos costoso, por eso es importante observar las distancias que generan las gráficas analizadas de los pesos del cuerpo del monopo y del peso total tanto en su PDF como en CDF, ver subsección 2.3.1 y 2.3.2. Para comenzar a analizar se van a condicionar variables de la red completa que sean favorables para el diseño y observar la variación que obtiene analizando una variable específica, ver red completa de la figura 5.4. Se recomienda comenzar con la condicionalización de los espesores pero en los 65 monopolos hay 26 combinaciones de espesor y esa variable se llama “Diseño”. Al analizar la variable, se van a especificar los coeficientes que faltan para generar la gráfica y si necesita corrección se analiza otro diseño. Para iniciar se propone empezar con el Diseño 5 por tener el más alto porcentaje (20 %) mostrado en la figura 5.14:

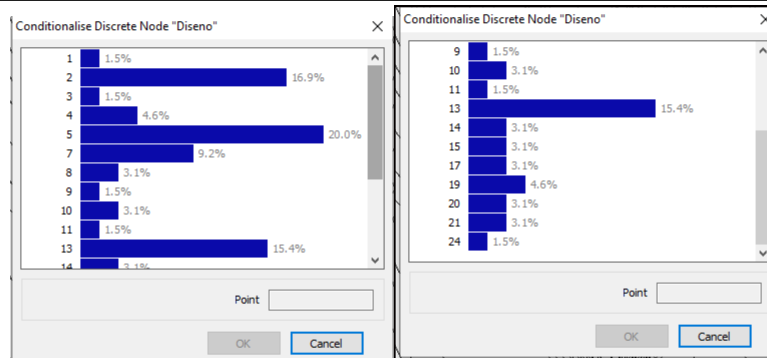


Figura 5.14: Diseño

Condicionar muestras:

- Diseño 5: En esta combinación tiene el número de tramos  $NT=6$ ; donde los espesores  $ET_1=ET_2=ET_3=ET_4=ET_5=ET_6=2$  siendo este número  $1/4''$  de espesor, ver tabla de espesores en el glosario de términos para ver su nomenclatura numérica. El reglamento es 1 (CFE 1993), Cliente=10 (Misesa), se propone pendiente del 80% o 0.8. También se proponen los siguientes coeficientes en percentil 95%  $DIIT=0.9048$  m,  $DIST=0.76572$  m y  $FVS_1 = 1056.3$  kg/m. Ver distribución analizada en la figura 5.15:

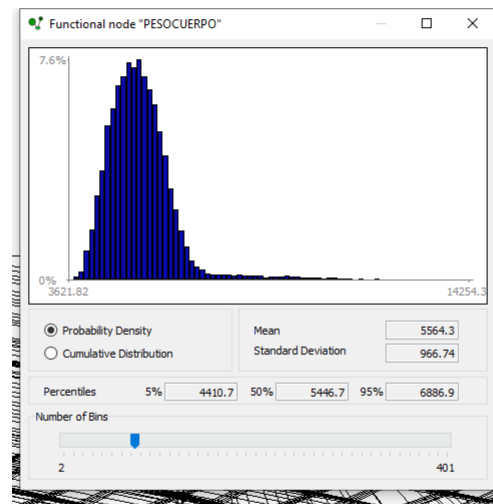


Figura 5.15: Peso Cuerpo Diseño 5

Se llega a la conclusión que tiene una distancia muy larga y se recomienda condicionar una eficiencia  $EFT_i$ , ya que la media  $\mu$  es 5564.3 kg y el peso del cuerpo tiene un intervalo de  $[2765.588, 3866.792]$ kg. Se condiona  $EFT_2$  con un percentil del 95% es 0.972, ver figura 5.16:

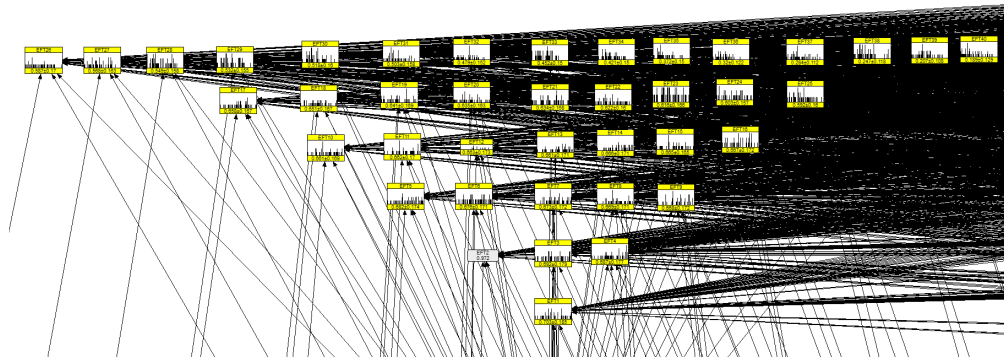


Figura 5.16: Eficiencia-Diseño 5

Se descondiciona diseño 5 y se observa su histograma para condicionar un nuevo diseño de la figura 5.17:

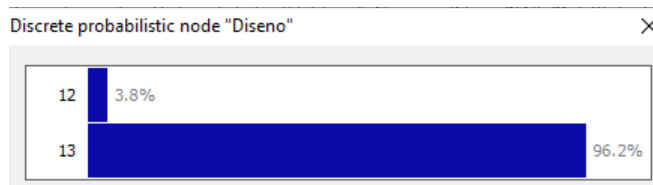


Figura 5.17: Histograma nuevo diseño 13

Por lo tanto, se recomienda analizar el diseño 13 donde tiene 96.2%.

- **Diseño 13:** En esta combinación tiene el número de tramos  $NT=8$ ; donde los espesores  $ET_1=ET_2=ET_3=ET_4=ET_5=ET_6=ET_7=ET_8=2$  siendo este número 1/4" de espesor, ver tabla de espesores en el glosario de términos para ver su nomenclatura numérica. El reglamento es 1 (CFE 1993), Cliente=2 (Tech Machindra I), se propone pendiente del 82% o 0.82. También se dejan los mismos coeficientes en percentil 95%  $DIIT=0.9048$  m,  $DIST=0.76572$  m y  $FVS_1 = 1056.3$  kg/m. Ver distribución analizada en la figura 5.18:

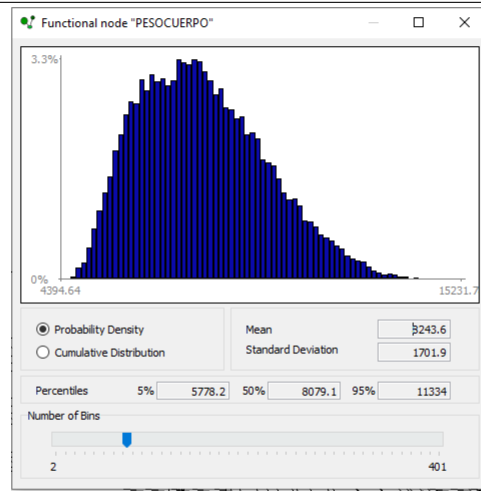


Figura 5.18: Peso Cuerpo Diseño 13

Se llega a la conclusión que tiene una distancia muy larga y se recomienda condicionar otra eficiencia  $EFT_i$ , ya que la media  $\mu$  es 8243.6 kg y el peso del cuerpo tiene un intervalo de [4370.652, 5501.339]kg. Se condiciona  $EFT_{32}$  con un percentil del 95 % es 0.91, ver figura 5.19:

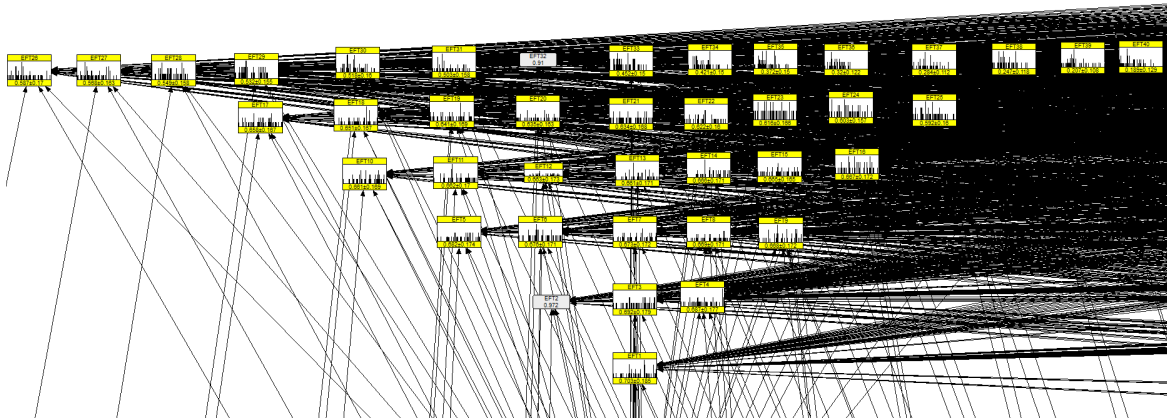


Figura 5.19: Eficiencia-Diseño 13

Se descondiciona diseño 13 y se observa su histograma para condicionar un nuevo diseño de la figura 5.20:

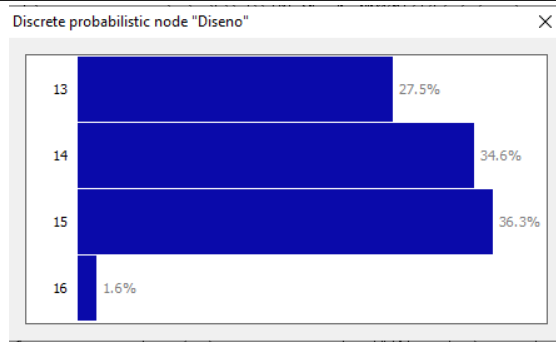


Figura 5.20: Histograma nuevo diseño 15

Por lo tanto, se recomienda analizar el diseño 15 donde tiene 36.3%.

- Diseño 15: En esta combinación tiene el número de tramos  $NT=9$ ; donde los espesores  $ET_1=ET_2=ET_3=2$ ,  $ET_4=ET_5=ET_6=ET_7=3$  y  $ET_8=ET_9=4$  siendo espesores de 1/4", 5/16" y 3/8" respectivamente, ver tabla de espesores en el glosario de términos para ver su nomenclatura numérica. El reglamento es 1 (CFE 1993), Cliente=19 (Tech Machindra III), se propone pendiente del 85% o 0.85. También se dejan los mismos coeficientes en percentil 95%  $DIIT=0.9048$  m,  $DIST=0.76572$  m y  $FVS_1 = 1056.3$  kg/m. Ver distribución analizada en la figura 5.21:

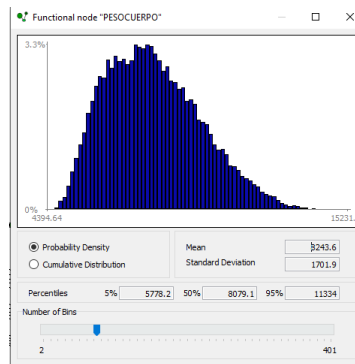


Figura 5.21: Peso Cuerpo Diseño 15

Las distancias se están acortando aunque la gráfica sigue sin estar centrada, la media  $\mu$  es 8243.6 kg y el peso del cuerpo es 8083.236 kg. Para obtener una mejor gráfica y con valores menos costosos, se descondiciona diseño 15 y se observa su histograma para condicionar un nuevo diseño de la figura 5.22:

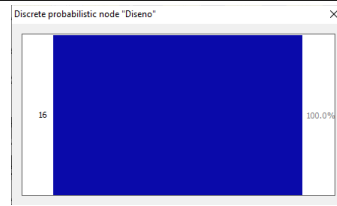


Figura 5.22: Histograma nuevo diseño 16

- Diseño 16: En esta combinación tiene el número de tramos  $NT=5$ ; donde los espesores  $ET_1=ET_2=2$ ,  $ET_3=3$ ,  $ET_4=4$  y  $ET_5=5$  siendo espesores de 1/4", 5/16", 3/8" y 1/2" respectivamente, ver tabla de espesores en el glosario de términos para ver su nomenclatura numérica. El reglamento es 1 (CFE 1993), Cliente=8 (Proyectos de telecomm móviles I), se propone pendiente del 90% o 0.9. Se obtienen los siguientes coeficientes en percentil 95 %  $DIIT=0.9048$  m,  $DIST=0.76572$  m,  $FVS_1 = 1056.3$  kg/m,  $CBD=10014$  kg y  $FN= 1.2368$  Hz. También se van a condicionalizar coeficientes como ;  $EFT_2=0.972$ ,  $EFT_{32}=0.91$ ,  $Zona_{ij} = 8$ ,  $AC1= 0.86$  m/s<sup>2</sup>,  $H= 24$  m,  $PT_{11} = 2227.7$ kg,  $Altitud= 76$  msnm,  $t= 23.9^\circ C$  y  $VR=260$  km/hr. Ver distribución analizada en la figura 5.23:

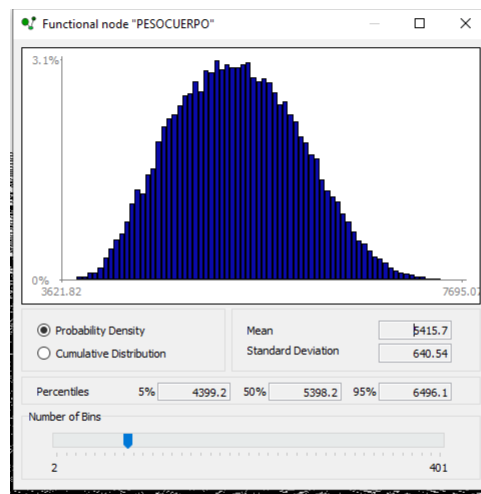


Figura 5.23: Peso Cuerpo Diseño 16

Se puede observar en la gráfica está centrada con una media  $\mu$  de 5415.7 kg y el peso cuerpo con un intervalo de [5167.37, 5219.405] kg. Estos nos indica que cuando se analiza un percentil del 95 % el peso más favorable está casi un 50 % dentro de la distribución.

## **5.4. OPTIMIZACIÓN DE LAS REDES BAYESIANAS EN LOS MONOPOLOS.**

Al terminar el análisis de confiabilidad lo siguiente es comparar las redes bayesianas (UNINET) con el modelo convencional (Excel y Staad Pro), se analiza el tiempo de 40 minutos con el método convencional y 8 minutos con las redes en UNINET. Por lo tanto, se llega a la conclusión de que el método de las redes bayesianas reducir el tiempo en un 20%.

## **5.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

Tras el análisis condicional de las 65 muestras de los monopolos calculados, se observa que los pesos más favorables (menos costosos) son la menor cantidad de tramos de un monopolito NT=5 donde sólo tiene 5 espesores. Por lo tanto, el software UNINET nos recomienda que una estructura más favorable y menos costosa es aquella que tengan menos cambios de espesores.

# CONCLUSIONES

Las Redes Bayesianas con el Software UNINET nos permiten hacer un análisis más práctico para una Torre de Telecomunicaciones tipo Monopolo. Haciendo uso de este programa y obteniendo resultados analizados anteriormente, el desarrollo con las redes en dicho software tiene sus ventajas y desventajas al analizar los coeficientes con una distribución de probabilidad conjunta.

## Ventajas:

- Todos sus coeficientes están disponibles para condicionar las variables del monopolio.
- Se reduce el menor tiempo posible el análisis de las redes bayesianas comparándolo con el método tradicional.
- Sus resultados son más precisos al estar conectados en una red conjunta.
- Puedes observar esos resultados favorables en gráficas para una mejor visibilidad.
- Se pueden excluir variables que no sean condicionadas.
- Se pueden conectar múltiples arcos en cuestión de segundos.
- Se pueden exportar los datos desde otro archivo de hoja de cálculo como Excel.

## Desventajas:

- La ayuda del Software UNINET es muy limitada para un usuario principiante y los tutoriales por internet son muy escasos.
- Este programa recomienda tener valores en sus coeficientes, ya que usualmente el programa excluye las variables con ceros o resultados con poco porcentaje de probabilidad.
- Se recomienda un programa con licencia comercial completa porque su licencia gratuita tiende a saturarse de información y llegar a bloquear el programa.
- En las gráficas de los percentiles para PDF y CDF sólo se pueden analizar 3 porcentajes: 5 %, 50 % y 95 %.

# GLOSARIO DE TÉRMINOS

## ■ Altura del monopolo (H):

Es la altura de la red de telecomunicaciones tipo monopolo que está compuesto de accesorios como feeders, escaleras, camuflajes bandera, parábolas, rru, antenas rf, etc. La altura del monopolo está representada por nodos siendo los nodos los extremos o las puntas de un miembro modelados en un programa de mecánica estructural que representa el cuerpo compuesto por placas, cada nodo o miembro están seccionados por placas de acero dando un total de 41 nodos o 40 miembros por monopolo, cada división que se aprecia a lo largo de la altura  $h$  de la figura 5.24 es un elemento barra en el programa de ingeniería estructural. *Su unidad está representada en metros (m).*

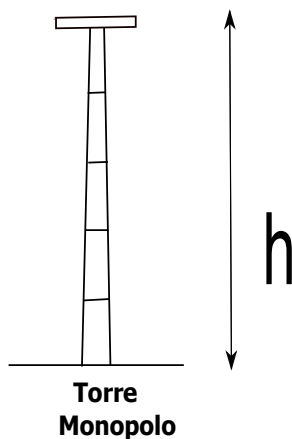


Figura 5.24: Altura de la torre monopolo

## ■ Velocidad regional (VR):

Es la máxima velocidad media probable de presentarse con un cierto periodo de recurrencia en una zona o región determinada del territorio. El periodo de recurrencia determina que velocidad regional, se considera de acuerdo al destino y la importancia de la infraestructura (ref. en [4][18][19]). *Su unidad está representada en kilómetros por hora (km/h).*

■ **Categoría de terreno (CT):**

Tanto en el procedimiento de análisis estático como en el dinámico, intervienen factores que dependen de las condiciones topográficas y de exposición locales del sitio en donde se desplantará la construcción, así como del tamaño de ésta. Por lo tanto, a fin de evaluar correctamente dichos factores, es necesario establecer clasificaciones de carácter práctico. El factor de exposición y el factor de la topografía deben relacionarse con las características del sitio de desplante de la estructura (ref. en [4][18][19]). *Su unidad es adimensional.*

■ **Factor topográfico (FT):**

El factor toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio en donde se desplantará la estructura. Así, por ejemplo, si la construcción se localiza en las laderas o cimas de colinas o montañas de altura importante, con respecto al nivel general del terreno de los alrededores, es probable que se generen aceleraciones del flujo del viento y, por consiguiente, deberá incrementarse la velocidad regional (ref. en [4][18][19]). *Su unidad es adimensional.*

■ **Temperatura media anual (Temp):**

Valor que se obtiene a partir del promedio de las temperaturas medias registradas en cada uno de los doce meses del año: su distribución, al igual que la precipitación, es muy irregular, y también está estrechamente ligada a la configuración del relieve. Este valor afecta al factor alpha para determinar la carga de viento (ref. en [4][18][19]). *Su unidad está representada en grados Celsius (°C).*

■ **Altura sobre el nivel del mar (ASNМ):**

Es la distancia vertical de un punto de la Tierra con respecto al nivel del mar, llamada elevación sobre el nivel medio del mar, en contraste con la altura, que indica la distancia vertical existente entre dos puntos de la superficie terrestre (ref. en [10]). *Su unidad está representada en metros sobre el nivel del mar (msnm).*

■ **Zona Sísmica:**

Zonas activas de la corteza terrestre muy propensas a sufrir movimientos sísmicos y que es propia de la región; coinciden con las zonas de impacto o roce de las placas. Esta clasificación es para la regionalización sísmica de México como se muestra en la tabla 5.1 que depende de los reglamentos (ref. en [6][21]) y *su unidad es adimensional:*

	Zona Sísmica
1	A
2	B
3	C
4	D

Tabla 5.1: Zona sísmica

■ **Tipo de Suelo:**

Para tomar en cuenta la amplificación dinámica de la respuesta sísmica por efectos de suelo en el que se desplante la estructura, se consideran los suelos típicos que se indican a continuación, cuya clasificación se basa en los resultados de la exploración geotécnica realizada, aplicando métodos reconocidos de dinámica de suelos. Se usará la nomenclatura equivalente para algunas de las variables como se muestra en la sig. tabla 5.2 que depende de los reglamentos (ref. en [6][21]) y *su unidad es adimensional:*

	Tipo de Suelo
1	Suelo tipo I
2	Suelo tipo II
3	Suelo tipo III

Tabla 5.2: Tipo de Suelo

■ **Zona sísmica-Tipo de Terreno ( $Zona_{ij}$ ):**

Es la unión de la clasificación de la zona sísmica y el tipo de suelo que nos ayudará para el análisis de la base de datos en UNINET que se puede ver en la tabla 5.3. *Su unidad es adimensional.*

	$Zona_{ij}$
1	AI
2	AII
3	AIII
4	BI
5	BII
6	BIII
7	CI
8	CII
9	CIII
10	DI
11	DII
12	DIII

Tabla 5.3: Zona sísmica-Tipo de Suelo

■ **Reglamento:**

Se aplicarán los reglamento necesarios de acuerdo a las características del monopolio y que son mostradas en el siguiente tabla 5.4 y *su unidad es adimensional:*

	Reglamento
1	CFE 1993 (ref. en [6][18])
2	CFE 2008 (ref. en [19][21])
3	TIA G 222 (ref. en [4])

Tabla 5.4: Reglamento

■ **Pendiente (PD):**

La pendiente es la inclinación de la recta con respecto al eje de abscisas, con ella nos servirá para encontrar el DII (Diámetro Interno Inferior) del monopolo, su DIS (Diámetro Interno Superior) y su geometría como se muestra en la figura 5.25a. Para calcular la pendiente de la recta de la ecuación 5.1 en un sistema de representación rectangular (de un plano cartesiano), suele estar representada por la letra **m**, y está definida como la distancia en el eje Y dividido por la diferencia en el eje X para dos puntos distintos en una recta. También un tipo de ecuación lineal es la forma punto-pendiente, la cual nos proporciona la pendiente de una recta y las coordenadas de un punto en ella. En la ecuación 5.2, *m* es la pendiente &  $(x_1, y_1)$  son las coordenadas del punto. Las ecuaciones para calcular la pendiente se muestran a continuación, *con la unidad que se mide en porcentaje (%)*:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad (5.1)$$

$$(y - y_1) = m(x - x_1). \quad (5.2)$$

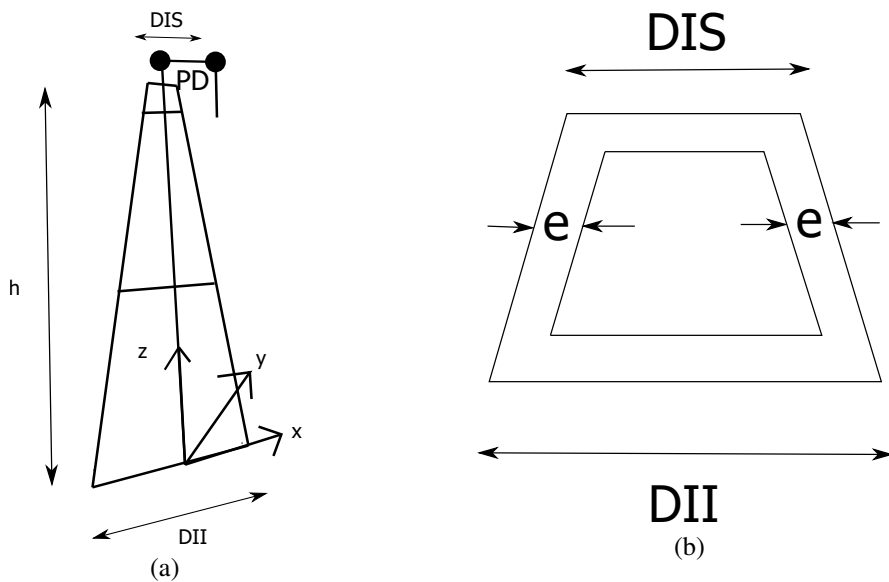


Figura 5.25: Estructura del monopolo: a) Pendiente del monopolo, b) Diámetros externos e internos y espesor del monopolo

■ **Fuerza de viento en condición de resistencia (FVS):**

Son las fuerzas del viento en estructura principal calculadas en los diseños del monopolo y éstas dependen de la velocidad regional y de otros factores que están establecidos en los reglamentos, se reparten en 40 elementos que se puede ver en la figura 5.26 y en las referencias en [18][19]. Su unidad está representada en kilogramos por metro (kg/m).

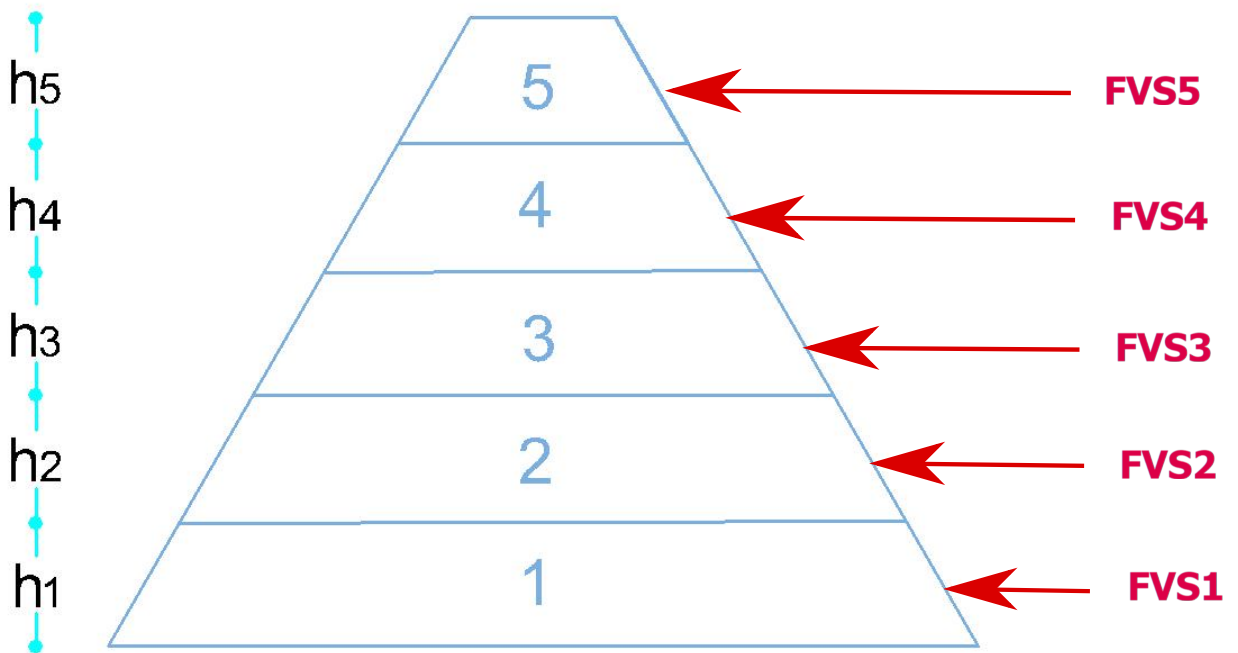


Figura 5.26: Fuerza de viento en el cuerpo del monopolo

■ **Fuerza de viento en accesorios (FACCij):**

Son las fuerza de viento en los accesorios del monopolo como son camuflaje, brazo bandera, antenas rf, rru, parabolas, etc. y se aplican en 41 nodos, ver variable FACCij en la figura 3.2. Su unidad está representada en kilogramos por metro (kg/m).

■ **Frecuencia natural (FN):**

Las frecuencias a las que vibra un sistema bajo vibración libre son las frecuencias naturales del sistema. Son propiedades del sistema dinámico que dependen de su distribución de masa y rigidez, ver figura 5.27. Para el caso de un sistema con un único grado de libertad  $u(t)$ , formado por una masa  $m$  unida al suelo mediante un resorte de rigidez  $K$ , sólo existe una frecuencia natural ( $\omega_n$ ) y se calcula como:  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$  (ref. en [8]). Su unidad está representada por Hertz (Hz).

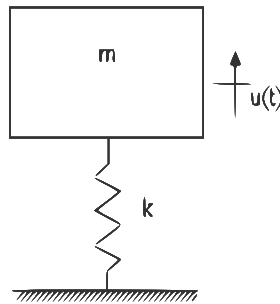


Figura 5.27: Frecuencia natural

■ **Cortante basal dinámico (CVD):**

El cortante basal en una edificación es la acumulación progresiva de las fuerzas cortantes de cada piso, el cual se refleja en la base del mismo. Estos cortantes en cada piso no son más que la aplicación de la fuerza sísmica en un nivel determinado y que se va acumulando a medida que nos vamos acercando a la base. Este procedimiento es muy útil cuando las edificaciones son regulares en todo aspecto (elevación, cargas y plantas) y se desea utilizar el método estático equivalente. Su unidad está representada por kilogramos (kg).

■ **Peso de accesorios (PANij):**

Es el peso total de los accesorios que conforman el monopolio en cada uno de sus nodos (desde 2 a 41, el 1 no se toma porque es el soporte) que se representa con el diseño en el modelo estructural de la red bayesiana, ver PANij en la figura 3.2. Su unidad está representada por kilogramos (kg).

■ **Número de tramos (Ntr):**

El número de tramos es la cantidad de tramos derivados de la pendiente y diámetros propuestos. Su unidad es adimensional.

■ **Peso del cuerpo de monopolio tramo (PCTij):**

Es el peso total del cuerpo del monopolio en cada uno de sus miembros (desde 1 a 40), ver PCTij en la figura 3.2. Su unidad está representada por kilogramos (kg).

■ **Espesor (ET):**

Se denomina espesor al grosor de un elemento: es decir, a qué tan grueso, abultado o ancho es. La idea de espesor también puede vincularse a la condensación o la densidad de una sustancia. Ver la forma del espesor en las figuras 5.25b y 3.4, y su nomenclatura en la tabla 5.5. *Su unidad está representada por pulgadas (plg):*

	Espesor
1	3/16"
2	1/4"
3	5/16"
4	3/8"
5	1/2"
6	5/8"
7	3/4"
8	7/8"

Tabla 5.5: Nomenclatura de los espesores

■ **Diámetro interno inferior tramo (DIITij) y Diámetro interno superior tramo (DITij):**

Son los diámetros internos de las placas de acero del monopolo, cada tramo tiene una forma trapezoidal que tiene una base mayor y una base menor, y que dependen de la pendiente general, ver figuras 5.25b y 5.26 para observar su forma. *Su unidad está representada por metros (m).*

■ **Eficiencia (EF):**

El diseño de acuerdo con las disposiciones de Diseño en Base a Resistencias Admisibles (ASD) satisface los requisitos de esta Especificación cuando la resistencia admisible de cada componente estructural es mayor o igual a la resistencia requerida determinada de acuerdo con las combinaciones de carga ASD, entre 0 y 1.0 (ref. en [11]). *Su unidad es adimensional.*

■ **Zonas de viento:**

Son las zonas activas del viento de la república mexicana, en las figura 5.28 se muestra el mapas de isotacas regionales correspondientes al periodos de retorno de 200 recomendado para el diseño por viento de estructuras de los Grupos A, B y C, respectivamente (ref. en [19]). *Su unidad está representada en kilometros por hora (km/h).*

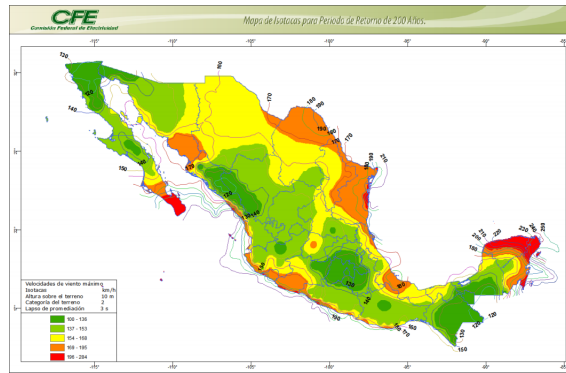


Figura 5.28: Mapas de isotacas para velocidades regionales con periodo de retorno de 200 años.

■ **Coefficiente  $\bar{b}$ :**

Es un coeficiente para obtener el factor de exposición, sus valores están representados en la siguiente tabla 5.6. *Su unidad es adimensional.*

Categoría de terreno	$\bar{b}$	$\alpha'$
1	1.17	0.12
2	1.00	0.16
3	0.77	0.21
4	0.55	0.29

Tabla 5.6: Los valores de  $\bar{b}$  y  $\alpha'$  para cada categoría de terreno

■ **Constantes  $\bar{\alpha}$  y  $\bar{d}$ :**

Son los exponentes para obtener la longitud de la escala de la turbulencia, en donde  $z_{m\acute{a}x} = 200$  m y los valores de las constantes  $\bar{d}$ ,  $z_0$ ,  $z_{m\acute{i}n}$  y  $\bar{\alpha}$  se toman de la siguiente tabla 5.7. *Su unidad es adimensional.*

Categoría de terreno	$\bar{d}$	$z_0$	$z_{m\acute{i}n}$	$\bar{\alpha}$
1	0.15	0.01	1	0.44
2	0.19	0.05	2	0.52
3	0.29	0.30	5	0.61
4	0.43	1.0	10	0.67

Tabla 5.7: Valores de las constantes para obtener el índice de turbulencia

■ **Altura de análisis (Hanálisis):**

Es la altura que se analiza en cada elemento del cuerpo y cada nodo de los accesorios del monopolo, se puede ver en la figura 5.29. *Su unidad está en metros (m).*

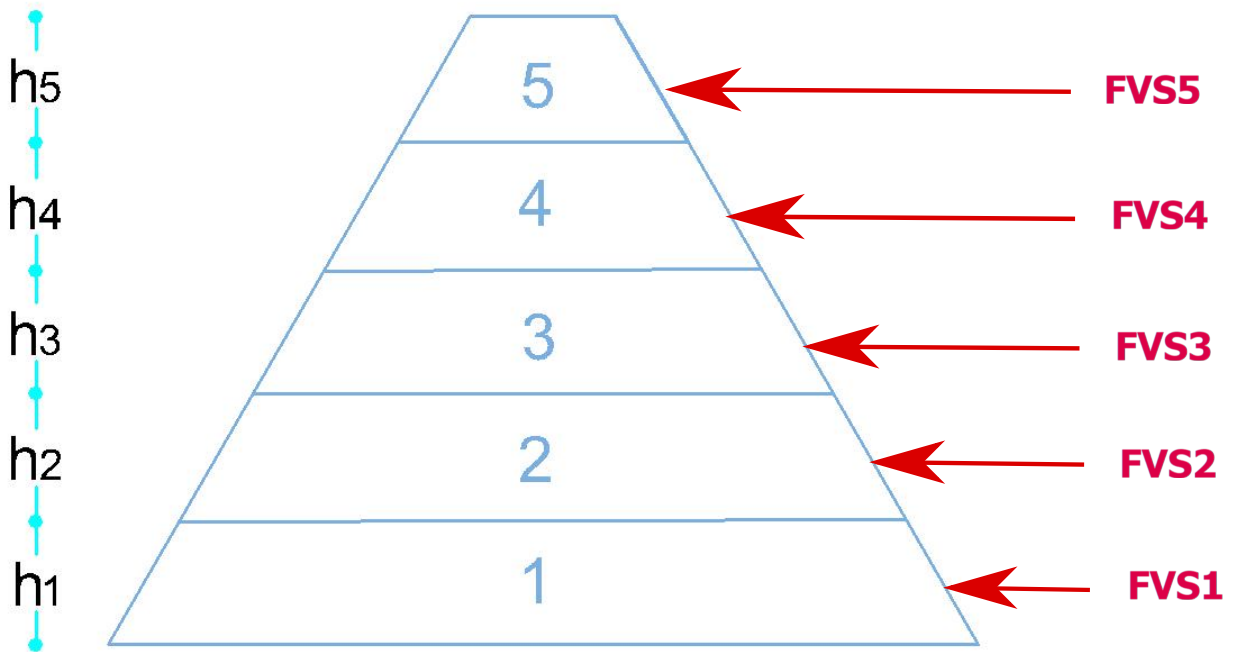


Figura 5.29: Altura de análisis

■ **Ciente:**

Es el proveedor que elabora y entrega los materiales para el monopolo, según las dimensiones especificadas de la zona en construcción. En la tabla 5.8 se puede observar la nomenclatura del cliente y sus versiones. *La unidad es adimensional.*

	Ciente
1	VANT EXGON I
2	TECH MAHINDRA I
3	GRUPO ERA I
4	CONEX I
5	THREE TOWERS
6	UNITI LATAM
7	TORRECOM I
8	PROYECTOS DE TELECOMM MOVILES I
9	SITE4TECH I
10	MISESA
11	AMERICAN TOWER
12	TOWER ONE
13	CONSERCOBRA
14	MTP I
15	TELESITES
16	VANT EXGON II
17	VANT EXGON III
18	TECH MAHINDRA II
19	TECH MAHINDRA III
20	TECH MAHINDRA IV
21	GRUPO ERA II
22	GRUPO ERA III
23	CONEX II
24	CONEX III
25	CONEX IV
26	TORRECOM II
27	PROYECTOS DE TELECOMM MOVILES II
28	PROYECTOS DE TELECOMM MOVILES III
29	SITE4TECH II
30	MTP II

Tabla 5.8: Nomenclatura cliente

■ **Modelo Estructural monopolo:**

Es la torre monopolo de la estructura dividida en sus barras y nodos, ver figura 5.30. *Su unidad es adimensional.*

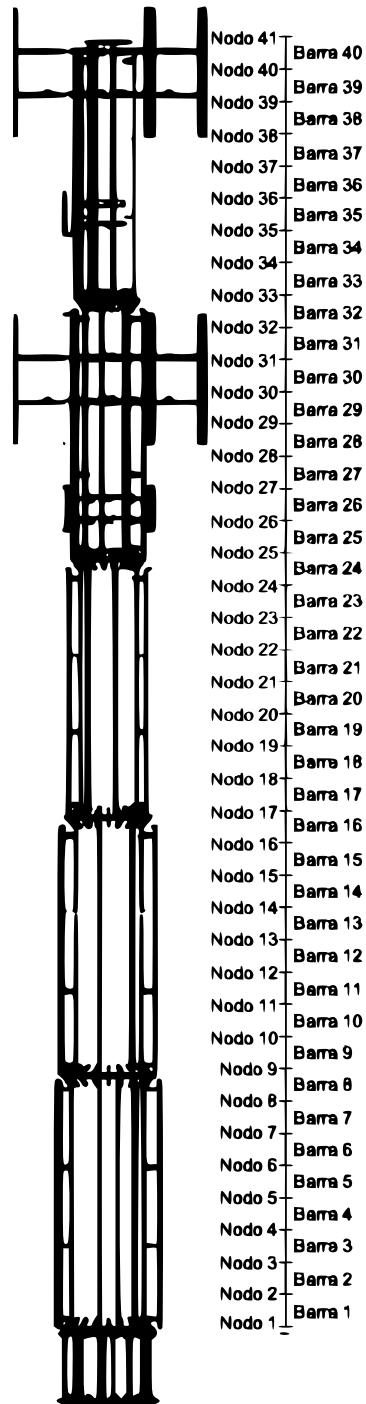


Figura 5.30: Torre Monopolo

# Nomenclatura

## Simbología General

$M$  Simulación Monte Carlo

$U$  UNINET

$PDF$  Probability Density Function

$CDF$  Cumulative Density Function

$Q$  Carga

$R$  Resistencia

## Simbología Reglamento CFE 1993

$ASN M$  Altura sobre el nivel mar, en m

$H$  Altura total del monopolo, en m

$VR$  Velocidad Regional del viento que ocurre a una altura de 10 metros sobre el nivel del terreno plano de una región particular en la República Mexicana, está asociada con periodos de retorno de 10, 50 o 200 años, en km/h

$\tau$  Temperatura ambiental, en  $^{\circ}C$

$\Omega$  Presión Barométrica, en mm de Hg

$G$  Factor de corrección por temperatura y por altura respecto al nivel del mar, (adimensional)

*Clase* Clase de estructura según su tamaño

$\alpha$  Exponente de la ley de variación de la velocidad del viento con la altura; depende de la rugosidad del terreno, (adimensional)

$CT$	Categoría de terreno, (adimensional)
$F_{rz}$	Factor que determina la variación de la velocidad del viento con la altura $Z$ en función de la rugosidad del terreno que circunda a la estructura, (adimensional)
$F_{\alpha}$	Factor de exposición que toma en cuenta el efecto combinado de la rugosidad del sitio, del tamaño de la construcción y de la variación de la velocidad del viento con la altura, (adimensional)
$F_c$	Factor que toma en cuenta el tamaño de la construcción o elemento estructural, (adimensional)
$\delta$	Altura gradiente por encima de la cual se supone que la velocidad del viento no varía con la altura, en m
$\eta$	Factor de ráfaga que depende de la rugosidad del terreno, (adimensional)
$k'$	Factor de ráfaga que depende de la rugosidad del terreno, (adimensional)
$kr$	Factor de ráfaga que depende de la rugosidad del terreno, (adimensional)
$\alpha'$	Exponente de la ley de variación del factor de ráfaga con la altura; depende de la rugosidad del terreno, (adimensional)
$C\alpha'$	Factor utilizado en el cálculo del factor de respuesta dinámica, (adimensional)
$b$	Dimensión de desplante de la torre (Diámetro Interno "DIIT16"), en m
$b/H$	Dimensión de desplante de la estructura sobre altura total del monopolo, (adimensional)
$B$	Factor de excitación de fondo, (adimensional)
$S$	Factor de reducción por tamaño, (adimensional)
$E$	Factor que representa la relación entre la energía de ráfaga con la frecuencia natural de la estructura, (adimensional)
$\zeta$	Coefficiente de amortiguamiento crítico, (adimensional)
$v$	Coefficiente de rapidez de fluctuación promedio, en Hertz(Hz)
$gp$	Factor pico o de respuesta máxima o de efecto máximo de la carga por viento, (adimensional)

$g$	Factor de ráfaga; representa la relación entre velocidades asociadas con diferentes lapsos de promediación, (adimensional)
$gH$	Factor de ráfaga calculado para $Z=H$ , (adimensional)
$\sigma/\mu$	Variación de las fluctuaciones de una variable considerada para un sitio dado, (adimensional)
$VD$	Velocidad de diseño del viento, en km/h
$F_g$	Factor de respuesta dinámica debida a ráfagas, (adimensional)
$VH$	Velocidad de diseño a la altura $H$ , en km/h
$VH'$	Velocidad media de diseño a la altura $H$ , en km/h
$n_0$	Frecuencia natural de la estructura para reglamento CFE93, en Hertz(Hz)
$3.6 * n_0 / VH'$	Inverso de la longitud de onda, en ondas/m
$3.6 * n_0 * (H / VH')$	Frecuencia reducida, (adimensional)
$q_z$	Presión dinámica de base a la altura $Z$ , en $kg/m^2$
$p_z$	Presión de diseño del viento a la altura $Z$ , en $kg/m^2$
$PZA$	Pieza
$AE PZA$	Área expuesta sobre pieza, en metros cuadrados por pieza
$Ae$	Área expuesta total, en $m^2$
$Ca$	Coefficiente de arrastre para fuerza de viento en accesorios en la dirección $Z$ , (adimensional)
$Cs$	Coefficiente de arrastre para fuerza de viento en accesorios en la dirección $X$ , (adimensional)
$Cm$	Coefficiente de momento para fuerza de viento en accesorios en la dirección $Y$ , (adimensional)
$F_T$	Factor que permite considerar las características local de topografía, (adimensional)
$DIST/T$	Distancia entre tramos, en m

$F_z$  Fuerza aplicada a una altura  $Z$ , en kg

### **Simbología Reglamento CFE 2008**

$F_{AD}$  Factor de amplificación dinámica, (adimensional)

$c$  El coeficiente de escala de rugosidad, (adimensional)

$Le/b$  Es la relación de esbeltez, (adimensional)

$Le$  Es la longitud del elemento, en m

$b(D_{inf})$  Es el ancho del elemento normal al flujo del viento o el último tramo del Diámetro Interno, en m

$F'_{rz}$  Es el factor de exposición para la velocidad media, (adimensional)

$\alpha'$  Es el exponente de la variación de la velocidad con la altura, para cada categoría de rugosidad del terreno; corresponde a un intervalo de promediación de diez minutos. Cuando la altura sea mayor que 200 m, deberán realizarse otros estudios específicos avalados por expertos en la materia. Su unidad es adimensional

$Z_s$  Es la altura de referencia, en m

$I_v(Z_s)$  Es el índice de turbulencia, evaluado a la altura de referencia, (adimensional)

$Z_0$  Es la longitud de rugosidad del terreno, en m

$\bar{b}$  Es un coeficiente para obtener el factor de exposición, (adimensional)

$\bar{\alpha}$  Es el exponente para obtener la longitud de la escala de la turbulencia, (adimensional)

$\bar{d}$  Es el exponente para obtener la longitud de la escala de la turbulencia, (adimensional)

$Z_{m\acute{a}x}$  Es la altura máxima para la aplicación del método dinámico, en m

$Z_{m\acute{i}n}$  Es la altura mínima sobre la superficie del terreno para la aplicación del método dinámico, en m

$n_{1,x}$  Frecuencia natural de vibración de la estructura en la dirección longitudinal del viento para reglamento CFE2008, en Hertz(Hz)

$m$  Masa de la estructura por unidad de longitud, en kg/m

- $L(Z_s)$  Es la longitud de la escala de turbulencia a la altura de referencia, en m
- $K_s(n_{1,x})$  Factor de reducción de tamaño, (adimensional)
- $B^2$  Factor de reducción de tamaño, (adimensional)
- $D_{prom}$  Es el diámetro promedio de la sección transversal de la estructura, en m
- $D_{sup}$  Es el diámetro buscado para generar la geometría del monopolo o primer tramo del Diámetro Externo, en m
- $m_{total}$  Masa total de la estructura, en kg
- $R^2$  Factor de respuesta en resonancia, (adimensional)
- $T$  Intervalo de tiempo con el que se calcula la respuesta máxima, igual a 600 segundos.  
Unidad en s
- $S_L(Z_s, n_{1,x})$  Densidad de potencia del viento, (adimensional)
- $V_{crút}$  Velocidad crítica de aparición de vórtices periódicos, en m/s
- $V'_D$  Velocidad media de diseño del viento, en m/s
- $Y_{F,máx}$  Máximo desplazamiento transversal al flujo del viento, en m
- $\nu$  Es la frecuencia de cruces por cero o tasa media de oscilaciones, en Hertz(Hz)
- $k_p$  Es el factor pico, (adimensional)
- $\zeta_{t,x}$  Es la relación de amortiguamiento total, (adimensional)
- $m_r$  Es la masa generalizada de la estructura en la dirección longitudinal del viento, en kg
- $\lambda_m$  Es el coeficiente que determina la variación de la forma modal con la altura, (adimensional)
- $m(Z)$  Es el coeficiente que determina la variación de la forma modal con la altura, en kg/m
- $\Phi_{1,x}(Z)$  Es la configuración modal del primer modo en la dirección longitudinal del viento, (adimensional)
- $C_p$  Es el coeficiente de presión, (adimensional)

$c_1$ y $c_2$	Constantes para obtener la desviación estándar del desplazamiento transversal, (adimensionales)
$S_t$	Número de Strouhal, (adimensional)
$a_L$	Constante que limita las amplitudes de los desplazamientos de la estructura, (adimensional)
$K_a$	Factor de amortiguamiento aerodinámico, (adimensional)
$\sigma_y$	Desviación estándar del desplazamiento transversal al flujo del viento, en m
$Re$	Número de Reynolds, (adimensional)
$F_{eq}$	Fuerza dinámica equivalente, en Newton
$F_w(Z)$	Fuerza de inercia por unidad de longitud perpendicular al flujo del viento, en N/m
$ASN M$	Altura sobre el nivel mar, en m
$H$	Altura total del monopolo, en m
$VR$	Velocidad Regional del viento que ocurre a una altura de 10 metros sobre el nivel del terreno plano de una región particular en la República Mexicana, está asociada con periodos de retorno de 10, 50 o 200 años, en km/h
$\tau$	Temperatura ambiental, en $^{\circ}C$
$\Omega$	Presión Barométrica, en mm de Hg
$G$	Factor de corrección por temperatura y por altura respecto al nivel del mar, (adimensional)
$\alpha$	Exponente de la ley de variación de la velocidad del viento con la altura; depende de la rugosidad del terreno, (adimensional)
$CT$	Categoría de terreno, (adimensional)
$F_{rz}$	Factor que determina la variación de la velocidad del viento con la altura $Z$ en función de la rugosidad del terreno que circunda a la estructura, (adimensional)
$\delta$	Altura gradiente por encima de la cual se supone que la velocidad del viento no varía con la altura, en m

- VD* Velocidad de diseño del viento, en km/h
- $q_z$  Presión dinámica de base a la altura *Z*, en  $kg/m^2$
- $p_z$  Presión de diseño del viento a la altura *Z*, en  $kg/m^2$
- PZA* Pieza
- AEPZA* Área expuesta sobre pieza, en metros cuadrados por pieza
- Ae* Área expuesta total, en  $m^2$
- Ca* Coeficiente de arrastre para fuerza de viento en accesorios en la dirección *Z*, (adimensional)
- Cs* Coeficiente de arrastre para fuerza de viento en accesorios en la dirección *X*, (adimensional)
- Cm* Coeficiente de momento para fuerza de viento en accesorios en la dirección *Y*, (adimensional)
- F<sub>T</sub>* Factor que permite considerar las características local de topografía, (adimensional)
- DIST/T* Distancia entre tramos, en m
- $F_z$  Fuerza aplicada a una altura *Z*, en kg

### **Simbología UNINET**

- Q* Presión Barométrica( $\Omega$ ), en mm de Hg
- t* Temperatura ambiental( $\tau$ ), en  $^{\circ}C$
- DIIT16* Diámetro Interno Inferior Tramo 1 Diseño 6, en m
- FVACC<sub>i</sub>* Fuerza de Viento en Accesorios con Camuflaje donde *i* está en los nodos del modelo estructural [17,41]. Unidad en kg
- EFT<sub>i</sub>* Eficiencia tramo *i*, donde  $i=1,2,3,\dots,40$ , (adimensional)
- Diseno* El número de diseño depende de la cantidad de tramos y su respectivo espesor, (adimensional)
- ET<sub>i</sub>* Espesor tramo *i*, donde  $i=1,2,3,\dots,10$ . Unidad en pulgadas(plg)

*Hanalisis* Altura del cuerpo monopolo que varía cada tramo respecto a DIST/T, en m

*Ca* Coeficiente de arrastre para fuerza de viento en accesorios en la dirección Z, (adimensional)

*Cs* Coeficiente de arrastre para fuerza de viento en accesorios en la dirección X, (adimensional)

*Cm* Coeficiente de momento para fuerza de viento en accesorios en la dirección Y, (adimensional)

*FZ<sub>i</sub>* Fuerza de viento en accesorios sin Camuflaje, en la dirección Z donde i está entre los nodos de [17,41], en kg

*FX<sub>i</sub>* Fuerza de viento en accesorios sin Camuflaje con Radome, en la dirección X donde i está entre los nodos de [17,41], en kg

*MY<sub>i</sub>* Fuerza de viento en momento en accesorios sin Camuflaje con Radome, en la dirección Y donde i está entre los nodos de [17,41], en kg/m

*FN* Frecuencia Natural, en Hertz(Hz)

*ReglamentoCFE* Este nodo probabilístico nos indica el reglamento CFE a utilizar para el análisis de confiabilidad; es una variable discreta donde la variable 1 es CFE93 y la variable 2 es CFE 2008

*CBD* Cortante Basal Dinámico, en kg

*AC<sub>i</sub>* Aceleración sísmica del espectro sísmico donde  $i=1,2,3,\dots,32$ , (adimensional)

*PESOTOTAL* Es el peso total del cuerpo y de los accesorios del monopolo, en kg

*PA<sub>i</sub>* Es el peso de los accesorios del monopolo en los nodos, donde  $i=2,3,\dots,41$ , en kg

*PEquipo<sub>i</sub>* Es el peso del equipo del monopolo, donde i está entre los nodos de [17,41] en kg

*PCamuflaje<sub>i</sub>* Es el peso del camuflaje del monopolo, donde i está entre los nodos de [35,41] en kg

*Camuflaje* Este nodo probabilístico analiza si hay camuflaje o no en el monopolo, donde 1 es NO HAY CAMUFLAJE y 2 es SI HAY CAMUFLAJE

*Cliente* El proveedor del monopolo y sus respectivos accesorios

*PESOCUERPO* Es el peso total del cuerpo del monopolo, en kg

*PT<sub>ij</sub>* Es el peso del tramo que depende del peso del cuerpo del monopolo donde  $i=1,2,3,\dots,10$  y  $j=1,2,3,\dots,6$ , en kg

*NT<sub>i</sub>* Número de tramos donde  $i=5,6,7,\dots,10$ , (adimensional)

*FVS<sub>i</sub>* Fuerza de viento en el cuerpo del monopolo donde  $i=1,2,3,\dots,40$ , en kg

*AE<sub>i</sub>* Área expuesta en el cuerpo del monopolo donde  $i=1,2,3,\dots,40$ , en  $m^2$

*Pendiente* La pendiente del monopolo, en %

*DIIT<sub>ij</sub>* Diámetro Interno Inferior Tramo donde  $i=1,2,3,\dots,10$  y  $j=6$ , en m

*DIST<sub>ij</sub>* Diámetro Interno Superior Tramo donde  $i=1,2,3,\dots,10$  y  $j=6$ , en m

# Bibliografía

- [1] D Ababei, D Lewandowski, A Hanea, OM Napoles, D Kurowicka, and R Cooke. Uninet help documentation; report. *Delft University of Technology: Delft, The Netherlands*, 2008.
- [2] Juan Carlos López Agüí. *Guía básica para la simulación de Monte Carlo*. AENOR ediciones, 2008.
- [3] MA Al-Ansi, MAR Abdel-Moati, and IS Al-Ansari. Causes of fish mortality along the qatari waters (arabian gulf). *International Journal of Environmental Studies*, 59(1):59–71, 2002.
- [4] Electronic Industry Alliance. Telecommunications industry association (tia). *IS-95: Mobile Station-Base Station Compatibility Standard for Dual-Mode Wideband Spread Spectrum Cellular System*, 1993.
- [5] Charles Annis. Probabilistic life prediction isn't as easy as it looks. In *Probabilistic aspects of life prediction*. ASTM International, 2004.
- [6] Javier Avilés L. Manual de diseño por sismo. *Comisión Federal de Electricidad*, 1993.
- [7] Bentley. Technical reference manual. *STAAD.Pro V8i (SELECT series)*, 4, 2012.
- [8] Ximo Sancho Bru. Frecuencia natural. *Obtenido de Frecuencia Natural: [http://www.mecapedia.uji.es/frecuencia\\_natural.htm](http://www.mecapedia.uji.es/frecuencia_natural.htm)*, 2006.
- [9] Enrique Castillo, José Manuel Gutiérrez, and Ali S Hadi. Sistemas expertos y modelos de redes probabilísticas. *Academia de Ingenieria*, 1997.
- [10] colaboradores de Wikipedia. Efectos de la altitud en los humanos. *Wikipedia, la enciclopedia libre*, 2020.
- [11] AIOS Construction. Manual of steel construction: allowable stress design. *American Institute of Steel Construction: Chicago, IL, USA*, 1989.

- [12] Habib Joseph Dagher. Reliability-based design of utility pole structures. American Society of Civil Engineers Reston, Va, 2006.
- [13] Bruce Ellingwood, Theodore V Galambos, and James Grierson MacGregor. *Development of a probability based load criterion for American National Standard A58: Building code requirements for minimum design loads in buildings and other structures*, volume 13. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1980.
- [14] Theodore V Galambos and MK Ravindra. Load and resistance factor design. *Engineering Journal, AISC*, 18(3):78–84, 1981.
- [15] Anca Hanea, Oswaldo Morales Napoles, and Dan Ababei. Non-parametric bayesian networks: Improving theory and reviewing applications. *Reliability Engineering & System Safety*, 144:265–284, 2015.
- [16] Daniel Itenfisu, Ronald L Elliott, Richard G Allen, and Ivan A Walter. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the asce standardization effort. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(6):440–448, 2003.
- [17] JinHyung Kim and Judea Pearl. A computational model for causal and diagnostic reasoning in inference systems. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pages 0–0, 1983.
- [18] A López, IJ Vilar, CJ Muñoz, A Alanís, and PR De Buen. Manual de diseño por viento. *Comisión Federal de Electricidad, CFE-IIE, México*, 1993.
- [19] Alberto López López, Celso Joaquín Muñoz Black, and Luis Eduardo Pérez Rocha. *Manual de diseño de obras civiles: Diseño por viento*. Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas, 2008.
- [20] John S McNown, M ASCE, En-Yun Hsu, AM ASCE, and CHIA-SHUN YIH. Applications of the relaxation technique in fluid mechanics. In *Selected Papers By Chia-Shun Yih: (In 2 Volumes)*, pages 832–868. World Scientific, 1991.
- [21] U Mena and LE Pérez. Manual de diseño de obras civiles. *Diseño por sismo. Instituto de Investigaciones Eléctricas de la Comisión Federal de Electricidad. Editado por CFE México*, 2008.
- [22] US Mil-Hdbk. 217. *Reliability Prediction of Electronic Equipment, version F, DOD, USA*, 1991.

- [23] Harold Montes De Oca Caro. Evaluación del factor de seguridad en las pilas de puentes vehiculares de concreto reforzado sujeto a sismo y carga viva. 2017.
- [24] AISC (American Institute of Steel Construction). Ansi/aisc 360-16: specification for structural steel buildings. 2016.
- [25] Pablo Turnero, Monografias.com". Introducción a la fiabilidad, análisis de fallo, aplicación al diseño y al mantenimiento - monografias.com.
- [26] Judea Pearl. Probabilistic reasoning in intelligent systems. 1988. *San Mateo, CA: Kaufmann*, 23:33–34, 1988.
- [27] Dale C Perry, M ASCE, James R McDonald, Herbert S Saffir, and F ASCE. Performance of metal buildings in high winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 36:985–999, 1990.
- [28] Alain H Peyrot and Habib J Dagher. Reliability-based design of transmission lines. *Journal of Structural Engineering*, 110(11):2758–2777, 1984.
- [29] Hochschule Rhein-Waal. Lecture notes introduction to strength of materials. *Rhine-Waal University of Applied Sciences*, 2017.
- [30] Thomas Allen Short. *Electric power distribution handbook*. CRC press, 2003.