

01101 2ej. 4



DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
Facultad de Ingeniería

**PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA
UTILIZACION MECANICA OPTIMA DE
TORRES EN LINEAS DE TRANSMISION**

ERNESTO R. NERI BARRIO
TESIS

**PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO DE LA**

**FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERIA
(E S T R U C T U R A S)**

CIUDAD UNIVERSITARIA

1988

**TESIS CON
FALLA FS 0203**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

R E S U M E N

Se presenta un procedimiento para el análisis y revisión de torres de transmisión que, dado un criterio de diseño, permite determinar, mediante un simple producto matricial, todas aquellas condiciones de utilización en las cuales una torre de características específicas tiene un comportamiento estructural satisfactorio; con base en estos resultados es posible optimar su utilización mecánica. Este procedimiento ahora forma parte del Sistema Integrado para el Diseño Estructural de Torres de Transmisión, paquete tipo CAD/CAE desarrollado en el Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Se determinan los intervalos de utilización mecánica de una torre en particular aplicando el criterio establecido en el Capítulo C.2.3. del Manual de Diseño de Obras Civiles de la C.F.E. El análisis de la torre empleando diferentes modelos - armadura y marco tridimensionales, elástico lineal y no lineal - se compara con el comportamiento que exhibió la torre durante la prueba a escala natural.

C O N T E N I D O

1. **INTRODUCCION**
2. **SOLICITACIONES MECANICAS**
 - 2.1 **Condiciones básicas de carga**
 - 2.2 **Manejo de las cargas externas para análisis.**
3. **PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LOS INTERVALOS DE UTILIZACION MECANICA DE TORRES DE TRANSMISION**
 - 3.1 **Planteamiento básico**
 - 3.2 **Implantación del Procedimiento**
4. **EJEMPLO DE APLICACION**
5. **COMPARACION DE RESULTADOS:
ANALITICOS VS. PRUEBA A ESCALA NATURAL**
6. **CONCLUSIONES**
7. **REFERENCIAS**

APENDICE A:

Tabla A.1 Catálogo de Perfiles

**Resultados para la Máxima Utilización
en la Zona Eólica B**

APENDICE B:

Cálculo de Cargas Externas

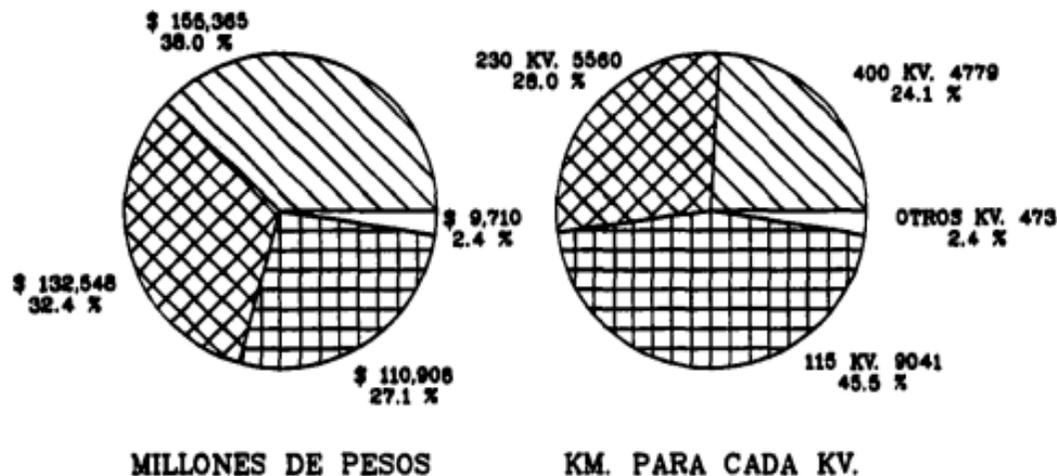
1. INTRODUCCION

En el Plan de Expansión del Sector Eléctrico [1], se identifica desde 1977 la necesidad de ampliar la red de transmisión de energía eléctrica del país en cerca de 17,000 Km. para antes del año 2000. A pesar de las dificultades económicas del país, la creciente demanda de energía eléctrica ha hecho que esta cifra sea rebasada considerablemente: El Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico (POISE), [2], tiene programada la construcción de 19,853 Km. de líneas de transmisión solamente entre los años 1986 a 1995. Esto representa una inversión de 408,531 millones de pesos a precios de noviembre de 1987, e implica la construcción de varios miles de torres de transmisión. En la figura 1.1 se muestra la distribución de Km. de líneas por construir y la inversión correspondiente, en función del voltaje de transmisión.

Aunque las torres sirven solamente como soporte para los cables conductores y los de guarda, su costo y el de sus cimentaciones representa cerca del 31%, en promedio, del costo total de una línea de transmisión de energía eléctrica, [3]. En la figura 1.2 se muestra la distribución de costos promedio (en porcentaje) de los conceptos que tienen mayor influencia en el costo total de una línea. Se han considerado líneas de transmisión de 115 KV a 1 circuito, de 230 KV a 1 y 2 circuitos y de 400 KV a 1 circuito. Ya se incluyen los costos de adquisición de los materiales y equipos de instalación permanente, de indemnizaciones por derecho de vía, de construcción, indirectos, etc.

Las torres de transmisión son estructuras repetitivas, es decir, en una o varias líneas, que pueden estar ubicadas en

LINEAS DE TRANSMISION POR CONSTRUIR ENTRE 1986 Y 1995



* PESOS DE NOV. 1986

FIGURA 1.1

COSTOS PROMEDIO EN LINEAS DE TRANSMISION

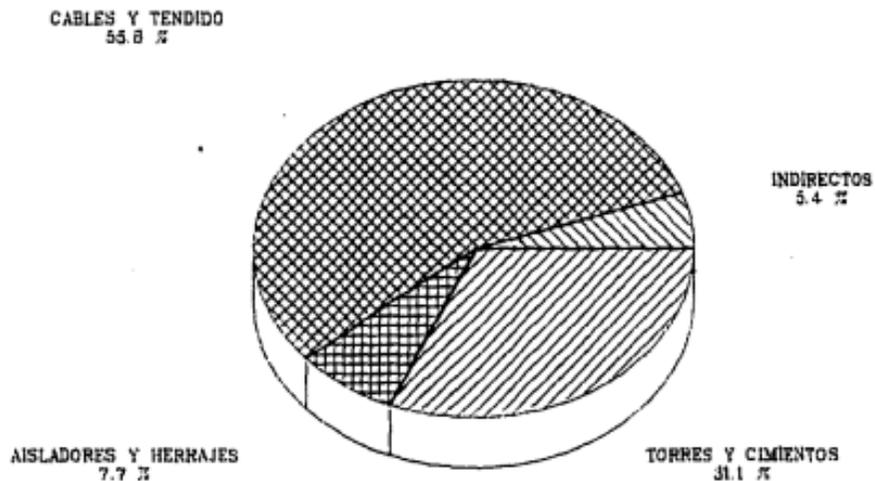


FIGURA 1.2

diversas zonas del país, se llegan a utilizar cientos de torres basadas en el mismo diseño estructural. Dado que las líneas de transmisión atraviesan terrenos de topografía irregular, se requieren torres de diferentes alturas; éstas se obtienen mediante combinaciones de niveles y extensiones modulares que, por especificación de diseño, deben poder interconectarse sin que se requieran aditamentos especiales (ver figura 1.3). Sin embargo, las torres que se emplean en una línea de transmisión, no se analizan ni diseñan individualmente; el análisis y diseño estructural se hace para la torre más alta, con las condiciones de carga más adversas y tomando muy en cuenta los requerimientos mencionados de interconexión entre módulos para la definición de las dimensiones externas, de la distribución de elementos en la torre y los detalles de las conexiones. En consecuencia, la mayoría de las torres en una línea tienen una capacidad estructural mayor que la que actualmente se aprovecha. Por citar un ejemplo, la línea Salamanca-Carapan II de 400 KV tiene 302 torres autoportadas; 2 son para remate, 23 para deflexión o tensión y 277 para suspensión; de éstas, 242 son del nivel normal 0+0, lo cual representa el 80% del total de torres en la línea, [4].

Asimismo, cuando se pretende utilizar la misma familia de torres en líneas de transmisión localizadas en otras zonas del país, con condiciones de carga diferentes a las consideradas para el diseño original, la definición de las nuevas condiciones de utilización se hace con base en la experiencia de los diseñadores, quienes, en general, aplican un criterio conservador buscando quedar del lado de la seguridad. Esto se debe, en buena parte, a la carencia de una herramienta de cómputo que permita efectuar en forma sencilla, precisa y rápida, el análisis y revisión de cada tipo de torre tomando en cuenta todas las condiciones de carga que correspondan a los diversos usos que se pretenda darle y revisar, en todos los casos, el nivel de carga al que está sometido cada uno de sus miembros. Lograr lo anterior mediante los procedimientos convencionales de análisis estructural implicaría un esfuerzo de cómputo tremendo e incosteable y es fácil entender que esto ha sido un obstáculo que ha impedido alcanzar un mejor aprovechamiento de este tipo de estructuras.

Como una contribución personal a la solución del problema descrito, se presenta este trabajo cuyo principal objetivo es exponer el planteamiento teórico e ilustrar la aplicación práctica de un procedimiento de análisis y revisión estructural para torres de transmisión que permite determinar, dado un criterio de diseño, todas aquellas condiciones de utilización en las que una torre de características específicas tiene un comportamiento

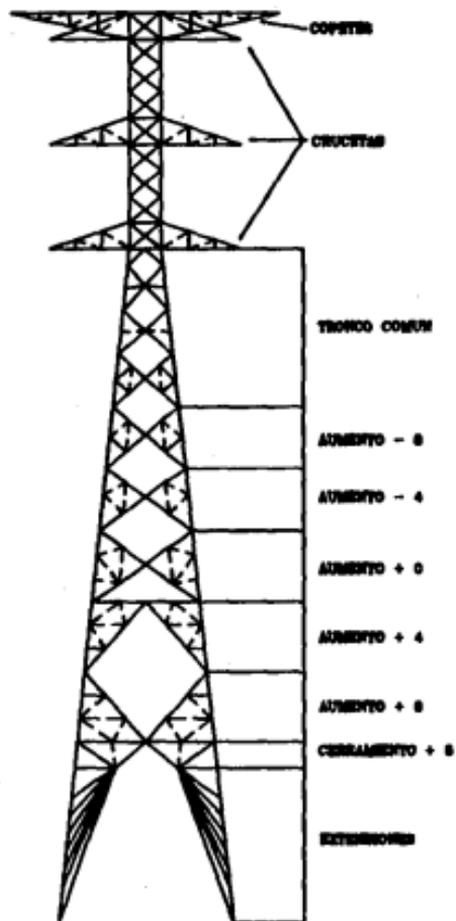


FIGURA 1.3 COMPONENTES DE UNA TORRE AUTOSOPORTADA

estructural satisfactorio. Este procedimiento ha sido desarrollado de manera que sea independiente de cualquier Reglamento o Especificación de Diseño; por su alta eficiencia permite abordar problemas cuya solución, hasta el momento, había resultado incosteable usando cualquier procedimiento convencional de análisis. Entre otras posibles aplicaciones que se puede dar a este procedimiento de análisis, se pueden mencionar las siguientes:

- Determinar el empleo que se puede dar a las torres en diferentes zonas del país y así aprovechar al máximo los diseños de torres de los cuales Comisión Federal de Electricidad es propietaria y de aquellas torres de las que se tiene material en bodega.
- Determinar la factibilidad, desde el punto de vista estructural, de aumentar el diámetro ó número de conductores en líneas ya instaladas.
- Generar la información que permita evaluar más alternativas para la localización de torres sobre el perfil de la línea.
- Estudiar la influencia relativa de diferentes tipos de cargas.
- Ampliar la utilización mecánica de las torres localizando aquellos miembros críticos que pudieran ser sustituidos o reforzados.
- Calcular las cargas mecánicas sobre las cimentaciones para todos los usos de las torres y, a partir de esta información, definir una variedad de cimentaciones más adecuada a cada proyecto.
- Visualizar el comportamiento estructural de las torres como apoyo didáctico y de entrenamiento.

El trabajo está organizado como sigue: En el capítulo 2 se describen brevemente los diferentes factores que producen cargas mecánicas sobre las torres de transmisión y la forma en que son considerados para fines de análisis y diseño en los diversos Reglamentos y Especificaciones para diseño y construcción de este tipo de estructuras.

En el capítulo 3 se explica detalladamente el procedimiento de análisis y revisión estructural que se propone, la secuencia de cálculo correspondiente y los programas de cómputo que la realizan.

En el capítulo 4 se presenta un ejemplo de aplicación; se determinan los intervalos de utilización mecánica de una

torre de transmisión autoportada de 2 circuitos para 230 KV. con base en los criterios propuestos en el capítulo C.2.3 del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, [5].

En el capítulo 5 se compara el comportamiento que se observó en la prueba a escala natural de la misma torre autoportada del capítulo 4, con los resultados obtenidos al analizarla utilizando diferentes modelos de análisis.

Finalmente, se exponen las conclusiones y recomendaciones de este trabajo en el capítulo 6.

2. SOLICITACIONES MECANICAS

2.1 CONDICIONES BASICAS DE CARGA

Para efectuar el análisis y diseño estructural de las torres de transmisión es necesario tomar en cuenta los factores que les provocan solicitaciones o cargas mecánicas. Entre los de mayor importancia, de acuerdo con diversos Reglamentos y Especificaciones de Diseño, [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12], se encuentran los siguientes :

- El peso propio.
- Los procesos de montaje y mantenimiento de la línea.
- La acción del viento sobre la estructura.
- Las acciones debidas a los cables.

Las acciones debidas a cada uno de estos factores, considerados aisladamente, constituyen las llamadas condiciones básicas de carga. A continuación se discute brevemente cada factor.

EL PESO PROPIO

Las cargas debidas al peso propio pueden evaluarse con muy buena aproximación, por tratarse de estructuras en las que todos sus elementos - perfiles, placas y tornillería - son prefabricados y se tiene bastante control sobre sus dimensiones y peso. Lo mismo sucede con los demás elementos de la línea como son los conductores, cables de guarda, cadenas de aisladores, herrajes, etc.

CARGAS POR TENDIDO DE CABLES Y MANTENIMIENTO DE LA LINEA

Es muy difícil estimar los valores reales de las cargas producidas durante estos procesos. Por lo general, para las cargas debidas al tendido de los cables de la línea, se toman precauciones especiales en la construcción. Algunas Especificaciones, [8, 9, 10, 11, 12], requieren que para análisis y diseño de la torre se consideren cargas concentradas en los puntos de soporte de los cables, cuya magnitud se establece como una fracción de la resistencia mecánica a la ruptura de dichos cables. Para las cargas provocadas por mantenimiento a la línea se asignan valores que, de acuerdo a la experiencia, se estima que no serán sobrepasados.

ACCION DEL VIENTO

Las torres de transmisión son estructuras ligeras y, junto con los cables y cadenas de aisladores que soportan, presentan un área expuesta al viento relativamente considerable. Por ello, en su diseño estructural es determinante el efecto de las cargas provocadas por el viento.

La acción del viento sobre las estructuras es un fenómeno dinámico muy complejo, en el cual intervienen multitud de factores. Sin embargo, en los diversos Reglamentos y Especificaciones para diseño de torres de transmisión, [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12], para fines de análisis estructural, la acción del viento, en última instancia, se maneja como un conjunto de fuerzas estáticas F_1 concentradas en diversos nudos de la estructura. La intensidad de estas fuerzas F_1 se calcula mediante expresiones semejantes a la siguiente (semejantes en cuanto a que de alguna manera involucran a los mismos factores) :

$$F_1 = 0.5 * \rho * CD_1 * VD_1^2 * A_1$$

donde :

- ρ es la densidad del aire [kg.s²/m⁴]
- A_1 es el área tributaria, en m², del nudo donde se considere aplicada la F_1 correspondiente.
- CD_1 es el coeficiente de arrastre del área tributaria correspondiente. Es adimensional, depende de la forma y dimensiones de la estructura y del tipo de flujo que se

considere. En el caso de estructuras reticulares permeables también depende de la forma de sus elementos.

- VD_1 es la velocidad media de diseño correspondiente a cada área tributaria. Su valor depende de la velocidad regional, la cual debe modificarse para tomar en cuenta condiciones de exposición de la estructura, rugosidad del terreno circundante, variación de la velocidad con la altura, y consideraciones respecto a la importancia, vida útil, etc. de la estructura. Los Reglamentos y Especificaciones para diseño de torres de transmisión, [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12], tradicionalmente toman en cuenta la acción dinámica del viento multiplicando las fuerzas estáticas, implícita o explícitamente, por un factor de amplificación conocido como factor de ráfaga.

CARGAS DEBIDAS A LOS CABLES

Dependen de diversos factores que se mencionan a continuación :

a) Geometría de la línea.

Esto se refiere básicamente a la separación entre las torres, la diferencia entre sus niveles y el cambio de dirección del eje de la línea. Conviene definir los siguientes términos, pues mediante ellos se identifica la utilización que se asigna a las torres de transmisión, (ver figura 2.1).

- Claro de Viento : Corresponde a la semisuma de los lados adyacentes de una estructura de soporte.
- Claro de Peso : Corresponde a la suma de las distancias de la estructura de soporte a los puntos más bajos de las catenarias de los cables adyacentes a la misma.
- Angulo de Deflexión : Corresponde al ángulo que se forma donde ocurre un cambio de dirección del eje de la línea de transmisión.

- b) El peso propio de las cadenas de aisladores y los cables que soporta.
- c) La acción del viento sobre cables y cadenas de aisladores.

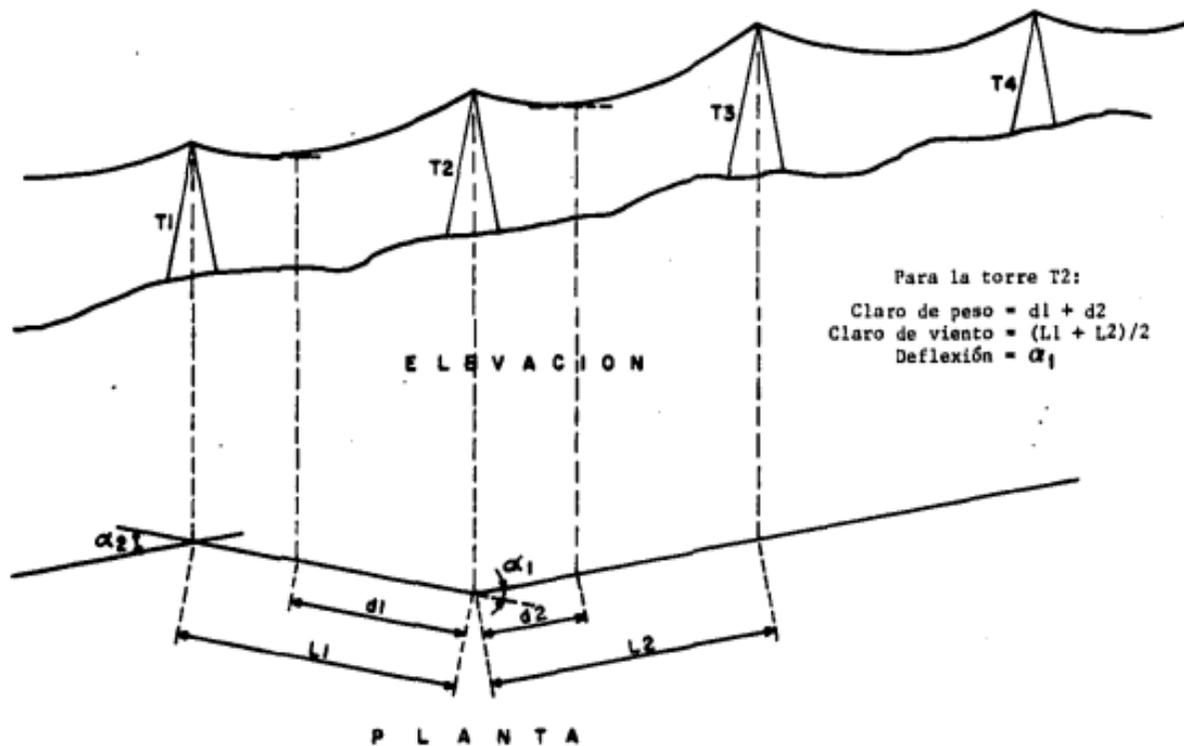


FIGURA 2.1

- d) La tensión mecánica en los cables que, a su vez, depende del claro, la flecha, la presión del viento, la temperatura ambiente, el peso propio del cable, su diámetro, el área de su sección transversal, su módulo de elasticidad, su coeficiente de dilatación térmica, etc.
- e) El efecto de la probable rotura de un cable conductor o hilo de guarda.

Algunos reglamentos y especificaciones de diseño [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12], recomiendan considerar, en caso necesario, los efectos debidos a la posible acumulación de hielo sobre los cables.

2.2 MANEJO DE LAS CARGAS EXTERNAS PARA ANALISIS.

En los Reglamentos y Especificaciones de Diseño se establecen los criterios para determinar las intensidades nominales de las condiciones básicas de carga y la forma de incluirlas en las combinaciones de carga que deben considerarse para el análisis y diseño de las torres de transmisión. Independientemente del Reglamento o Especificaciones de Diseño que se sigan, siempre se recurre a un análisis elástico, estático, lineal; es decir, cualesquiera que sean las solicitaciones que se tomen en cuenta, se manejan como conjuntos de cargas estáticas concentradas aplicadas en algunos puntos nodales de la estructura, su efecto se considera equivalente al de las acciones reales; no hay indicación de que se requiera algún análisis dinámico para propósitos de diseño de este tipo de estructuras [9, 10].

Para cada utilización que pudiera asignarse a una torre, existirá un conjunto de combinaciones de carga que deberá considerarse en su análisis estructural. El propósito de este análisis es calcular las cargas actuantes sobre cada miembro de la torre y determinar si éste es capaz de resistirlas. Debe ser claro que el intervalo de utilización mecánica que se determine para una torre en particular dependerá del criterio específico de diseño que se esté empleando. En todo caso es indispensable seguir consistentemente algún Reglamento o Especificación de Diseño, tanto para determinar las combinaciones de cargas externas y sus magnitudes, como para asignar valores a las resistencias mecánicas de los diferentes elementos que forman la estructura.

3. PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LOS INTERVALOS DE UTILIZACION MECANICA DE TORRES DE TRANSMISION

En este capítulo se expone detalladamente el procedimiento de análisis y revisión estructural de torres de transmisión objeto de este trabajo. En la primera parte se exponen los conceptos básicos; en la segunda parte se describe la secuencia de cálculo correspondiente y los programas de cómputo que la realizan. Actualmente, éstos forman parte del sistema de cómputo llamado SIDETT, desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil del Instituto de Investigaciones Eléctricas para una computadora VAX 11/730.

3.1 PLANTEAMIENTO BASICO DEL PROCEDIMIENTO

La hipótesis fundamental de este procedimiento de análisis es que el principio de superposición es válido. Esto significa que los efectos en los miembros de la estructura debidos a la acción de un sistema cualquiera de cargas externas son equivalentes a la superposición o suma de los efectos causados por cada una de las cargas externas individuales. Como ya se indicó en el capítulo anterior, independientemente del Reglamento ó Especificaciones de Diseño que se adopten, para fines de diseño estructural de torres de transmisión, siempre se recurre a un análisis estático, elástico lineal.

Para toda estructura con características geométricas y mecánicas bien definidas, para cuyo análisis se acepte como

válido el principio de superposición, existe una matriz [B] que relaciona directamente los elementos mecánicos [p] que aparecen en los extremos de los miembros de la estructura, con cualquier conjunto de fuerzas externas [F]. A continuación se muestra, únicamente para facilitar la presentación, una forma de obtener esta matriz [B] con base en el método de las rigideces, tal como se presenta en la Referencia [13].

$$[F] = [K] [D]$$

$$[D] = [K]^{-1} [F]$$

$$[K] = [a]^T [k] [a]$$

$$[e] = [a] [D]$$

$$[p] = [k] [e]$$

$$[p] = [k] [a] [D]$$

$$[p] = [k] [a] [K]^{-1} [F]$$

$$\text{Si } [B] = [k] [a] [K]^{-1}$$

$$\text{entonces } [p] = [B] [F]$$

El significado de las matrices anteriores es:

[F] Fuerzas externas aplicadas en los grados de libertad de la estructura.

[K] Matriz de Rigidez global de la estructura.

[D] Desplazamientos de los grados de libertad.

[a] Matriz de continuidad. Relaciona las deformaciones de los miembros con los desplazamientos de los grados de libertad asociados a sus nudos extremos.

[k] Matriz de rigideces locales de los miembros.

[e] Matriz de deformaciones unitarias de los miembros.

[p] Matriz de elementos mecánicos actuantes en los extremos de los miembros.

De acuerdo al planteamiento anterior, para obtener [B] aparentemente sería necesario invertir la matriz [K] global pero, como se verá enseguida, esto no hace falta.

Si en la ecuación $[p] = [B] [F]$
 hacemos $[F] = [I]$
 tendremos $[p] = [B] [I]$.
 donde $[I]$ es la matriz identidad

Aquí, el número de condiciones de carga (NCC) será igual al número de grados de libertad (NGL) de la estructura. Analizando el significado físico de esta relación resulta evidente que las columnas de $[B]$ son los elementos mecánicos actuantes en los extremos de las barras de la estructura correspondientes a NGL condiciones de carga. Como $[F] = [I]$, cada una de estas condiciones de carga estaría formada por una sola carga externa de valor unitario aplicada en la dirección de un grado de libertad y cargas nulas en todos los otros grados de libertad.

Para el análisis de una estructura, cualquier condición de carga está compuesta por un número limitado de cargas externas actuantes, es decir, no hay cargas aplicadas en todos los grados de libertad. Por ello, gran parte de los renglones de $[F]$ estarán formados por CEROS y al efectuar el producto matricial $[p] = [B] [F]$ las columnas correspondientes de $[B]$ no tendrán ningún efecto y, en consecuencia, no es necesario determinarlas.

En otras palabras, calculando únicamente las columnas de $[B]$ que corresponden a los grados de libertad NGL* de la estructura en los cuales si se aplicarán cargas externas, se genera una matriz $[B^*]$ de coeficientes de influencia de las cargas unitarias. Para obtenerla, se requiere analizar la estructura una sola vez, mediante cualquier programa de cómputo con el que se cuente, para un conjunto de fuerzas unitarias tal que, a partir de combinaciones de éstas, pueda formarse cualquier otra condición de carga de interés. Esta matriz $[B^*]$ es única para cada estructura, dadas las propiedades geométricas de sus miembros, el modelo de análisis y el conjunto de fuerzas unitarias consideradas para generarla.

Para determinar los elementos mecánicos en los extremos de las barras de la estructura, correspondientes a cualquier otro conjunto de fuerzas externas $[F]$, ya no es necesario emplear otra vez el programa convencional de análisis, sino que podrán calcularse directamente efectuando el siguiente producto matricial:

$$[p] = [B^*] [F]$$

Para fines de análisis y diseño, las torres de transmisión se consideran como armaduras tridimensionales pues, debido a la forma en que están estructuradas, sus miembros trabajan principalmente a carga axial, [10, 14, 15]. Esto facilita muchísimo la generación de [B*] ya que, para cada miembro, solo se requiere manejar el valor de la carga axial, (no 12 elementos mecánicos como en el caso de vigas). El orden de las matrices será :

$$\begin{array}{l} [B^*] \quad \quad \quad NM \times (NCCU + PP + CV) \\ [F] \quad \quad \quad (NCCU + PP + CV) \times NCCR \\ [P] \quad \quad \quad NM \times NCCR \end{array}$$

Los términos empleados tienen el siguiente significado :

- NM : Número de miembros en la torre.
- (NCCU + PP + CV) : Número de condiciones de carga compuestas por fuerzas unitarias necesarias para formar cualquier combinación de carga de interés para la torre. Es conveniente considerar adicionalmente una condición de carga que incluya solamente el efecto del peso propio y otra en la que se incluya un conjunto de fuerzas cuyos valores sigan la variación de las fuerzas debidas a la acción del viento sobre el cuerpo de la torre.
- NCCR : Número de combinaciones de carga para las cuales se desea analizar la estructura.

Para estas estructuras es relativamente sencillo obtener [F], pues cualquier condición de carga se compone de un número limitado de cargas externas concentradas actuando directamente sobre algunos grados de libertad de interés. Sin embargo, para determinar los intervalos de utilización mecánica de la torre de transmisión, habrá que considerar en el análisis un gran número de combinaciones de carga y será indispensable usar un programa de cómputo para calcular la matriz [F] correspondiente a cada utilización.

Con base en estos resultados, se puede comparar la resistencia a la compresión y a la tensión de cada barra de la torre contra las fuerzas axiales actuantes en cada combinación de carga analizada y definir así todas las condiciones de utilización de la estructura en las cuales ninguna de sus barras falla. Varios reglamentos y especificaciones para el diseño y construcción de torres de transmisión, [5, 6, 8, 10, 16], señalan precisamente como criterio de aceptación o rechazo de una torre en una prueba a escala natural, que ninguno de sus elementos debe fallar

ante cargas aplicadas a la torre con valores menores que el 100% de las cargas de diseño y, además, que la torre no debe resistir cargas mayores que el 115% de las cargas de diseño.

3.2 IMPLANTACION DEL PROCEDIMIENTO

Con base en los conceptos planteados en la sección 3.1, se conjuntó un subsistema de cómputo que ahora se ha integrado al sistema denominado SIDETT, (Sistema Integrado para el Diseño Estructural de Torres de Transmisión). SIDETT es un sistema de cómputo tipo CAD/CAE desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil del Instituto de Investigaciones Eléctricas; corre en una computadora VAX 11/730 con el sistema operativo VMS versión 4.4 de DIGITAL. En la figura 3.1 se muestra la forma en que interactúan los diferentes programas que integran el sistema y el flujo de la información correspondiente. Una descripción más detallada del SIDETT se da en la Referencia [17].

La secuencia de cálculo que sigue el procedimiento de análisis y revisión de torres de transmisión objeto de este trabajo es la siguiente :

1. Generar el modelo de análisis de la torre en consideración.
2. Generar la matriz [B*] de coeficientes de influencia.
3. Obtener los atributos de cada uno de los miembros de la torre, esto es, su número, su longitud, el perfil que le corresponde, su relación de esbeltez, resistencia a la compresión y a la tensión, el número del grupo de barras al que pertenece por requerimientos de modulación, etc.
4. Calcular las fuerzas externas [F].
5. Calcular las fuerzas actuantes en cada miembro [p].
6. Calcular las relaciones entre las fuerzas actuantes y la resistencia a la tensión o a la compresión, según corresponda, para cada miembro de la torre.

Los pasos 1, 2 y 3 se realizan una sola vez por cada torre mediante los programas SMODES, DISEÑA TORRES y FORMA_B*. Para cada utilización a revisar se repiten los pasos 4, 5 y 6. Para el paso 4 se emplean los programas CALCULA_CARGAS y FORMA_F; para los pasos 5 y 6 se emplea el programa REL_B*_F.

A continuación se expone con detalle cada etapa del procedimiento y se describen brevemente aquellos programas del SIDETT que se requieren.

GENERACION DEL MODELO PARA ANALISIS

Mediante el Sistema Modelador de Estructuras (SMODES), [18], es posible generar y verificar desde una terminal gráfica de video, con gran facilidad, precisión y rapidez, el modelo analítico de una torre de transmisión: coordenadas y características de los puntos nodales, incidencias y atributos de los miembros, etc. En el caso que nos ocupa, que es el análisis de una torre de características ya fijas, esta información se genera a partir de los datos finales del proyecto.

OBTENCION DE LA MATRIZ [B*]

Para efectuar esta etapa del proceso, es necesario definir primero la ubicación en la torre de las fuerzas unitarias que se van a considerar en el análisis estructural; deben estar localizadas de tal forma que cualquier otra condición de carga de interés pueda obtenerse a partir de combinaciones de estas mismas fuerzas unitarias. Por esta razón, conviene incluir una condición de carga en la que se considere solamente la acción del peso propio de la torre. Asimismo, se incluye otra condición de carga constituida por un conjunto de fuerzas cuyos valores siguen la variación de las fuerzas debidas a la acción del viento sobre la torre, (ver el Apéndice B, sección B.5).

El programa de análisis estructural convencional que se utiliza dentro del SIDETT es el DISEÑA TORRES. Este programa ha sido desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil del Instituto de Investigaciones Eléctricas para el análisis y diseño de torres de transmisión. Bajo la opción denominada REVISION, puede analizar una torre de características dadas, con 1500 miembros como máximo y considerando hasta 30 combinaciones de carga diferentes en cada corrida. Para implantar el procedimiento de análisis que nos ocupa, se le dió el programa la capacidad de formar opcionalmente 2 archivos llamados FOR016.DAT y FOR020.DAT.

El archivo FOR016.DAT contiene la información resultante del

análisis estructural, es decir, las fuerzas axiales actuantes en cada miembro debidas a cada una de las combinaciones de carga analizadas: peso propio, cargas unitarias y cargas debidas a la acción del viento sobre la torre. El programa DISEÑA_TORRES incluye automáticamente el efecto del peso propio en todos los casos. El programa FORMA B* forma la matriz [B*] de coeficientes de influencia en la cual se ha corregido el efecto del peso propio. Los arreglos que maneja se han dimensionado para trabajar con los resultados de hasta 30 combinaciones de carga.

DEFINICION DE ATRIBUTOS DE LOS MIEMBROS

El archivo FOR020.DAT contiene la información sobre los atributos de cada miembro de la estructura : grupo de diseño asignado, número de miembro, importancia asignada, longitud entre nudos en los que incide, relación de esbeltez, número en el catálogo del perfil asignado, resistencia mecánica a la compresión y a la tensión. Estos atributos se requieren para poder presentar los resultados del análisis y la revisión de la estructura con un formato semejante a los que se acostumbra en el medio. Conviene aclarar que "grupo de diseño" se refiere a un número que se asigna a todos aquellos miembros de la torre que, por requisitos de modulación y simetría, deben ser diseñados con el mismo perfil; asimismo, por medio de la "importancia" de un miembro se identifica si se trata de un elemento principal, secundario, o redundante; para fines de diseño, esto se traduce en que su relación de esbeltez no debe sobrepasar ciertos valores, [5, 6, 8, 10, 14].

Los atributos de resistencia mecánica a la compresión y a la tensión de los miembros deben tomarse de la llamada "Tabla de Cargas y Diseño" que producen los diseñadores con base en el detallado final de los miembros de la torre y de sus conexiones. En esta forma también se asegura que la resistencia mecánica de los elementos de las conexiones no será sobrepasada al efectuar la revisión de la torre con el procedimiento que se está presentando. Sin embargo, el criterio que se considere para revisar la estructura podría ser diferente del empleado para el diseño original. En este caso, puede recurrirse al programa DEPURADOR, [19], que permite calcular la resistencia a la compresión de los miembros bajo diferentes criterios y, a partir de estos valores, establecer las equivalencias necesarias.

CALCULO DE LAS FUERZAS EXTERNAS [F].

A cada posible utilización de una torre de transmisión corresponderá un conjunto de combinaciones de carga que deben ser consideradas para su análisis y revisión estructural. Los valores de estas cargas deberán determinarse de acuerdo al Reglamento o Especificación bajo el cual se esté efectuando la revisión de la estructura. Desde luego que, para establecer sus intervalos de utilización mecánica, habrá que tomar en cuenta una gran cantidad de combinaciones de carga y es indispensable usar un programa de cómputo para generar toda esta información. Para este propósito, dentro de este procedimiento de análisis se utilizan 2 programas de cómputo del sistema SIDETT: el programa CALCULA_CARGAS y el programa FORMA_F.

El programa CALCULA_CARGAS determina los valores de las fuerzas que transmiten los cables a la torre en dirección vertical, transversal y longitudinal. En cada corrida puede manejar hasta 30 diferentes combinaciones de carga; a su vez, cada combinación de carga puede estar compuesta por hasta 5 condiciones básicas de carga. Genera un archivo llamado CARGAS.CAR con el formato requerido para ser leído directamente por el programa DISEÑA_TORRES. Esta versión del programa no está asociada a ningún Reglamento o Especificación de Diseño. Se generó simplificando una versión semejante desarrollada en el Departamento de Ingeniería Civil del Instituto de Investigaciones Eléctricas, la cual estaba ligada por completo a la Referencia [5] y en todos los casos incluía las cargas debidas a la acción del viento sobre el cuerpo de la torre; en el procedimiento que nos ocupa, esto último ya no es necesario.

Los datos que requiere el programa CALCULA_CARGAS son los siguientes:

- a) Por pantalla : Claro de viento, claro de peso, ángulo de deflexión y presiones de viento sobre cables y cadenas de aisladores.
- b) Archivo de datos de la estructura : En este archivo se definen los coordenadas de los nudos, incidencias y características geométricas y mecánicas de cables conductores, de guarda y de cadenas de aisladores.
- c) Archivo de datos de las combinaciones de carga: Aquí se indican las condiciones básicas y los factores de carga que forman las combinaciones de carga por analizar en cada uso de la torre

Por su parte, el programa FORMA F produce la matriz [F] en la que se encuentran los valores de la magnitud de las cargas externas, ordenados de tal manera que pueda efectuarse la multiplicación matricial dada por $[P] = [B^*] [F]$. En cada corrida organiza los datos resultantes de hasta 30 combinaciones de cargas externas, para afectar los coeficientes de influencia correspondientes a 30 condiciones de carga unitaria como máximo. Requiere como información de entrada la contenida en el archivo CARGAS.CAR y en otro archivo llamado FCPP_VTO.DAT. En este archivo se da la información necesaria para manejar el efecto del peso propio y el efecto del viento sobre el cuerpo de la torre.

El programa DISEÑA TORRES requiere como dato un valor para FCPP (factor de carga por peso propio). Considerando que, para análisis y diseño, normalmente se maneja un modelo simplificado de la torre en el cual no se incluyen los elementos redundantes, un valor adecuado de FCPP para este caso sería el de la proporción entre el peso real de la torre y el peso calculado por el programa, (que además no incluye peso de placas ni de tornillería). Dentro del procedimiento de análisis que se está describiendo, en la primer condición de carga para análisis con el programa DISEÑA TORRES se incluye únicamente el efecto del peso propio. Por esta razón, los elementos del primer renglón de la matriz [F] son los factores de carga para afectar la contribución del peso propio en las combinaciones de carga que así lo requieran conforme al criterio de diseño que se esté utilizando. Estos factores se leen del archivo FCPP_VTO.DAT. De este mismo archivo se leen los factores de intensidad por los que se deben multiplicar los elementos de la última columna de [B*], generada por la combinación de carga en la que se incluye la distribución de fuerzas debidas a la acción del viento sobre el cuerpo de la torre. Estos factores forman el último de los renglones de [F], (ver Apéndice B, sección B.5).

ANALISIS Y REVISION DE LA TORRE

Para esto se utiliza el programa REL B* F; los arreglos que maneja están dimensionados para trabajar con un máximo de 30 combinaciones de carga por revisar en torres con hasta 1500 miembros. Con la información procedente de los programas FORMA_B* y FORMA_F se realiza lo siguiente :

- Efectuando el producto matricial $[P] = [B^*] [F]$ se obtienen las fuerzas axiales $[P]$ actuantes en cada miembro para cada combinación de carga analizada.
- Se compara la resistencia a la compresión y a la tensión de cada miembro de la torre contra las fuerzas actuantes en cada combinación de carga analizada. Cuando el valor absoluto de alguna de las relaciones calculadas exceda a la unidad, (dentro de una tolerancia que el usuario especifica), se envía un mensaje a la pantalla indicando el número del elemento, grupo de diseño al que pertenece, valor de la relación calculada y número de la combinación de carga en la que esto ocurre. De esta manera, el usuario puede localizar rápidamente los intervalos de utilización mecánica de la torre.

Estos resultados pasan a los siguientes dos archivos:

- El archivo RESULTON.RES contiene la información de las fuerzas actuantes, en toneladas, sobre cada miembro de la torre en cada combinación de carga revisada. Los resultados van ordenados conforme a la numeración de los miembros de la torre.
- El archivo RESULTADOS.RES contiene, también para cada miembro, la información sobre sus atributos y las relaciones mínima y máxima de carga actuante a resistencia mecánica indicando en que condición de carga ocurren. Los resultados van ordenados siguiendo la numeración de los grupos de la torre y tienen la misma presentación que los archivos generados normalmente por el programa DISEÑA_TORRES.

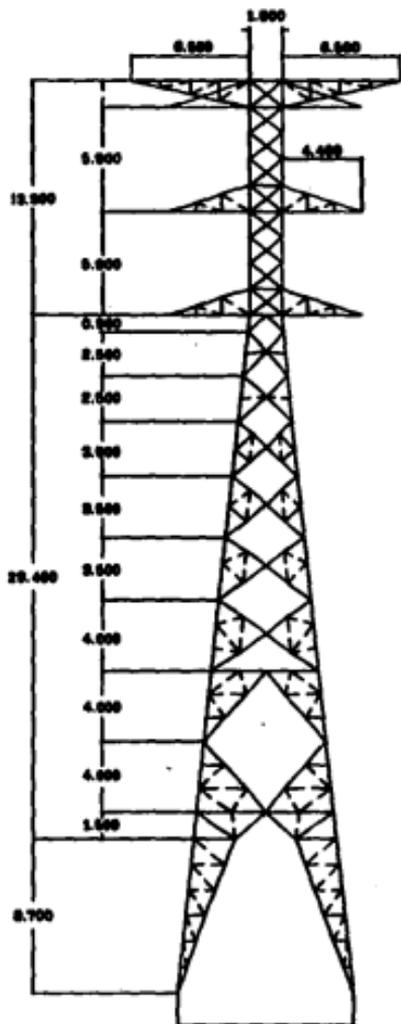
4. EJEMPLO DE APLICACION

En este capítulo se ilustra la aplicación práctica del procedimiento de análisis y revisión estructural para torres de transmisión objeto de este trabajo. El objetivo es determinar todas las condiciones de utilización mecánica de una torre autoportada de características fijas en las cuales ninguno de sus miembros recibe una carga axial mayor que la que puede resistir, de acuerdo al criterio de diseño establecido en el Capítulo C.2.3. del Reglamento de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, "Estructuras para Transmisión de Energía Eléctrica", [5].

Este procedimiento de análisis estructural y revisión de torres de transmisión es independiente de cualquier reglamento de diseño. Sin embargo, una vez definido el criterio a seguir, la revisión de una torre debe efectuarse aplicándolo en forma consistente para determinar las combinaciones de carga a considerar en el análisis y para calcular las resistencias mecánicas de los miembros.

Para este ejemplo se analizará la estructura que se muestra en la figura 4.1; se trata de una torre autoportada, de suspensión, de 2 circuitos para 230 KV. Se escogió esta torre porque se cuenta con la información sobre su geometría definitiva, su detallado final, la "Tabla de Cargas y Diseño" y también sobre su comportamiento en la prueba a escala natural, [20, 21]. Además, en su diseño original se aplicó lo establecido precisamente en la Referencia [5].

La torre completa pesa 7696 Kgs., sin contar el peso de tornillería, placas ni accesorios. En el desarrollo de este ejemplo, así como en el diseño original, para analizar la



**FIGURA 4.1 TORRE AUTOSOPORTADA 230 KV.
EJEMPLO DE APLICACION.**

torre se recurrió a un modelo simplificado, [20], formado por 132 nudos y 400 barras agrupadas en 67 grupos de diseño que se indican en la figura 4.2. "Grupo de diseño" se refiere al conjunto de miembros de la torre que, por requisitos de modulación y simetría, deben diseñarse con el mismo perfil; la torre está compuesta por ángulos estructurales cuyas características geométricas se dan en el Catálogo de Perfiles, (Tabla A.1., Apéndice A). El modelo simplificado es una armadura tridimensional en la que no se incluyen miembros "redundantes". Su peso es de 6083 kgs., desde luego sin incluir el peso de tornillería, placas ni accesorios. Los elementos "redundantes" aparecen con línea punteada en la figura 4.2. Su función es proporcionar apoyo a los miembros principales y a las diagonales; sus dimensiones no se seleccionan en función de cargas que deban resistir, sino de modo que se cumplan restricciones de relaciones de esbeltez máximas y tamaños mínimos de cada pieza, [5, 6, 8, 10, 20]. Los miembros redundantes en esta torre fueron dimensionados con ángulos de 1.5" x 4 mm. y de 2" x 4 mm., que son los perfiles número 1 y 4 del Catálogo; su peso es de 1613 kgs., lo cual representa el 26.5% del peso del modelo simplificado; esto se toma en cuenta para el análisis mediante un factor de carga por peso propio, (ver el Apéndice B).

Esta torre fue diseñada originalmente para la utilización dada por los siguientes parámetros :

Zona eólica	B
Angulo de deflexión	3 grados (máximo)
Claro de viento	450 m.
Claro de peso	650 m.

Se consideraron las siguientes 6 combinaciones de carga:

1. Viento con velocidad media. Sin rotura de cables.
2. Viento con velocidad máxima. Sin rotura de cables.
3. Viento con velocidad media. Rotura del cable de guarda izquierdo.
4. Viento con velocidad media. Rotura del cable conductor superior izquierdo.

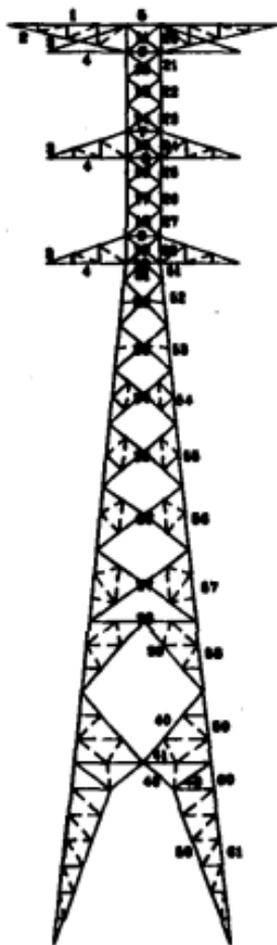


FIGURA 4.2 GRUPOS DE BARRAS PARA DISEÑO

5. Viento con velocidad media. Rotura del cable conductor central izquierdo.
6. Viento con velocidad media. Rotura del cable conductor inferior izquierdo.

En este ejemplo se revisa la torre para diferentes condiciones de utilización, en las 3 zonas de la regionalización eólica que propone la Referencia [5]. En cada caso se toman en cuenta las mismas combinaciones de carga antes indicadas y se aplica la secuencia de cálculo descrita en la sección 3.2 del capítulo 3 de este trabajo. Asimismo, en el Apéndice B se describe con detalle la forma en que se determinan las cargas externas.

El modelo de análisis se generó usando el programa SMODES, [18].

La matriz $[B^*]$ de coeficientes de influencia se obtuvo a partir del conjunto de 26 casos de carga que se muestran en la figura 4.3. Con base en éstos se puede generar cualquier otra combinación de carga que se requiera para el desarrollo de este ejemplo. El primer caso de carga se refiere al peso propio de la torre; los casos 2 a 25 constan de una carga unitaria cada uno y servirán para considerar la acción de los cables sobre la torre. El caso de carga No. 26 es para tomar en cuenta la acción del viento; está formado por un conjunto de fuerzas concentradas en diversos nudos sobre el cuerpo de la torre; esto se describe con detalle en el Apéndice B, sección B.5 y figura B.1

Los atributos de los miembros de la torre se obtuvieron con base en los planos del diseño final. Los valores de resistencia a la tensión y a la compresión para cada miembro se tomaron directamente de la "Tabla de Cargas y Diseño" elaborada por los diseñadores, [21]. En ésta se toman en cuenta factores tales como la distribución de barras redundantes, el número, diámetro y distancias entre los agujeros para tornillos en las conexiones, etc. De esta forma también se asegura que la resistencia mecánica de los elementos de las conexiones no será sobrepasada al efectuar la revisión de la torre.

Para cada utilización a revisar de la torre se requiere calcular la matriz $[F]$ de fuerzas externas correspondiente. Conforme a la Referencia [5], una vez definida la geometría de la torre, la distribución de fuerzas debidas a la acción del viento sobre el cuerpo de la estructura queda fija; solamente varía su intensidad en función de la velocidad regional correspondiente a cada zona eólica. Las fuerzas que transmiten los cables a la torre se

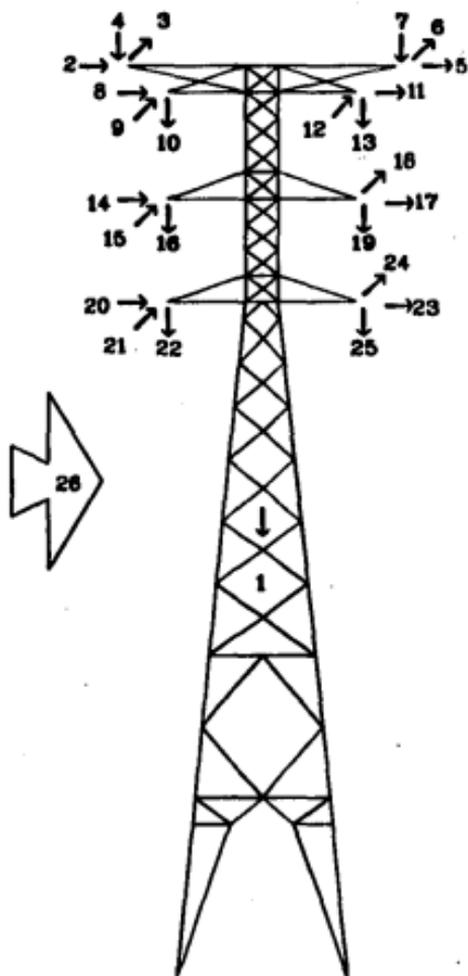


FIGURA 4.3 NUMERACION DE LAS CARGAS PARA OBTENER LA MATRIZ $[B^0]$

calcularon mediante el programa CALCULA CARGAS; dependen de la zona eólica, el claro de viento, el claro de peso y el ángulo de deflexión de la línea. También dependen de las propiedades mecánicas y geométricas de los propios cables y cadenas de aisladores.

Para cada utilización de la torre, mediante el programa REL B*F, se calculan las fuerzas actuantes en cada miembro, en cada combinación de carga analizada, y se comparan contra su resistencia mecánica a la compresión y a la tensión, según sea el caso.

Los intervalos de utilización mecánica calculados se grafican en las figuras 4.4 a 4.9. Nótese que cada punto dentro de estas gráficas representa el análisis y revisión estructural de la torre para las 6 combinaciones de carga consideradas, (ver Apéndice B).

Para mostrar el tipo de listados y los tiempos de cómputo tan reducidos que se obtienen con el procedimiento de análisis objeto de este trabajo, en el Apéndice A se incluyen los resultados para la utilización mecánica máxima obtenida en la zona eólica B.

En todos las graficas se pueden observar 2 líneas rectas inclinadas que limitan la utilización mecánica de la torre; una con pendiente 1:2 y la otra con pendiente 2:1. Se refieren a la relación entre claro de viento y claro de peso. La proporción entre claros no puede exceder de los límites indicados porque, como se muestra en la figura 4.10, si el claro de peso es el doble del claro de viento implica que algunas torres en el tramo de línea en cuestión están localizadas de manera que cuelgan de los cables en lugar de sostenerlos. Por otra parte, cuando el claro de viento es mayor que el claro de peso, la localización de las torres es tal que no se está aprovechando toda su capacidad de carga. Sin embargo, esto ocurre en líneas reales. En este trabajo se ha limitado esta proporción al valor 2:1 que ya implica una localización absurda como se ilustra en la misma figura 4.10.

Para determinar los intervalos de utilización mecánica de la torre, puede seguirse la siguiente secuencia:

(a) Se fija la zona eólica y el ángulo de deflexión de la línea.

(b) Se analiza la torre tomando valores del claro de viento al doble del claro de peso, (línea con pendiente 2:1 en las gráficas), hasta encontrar el valor límite del claro de viento en el que uno o varios miembros de la torre fallen, es decir, que la relación máxima entre carga actuante y

resistencia exceda la unidad por un valor que el usuario define. Para este ejemplo se fijó en 1.01; así se identifican algunos grupos críticos de diseño.

(c) Asimismo, se revisa manteniendo el claro de viento a la mitad del claro de peso, (línea con pendiente 1:2 en las gráficas), hasta encontrar el valor límite del claro de peso, así se identifican también otros grupos críticos de diseño.

(d) Luego se analiza la torre para el uso definido por los valores límites de claro de viento y de claro de peso identificados en los pasos anteriores. Normalmente, cerca de este punto se encuentra el uso para el cual fallan simultáneamente los grupos de diseño que se identificaron como críticos en los pasos anteriores.

En las figuras 4.4 a 4.6 puede observarse que en la zona eólica B, para los 3 ángulos de deflexión analizados, a reserva de revisar los requisitos de funcionamiento eléctrico, siempre sería posible dar a la torre una utilización mecánica mayor que la considerada en el diseño original. En las figuras 4.7 a 4.9 se grafican los resultados para la zona eólica C, en este caso las velocidades regionales del viento se reducen bastante, de manera que el intervalo de utilización mecánica de la torre crece considerablemente. Por otro lado, en la zona eólica A las fuerzas debidas al viento resultaron tan excesivas que la torre no podría emplearse ahí.

INTERVALO DE UTILIZACION MECANICA

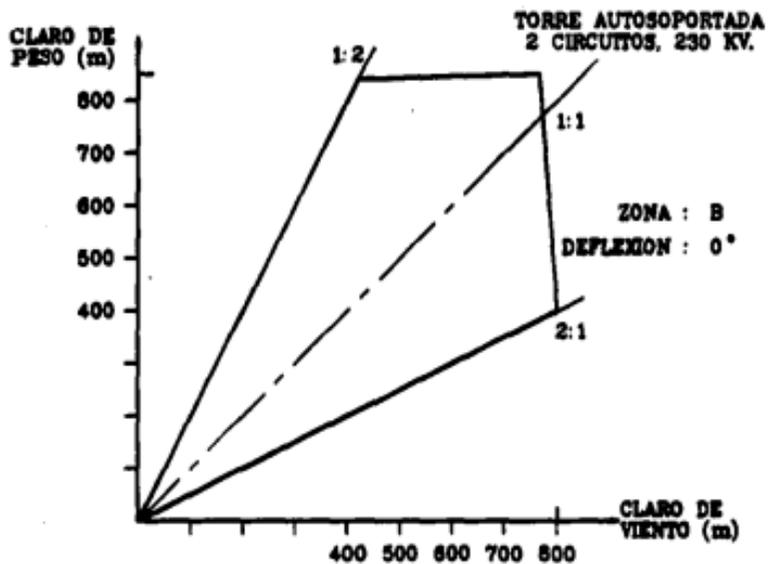


FIGURA 4.4

INTERVALO DE UTILIZACION MECANICA

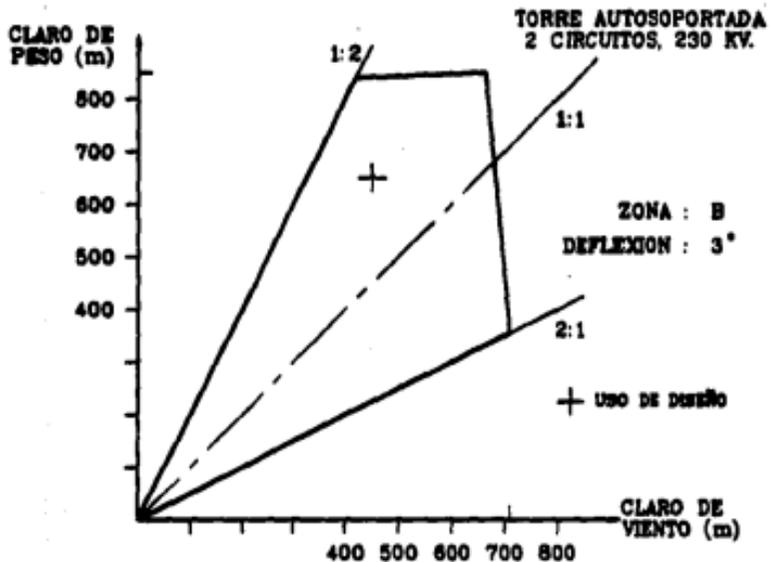


FIGURA 4.5

INTERVALO DE UTILIZACION MECANICA

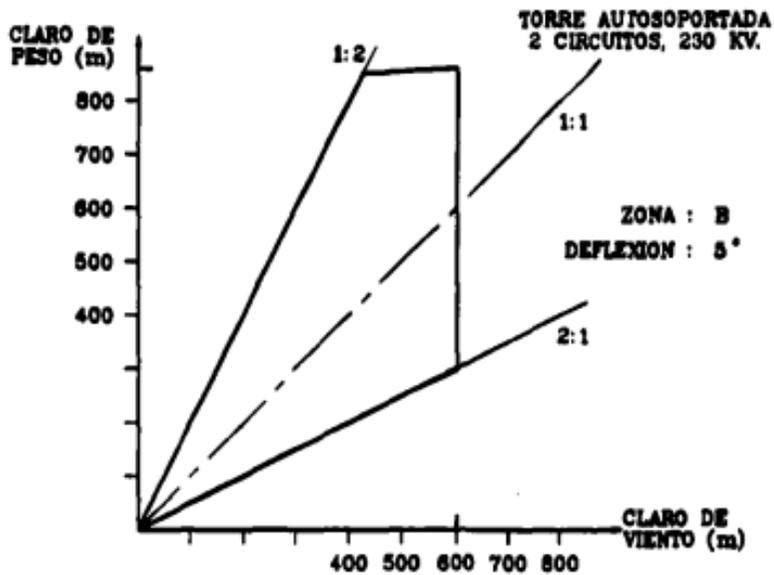


FIGURA 4.6

INTERVALO DE UTILIZACION MECANICA

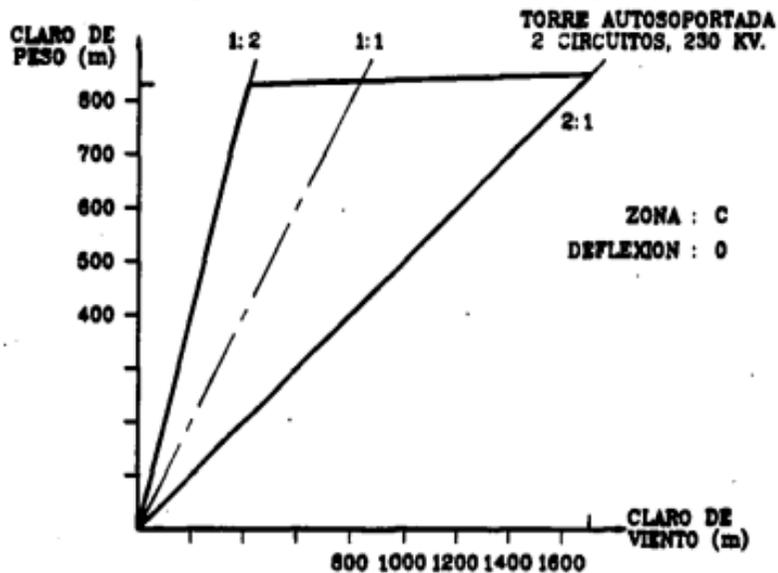


FIGURA 4.7

INTERVALO DE UTILIZACION MECANICA

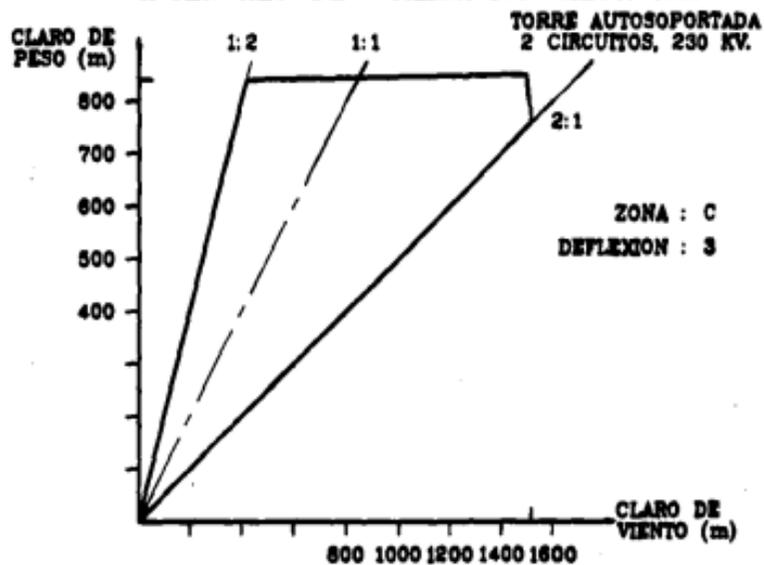


FIGURA 4.6

INTERVALO DE UTILIZACION MECANICA

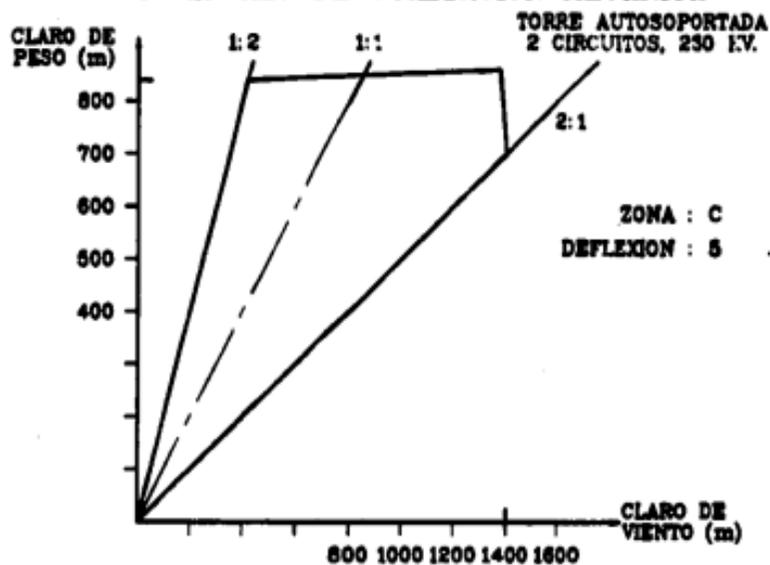


FIGURA 4.9

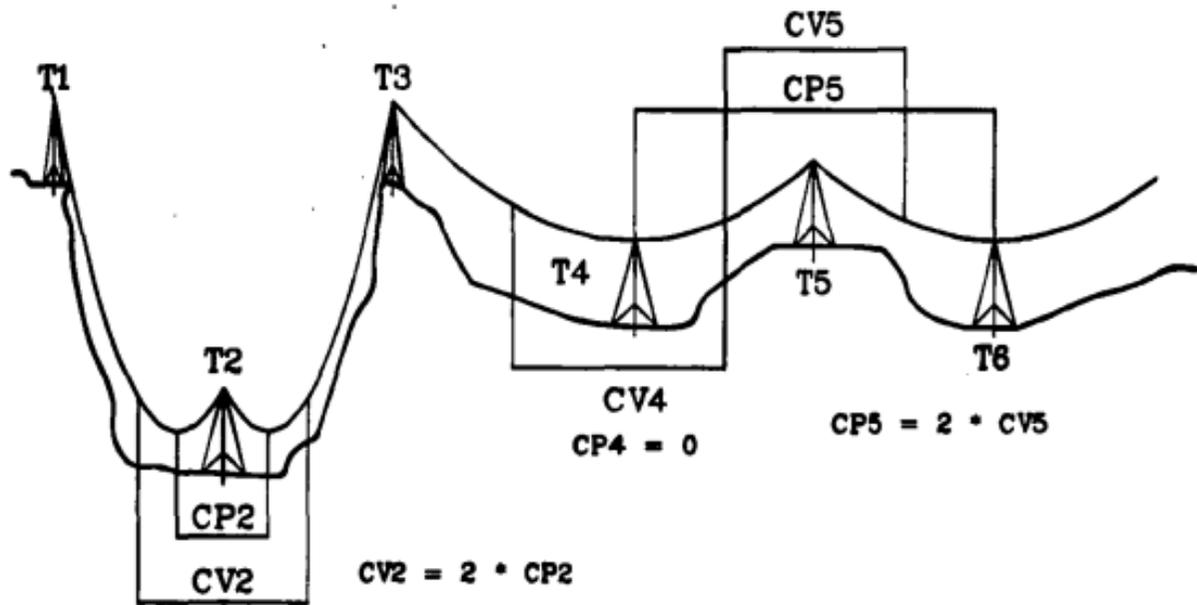


FIGURA 4.10

5. RESULTADOS ANALITICOS VS. PRUEBA A ESCALA NATURAL

Con el propósito de respaldar los resultados obtenidos en este trabajo para la torre autosoportada que se presenta como ejemplo de aplicación en el capítulo 4, en este capítulo se compara el comportamiento que se observó en la prueba a escala natural de esta misma torre con los resultados obtenidos al analizarla utilizando varios modelos de análisis.

5.1 PRUEBA DE LA TORRE A ESCALA NATURAL

La prueba a escala natural tiene por objeto detectar problemas potenciales en el diseño y detallado de la torre, esto es, verificar que todos sus miembros, conexiones y accesorios ensamblan adecuadamente y resisten las cargas para las que fueron diseñados. [5, 6, 16].

En la Referencia [20] se comentan los aspectos más importantes asociados con el diseño original de esta torre y su prueba a escala natural; ésta se efectuó de acuerdo a lo establecido en las Referencias [5] y [6].

En una prueba de esta naturaleza se pretende simular las cargas consideradas para su diseño. Sin embargo, por problemas físicos del equipo disponible, las resultantes de las cargas actuantes en tramos de la estructura, generalmente se concentran en determinados puntos. Las

cargas se aplican con incrementos de 25% hasta llegar al 100% de la carga de diseño. Las cargas se transmiten a la torre mediante un conjunto de cables de acero y poleas sostenidas en los marcos de reacción y en tierra. La intensidad de cada carga aplicada se registra mediante dinamómetros que han sido calibrados previamente.

En cada combinación de carga y en cada incremento, se registran los desplazamientos de algunos puntos sobre la torre tomando lecturas de unas regletas que se colocan a diferentes niveles sobre dos caras perpendiculares de la torre y cuya localización se hace coincidir con el eje de la misma.

Una vez que la torre soporta el 100% de la carga al probarla para todas las combinaciones consideradas en su diseño, se procede a realizar la prueba destructiva incrementando en forma paulatina los valores de la combinación de carga que haya resultado más desfavorable hasta que se produzca la falla de algún elemento de la estructura.

En este caso, la prueba destructiva se efectuó aplicando la combinación de carga número 2 para la Zona Eólica B : cables intactos y viento con velocidad máxima. La falla se presentó al 116% de la carga de diseño; la pieza que falló es uno de los elementos principales del cuerpo piramidal, para el cual el programa de análisis indicó que estaría trabajando al 110% de su capacidad, [20]. La pieza que falló corresponde al grupo 56 de la figura 4.2

En la figura 5.1 se muestra la localización y los valores en kilogramos de las cargas que se aplicaron en la prueba para el 100% de la carga de diseño; también se muestra la localización de las regletas para registrar los desplazamientos transversales de la torre. Los desplazamientos transversales en centímetros registrados en cada nivel para 3 incrementos de carga se muestran en la Tabla 5.1. Todos estos datos se obtuvieron de la Referencia [21], a partir de la información con la cual se generó la Referencia [20].

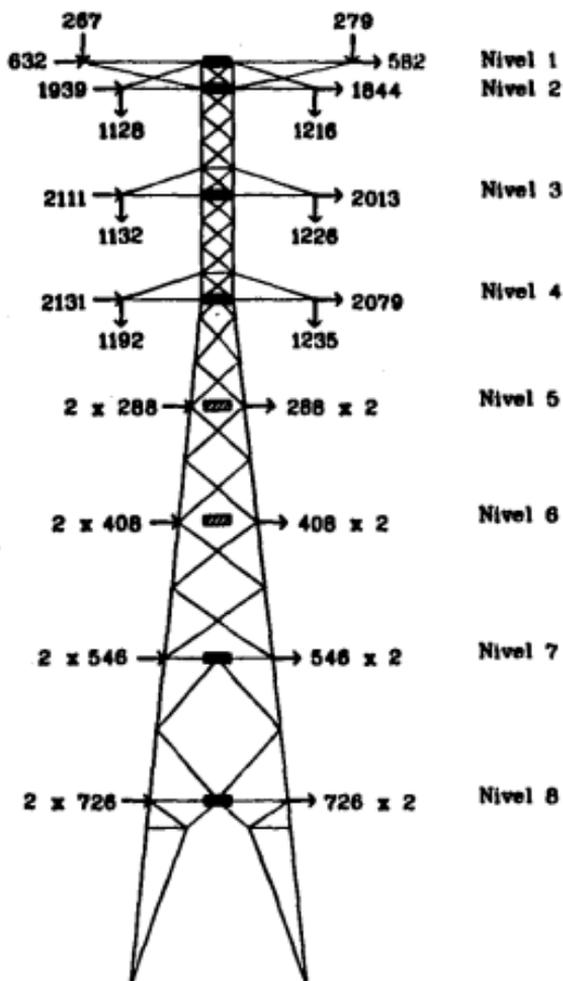


FIGURA 5.1 CARGAS AL 100% APLICADAS EN LA PRUEBA A ESCALA NATURAL COMBINACION # 2, VIENTO MAXIMO

Niv.	50%	75%	100%
1	12	25	37
2	11	24	35
3	8	17	28
4	8	12	20
5	6	9	15
6	4	6	9
7	3	4	6
8	1	2	2

TABLA 5.1

Desplazamientos registrados en la prueba a escala natural, [cm.].

5.2 MODELOS ANALITICOS

La torre se analizó con el programa **DISEÑA TORRES**, utilizando las opciones "REVISION" y "ESTABILIDAD", (ver capítulo 3, sección 3.2). Se consideró siempre una sola combinación de carga, con lo cual se intenta incluir las mismas cargas aplicadas durante la prueba a escala natural. Se analizó la torre para cargas cuyos valores son en cada caso el 50%, el 75%, y el 100% de la carga de diseño. Los modelos que se utilizaron para el análisis son los siguientes:

MODELO COMPLETO. A partir de los planos definitivos y de la llamada "Tabla de Cargas y Diseño" se generó este modelo en el cual la torre consta de 1364 barras tipo viga y 540 nudos de 6 grados de libertad. Se incluyen todos los elementos "redundantes" (los marcados con líneas punteada en la figura 4.2) y el peso propio de la torre se afecta por un factor de 1.10 para tomar en cuenta, en forma aproximada, el peso de tornillería, placas y accesorios.

MODELO SIMPLIFICADO. Este modelo es el mismo que se empleó tanto en el diseño original de la torre como en la determinación de sus intervalos de utilización mecánica durante el desarrollo de este trabajo. La torre consta de 400 barras tipo armadura y 132 nudos de 3 grados de libertad. No se incluye ningún elemento "redundante". El peso propio de la torre se afecta por un factor de 1.265 x 1.1 para tomar en cuenta el peso de las redundantes, tornillería, placas y accesorios. Esto es para poder

comparar resultados con el modelo completo y con la torre real.

MODELO ESTABILIDAD. El modelo incluye las mismas barras y nudos que el modelo simplificado, pero las barras de la torre son todas tipo viga y los nudos son de 6 grados de libertad. Aprovechando la capacidad del programa DISEÑA TORRES para efectuar análisis en forma iterativa, su opción "ESTABILIDAD" incorpora, en cada iteración, el efecto de la carga axial actuante sobre la rigidez al giro y al desplazamiento transversal de los extremos de cada miembro de la torre. Para ello recurre a las Funciones de Estabilidad desarrolladas en la Referencia [22]; una descripción detallada de esta opción del programa se da en la Referencia [23].

5.3 RESULTADOS ANALITICOS

El análisis de la torre usando los modelos arriba descritos dió valores ligeramente diferentes de las cargas axiales actuantes en las barras de la estructura, como era de esperarse. Sin embargo, en todos los casos, los elementos más esforzados de la torre fueron las barras pertenecientes al grupo 56, precisamente las mismas que fallaron en la prueba a escala natural.

Por otra parte, en la Tabla 5.2 se muestran los desplazamientos transversales calculados, en centímetros, para cada nivel de la torre (indicado en la figura 5.1) en cada incremento de carga. Cada columna de la Tabla 5.2 corresponde a lo siguiente :

- (A) Modelo completo (Vigas), análisis lineal.
- (B) Modelo simplificado (Armaduras), análisis lineal.
- (C) Modelo simplificado (Vigas). Resultados del primer análisis bajo la opción "Estabilidad"; no incluye el efecto de la carga axial, corresponde a un análisis lineal.
- (D) Modelo simplificado (Vigas). Resultados del cuarto análisis bajo la opción "Estabilidad"; ya incluye el efecto de la carga axial, es un análisis no lineal.

Desplazamientos en cm. calculados para el 50%
de las cargas de diseño

Niv.	(A)	(B)	(C)	(D)
1	26.30	26.58	26.50	29.00
2	24.55	24.80	24.70	27.05
3	17.75	18.00	17.90	19.50
4	11.90	12.10	12.00	12.90
5	7.75	7.95	7.91	8.32
6	4.60	4.76	4.73	4.89
7	2.08	2.23	2.21	2.18
8	0.47	0.64	0.67	0.46

Desplazamientos en cm. calculados para el 75%
de las cargas de diseño

Niv.	(A)	(B)	(C)	(D)
1	39.45	39.86	39.70	46.40
2	36.83	37.20	37.10	43.25
3	26.63	27.00	26.90	31.00
4	17.85	18.15	18.15	20.30
5	11.63	11.93	11.90	12.95
6	6.90	7.14	7.10	7.50
7	3.12	3.35	3.33	3.24
8	0.70	0.95	1.00	0.60

Desplazamientos en cm. calculados para el 100%
de las cargas de diseño

Niv.	(A)	(B)	(C)	(D)
1	52.60	53.15	53.00	67.60
2	49.10	49.60	49.40	62.95
3	35.50	36.00	35.80	44.90
4	23.80	24.20	24.10	29.00
5	15.50	15.90	15.80	18.15
6	9.20	9.52	9.47	10.35
7	4.16	4.46	4.44	4.24
8	0.93	1.27	1.33	0.45

TABLA 5.2

DESPLAZAMIENTOS TRANSVERSALES CALCULADOS

5.4 COMPARACION DE RESULTADOS

Como puede observarse en la Tabla 5.2, los desplazamientos calculados mediante un análisis lineal son prácticamente iguales. Esto indica que no tiene mayor influencia incluir para el análisis todas las barras que componen la torre o considerarlas como elementos viga o armadura y que, en consecuencia, se justifica el utilizar el modelo simplificado con elementos tipo armadura para efectuar el análisis elástico lineal de la torre. Sin embargo, al comparar las Tablas 5.1 y 5.2 se puede apreciar una diferencia notable entre los desplazamientos medidos en la prueba, los calculados mediante análisis elástico lineal y los calculados mediante análisis elástico no lineal.

En las figuras 5.2 y 5.3 se han graficado lo que podría considerarse como las "elásticas" de la torre. Para facilitar la presentación, los desplazamientos se han normalizado respecto al desplazamiento del Nivel 1 calculado mediante análisis elástico lineal con el modelo simplificado, considerando aplicado el 100% de las cargas de diseño.

Si se observa con atención los valores que aparecen en la Tabla 5.1 se puede concluir que los registros de los desplazamientos en la prueba no fueron tomados con mucho cuidado, por ejemplo: todos los valores son números enteros, en algunos casos no se registra desplazamiento relativo entre Niveles para un mismo valor de la carga aplicada y en otros casos no se registra incremento de desplazamiento en un mismo Nivel al aumentar la carga. No obstante lo anterior, los registros proporcionan información útil respecto al comportamiento de la torre, como se muestra enseguida.

En la figura 5.2 aparecen cinco curvas; en tres de ellas se grafican los desplazamientos medidos en la prueba cuando las cargas aplicadas valían el 50%, 75% y 100% de la carga de diseño, respectivamente. En las otras dos curvas se grafican los desplazamientos de la primer curva multiplicados por 1.5 y por 2.0, respectivamente.

La figura 5.3 muestra seis curvas; se grafican los desplazamientos calculados con análisis elástico lineal para el modelo simplificado y los calculados con la opción "Estabilidad" (análisis no lineal), para el 50%, 75% y 100% de la carga de diseño, respectivamente.

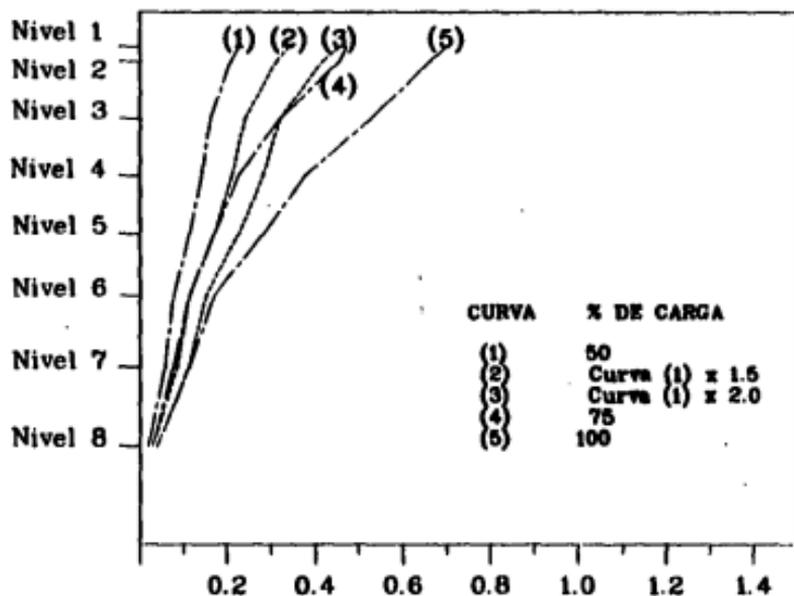
Considerando que la torre falló cuando la carga aplicada llegó al 116% de la carga de diseño, [20], se puede

aceptar que, cuando la carga aplicada era del 50%, los elementos de la torre se encontraban trabajando elásticamente. Si esta situación se conservara al incrementarse la carga del 50% al 75% y luego al 100%, los desplazamientos medidos deberían coincidir con los anteriores multiplicados por 1.5 y por 2.0, respectivamente. Sin embargo, como puede apreciarse en la figura 5.2, ya para el 75% de la carga de diseño, la parte superior de la torre no sigue un comportamiento lineal y esta desviación aumenta al incrementar la carga al 100% de la de diseño; la misma tendencia puede observarse en la figura 5.3, en las curvas que se refieren a los resultados del análisis no lineal.

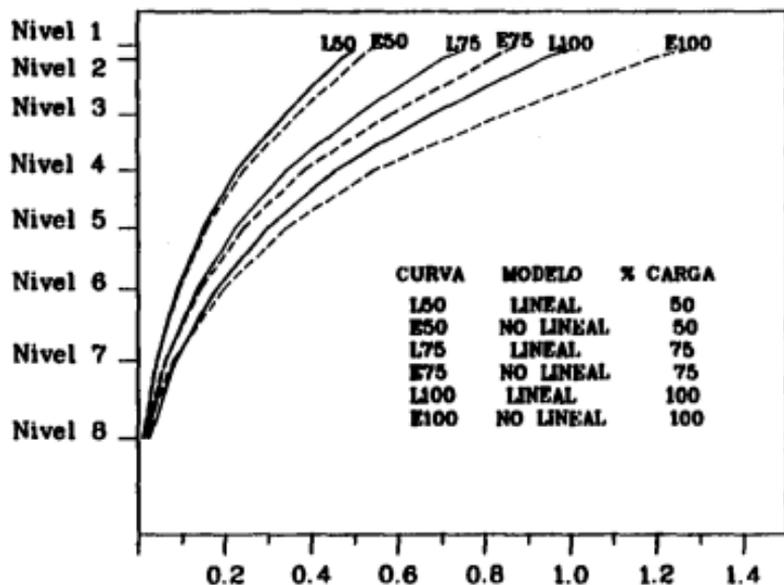
Por otra parte, los desplazamientos calculados son mayores que los medidos; esto puede deberse a dos causas principalmente:

- (a) El valor del módulo de elasticidad del acero que se manejó en el programa fué de $2,039,000 \text{ kg/cm}^2$. La Referencia [24] señala este valor como el menor de los que se acostumbra usar para diseño de estructuras de acero en general. Por otra parte la Referencia [25] recomienda usar $2,145,000 \text{ kg/cm}^2$ precisamente para ángulos estructurales utilizados en torres de transmisión hechas en México.
- (b) El momento de inercia en secciones transversales de la torre real es mayor que el calculado por el programa. Esto se debe a que, las distancias entre nudos de una misma cara que el programa maneja, se toman como distancias entre tornillos, incluyendo el gramil, para el detallado de las conexiones de la torre.

Finalmente, en todos los modelos de análisis los elementos más esforzados de la torre resultan ser las barras pertenecientes al grupo 56, precisamente las mismas que fallaron en la prueba destructiva a escala natural; esto a pesar de que, tanto los desplazamientos medidos en la prueba como los calculados con la opción de "Estabilidad", revelan que la estructura tiene un comportamiento no lineal. Esto indica que es necesario efectuar más pruebas físicas, con mejores mediciones, instrumentando elementos importantes y tratar de afinar los modelos analíticos. Sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos se puede aceptar que el análisis elástico lineal con el modelo simplificado proporciona resultados suficientes para efectuar el diseño de las torres de transmisión.



**FIGURA 5.2 DESPLAZAMIENTOS MEDIDOS [NORMALIZADOS]
PRUEBA A ESCALA NATURAL, COMBINACION # 2 VIENTO MAXIMO**



**FIGURA 5.3 DESPLAZAMIENTOS CALCULADOS [NORMALIZADOS]
COMBINACION # 2 VIENTO MAXIMO**

6. CONCLUSIONES

La ampliación de la red de transmisión de energía eléctrica es un aspecto prioritario para el país. Esto implica la construcción de varios miles de torres de transmisión cuyo costo, junto con el de sus cimentaciones, representa cerca del 30% del costo total de las líneas por construir. Evidentemente es muy importante optimar el empleo de este tipo de estructuras.

En las líneas de transmisión, que están localizadas en diversas zonas del país, sujetas a diferentes condiciones de carga, se llegan a utilizar cientos de torres basadas en el mismo diseño estructural para el cual se considera la estructura más alta sometida a las condiciones de carga más adversas. En consecuencia, la mayoría de las torres tiene una capacidad estructural mayor de la que actualmente se aprovecha. Esto se debe, en buena parte, a la carencia de una herramienta de cómputo que permita efectuar en forma sencilla el análisis estructural y la revisión de las torres de transmisión.

En este trabajo se presenta, como una contribución a la solución del problema descrito, un procedimiento para el análisis y revisión estructural de torres de transmisión que, dado un criterio de diseño, permite determinar todas aquellas condiciones de utilización en las cuales una torre de características específicas tiene un comportamiento estructural satisfactorio.

Este procedimiento es aplicable cuando se considera comportamiento elástico lineal para el análisis y diseño de la torre pues, en este caso, es válido el principio de superposición. Se basa en el empleo de una matriz $[B^*]$ de

coeficientes de influencia que se obtiene analizando una sola vez la torre mediante un programa convencional para un conjunto de cargas unitarias tales que, a través de combinaciones de éstas, pueda representarse cualquier combinación de carga de interés a la vez pueda verse sometida la torre. Esta matriz $[B^*]$ es única para cada estructura, para las propiedades geométricas de sus miembros, el modelo de análisis y el conjunto de fuerzas unitarias consideradas para generarla; una vez obtenida, el análisis para cualesquiera otras condiciones de carga requiere simplemente efectuar un producto matricial. A su vez, la revisión de la torre se lleva a cabo determinando la relación entre la carga actuante y la resistencia mecánica para cada uno de los miembros, en cada combinación de carga analizada.

Para efectuar la secuencia de cálculo que requiere este procedimiento de análisis y revisión estructural de torres de transmisión se ha desarrollado un conjunto de programas de cómputo que ahora forman parte del SIDETT (Sistema Integrado para el Diseño Estructural de Torres de Transmisión). Este es un sistema de cómputo tipo CAD/CAE desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil del Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Este procedimiento requiere muchísimo menos recursos de cómputo en comparación con los que sería necesario aplicar siguiendo cualquier otro procedimiento convencional de análisis. Por ello constituye la base para abordar problemas cuya solución hasta ahora no había sido factible desde el punto de vista práctico. Algunos de éstos se mencionan en la Introducción.

Mediante el ejemplo de aplicación que se presenta en el Capítulo 4 de este trabajo, se verificó la efectividad del procedimiento propuesto determinando los intervalos de utilización mecánica de una torre autosoportada en particular. Se generaron las gráficas que se muestran en las figuras 4.4 a la 4.9. A cada punto dentro de estas gráficas corresponde un análisis y revisión de la torre para 6 combinaciones de carga. Con un programa convencional de análisis, por ejemplo el DISEÑA TORRES que forma parte del SIDETT, se requieren 12 minutos de CPU en cada corrida. En cambio, el procedimiento que aquí se presenta requiere únicamente 40 segundos de CPU. El mismo se ha desarrollado de manera que sea independiente de cualquier reglamento o especificación de diseño. Sin embargo, para realizar el ejemplo se aplicó el criterio establecido en el Capítulo C.2.3. del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, [5]. El cálculo de las cargas externas se explica con detalle en el Apéndice B.

Con base en los resultados obtenidos, que se resumen en las gráficas de las figuras 4.4 a la 4.9, se puede concluir que en las zonas eólicas B y C esta torre podría tener una utilización mecánica mayor que la considerada para el diseño estructural original. Esto, desde luego, estaría sujeto a revisar los requisitos de funcionamiento eléctrico. Por otra parte, las fuerzas debidas a la acción del viento en la zona eólica A resultan tan altas que, aparentemente, la torre no podría usarse ahí.

Las gráficas de las figuras 4.4 a la 4.9 se obtuvieron limitando al valor 1.01 la relación entre carga actuante y resistencia de los miembros. En todos los casos, el valor máximo del claro de peso quedó definido por la falla de las barras del grupo de diseño número 6, (ver la figura 4.2), en la combinación de carga número 4, que se refiere a viento con velocidad media y rotura del conductor superior izquierdo. A su vez, el valor máximo del claro de viento quedó definido por la falla de las barras del grupo 56, (ver la figura 4.2), en la combinación de carga número 2, que se refiere a viento con velocidad máxima y no incluye rotura de cables.

De acuerdo a lo anterior, el intervalo de utilización mecánica de esta torre podría ampliarse aún más: sería relativamente sencillo reforzar o cambiar por un perfil más resistente las barras del grupo 6. Asimismo, modificando la distribución de elementos redundantes en la zona de las barras del grupo 56 sería posible darles mayor capacidad de carga. Claro que luego sería necesario revisar la torre otra vez pues, en ese caso, seguramente se volverían críticos otros grupos de diseño.

Por otra parte, en el capítulo 5 se llevó a cabo una comparación entre los resultados que se obtienen al analizar la torre utilizando diferentes modelos, y el comportamiento que se observó en la prueba a escala natural de la misma estructura, para la combinación de carga número 2 que se refiere a viento con velocidad máxima y no incluye rotura de cables. En la prueba destructiva falló uno de los elementos principales del cuerpo piramidal, correspondiente al grupo 56 de la figura 4.2, cuando la carga aplicada llegó al 116% de la carga de diseño; el programa de análisis elástico lineal indica que ese elemento estaría trabajando al 110% de su capacidad, [20].

De la comparación de resultados se puede concluir lo siguiente:

Los desplazamientos calculados son mayores que los medidos. Dos explicaciones probables se exponen en el capítulo 5.

Los desplazamientos calculados con modelos elástico lineales son prácticamente iguales.

Los desplazamientos medidos en la prueba y los calculados con análisis elástico no lineal indican que la estructura tiene un comportamiento precisamente no lineal.

Sin embargo, en todos los modelos de análisis la distribución de fuerzas axiales entre los miembros de la torre es similar, y las barras más esforzadas resultan ser las pertenecientes al grupo 56, precisamente las mismas que fallaron en la prueba destructiva a escala natural.

Lo anterior indica que, debido a la forma en que se estructura una torre autosoportada, sus miembros trabajan principalmente a carga axial y no tiene mayor influencia incluir para el análisis todas las barras que la componen o modelar éstas como vigas o armaduras.

Todo ello muestra que es necesario efectuar más pruebas físicas, con mejores mediciones, instrumentando elementos importantes y tratar de afinar los modelos analíticos. Sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos se puede aceptar que el análisis elástico lineal con el modelo simplificado de armadura tridimensional proporciona resultados suficientes para efectuar el diseño de las torres de transmisión.

7. REFERENCIAS

1. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia General de Estudios e Ingeniería Preliminar, "Plan de Expansión del Sector Eléctrico al Año 2000.", Tomo 1, México, 1978.
2. Comisión Federal de Electricidad, Subdirección de Construcción, Gerencia de Estudios, "Costos y Parámetros de Referencia para la Formulación de Proyectos de Inversión del Sector Eléctrico.", 7a. Edición, México, Noviembre 1987.
3. Comisión Federal de Electricidad, Subdirección de Construcción, Gerencia de Proyectos de Transmisión y Transformación, "Precios Medios de 1987 para Líneas de Transmisión.", México, Marzo 1987.
4. De Buen R. P., Espejel V. E., "Reporte de la Visita a la Línea de Transmisión a 400 KV. Salamanca - Carapan II.", Reporte Interno, Departamento de Ingeniería Civil Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, Agosto 1987.
5. Comisión Federal de Electricidad, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Manual de Diseño de Obras Cíviles, Capítulo C.2.3, "Estructuras para Transmisión de Energía Eléctrica.", México, 1983.
6. Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos de Transmisión y Transformación, Subgerencia de Ingeniería Básica de Subestaciones y L. T., Departamento de Ingeniería Civil, "Especificaciones Generales para el Diseño, Fabricación y Suministro de Torres Autosoportadas para Líneas de Transmisión Aisladas a 230 KV. 2 Circuitos.". Especificaciones No. GTT-TO61081, México, 1981.

7. Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A., Gerencia de Planeación e Ingeniería, Sección de Ingeniería Eléctrica, "Manual de Diseño y Normalización de Líneas de Transmisión.", México, 1973.
8. ASCE Structural Division, "Manual 52, Guide For Design of Steel Transmission Towers.", American Society of Civil Engineers, New York, 1971.
9. ASCE Structural Division, Committee on Electrical Transmission Structures, "Guidelines for Transmission Line Structural Loading.", American Society of Civil Engineers, New York, 1984.
10. ASCE Structural Division, Task Committee on Updating Manual 52., "Guide For Design of Steel Transmission Towers.", ASCE Structures Congress, American Society of Civil Engineers, New Orleans, September 1986.
11. Department of the Interior, Water and Power Resources Service, "Transmission Line Design Manual.", Denver, Colorado, 1980.
12. IEEE Committee Report, "Loading and Strength of Transmission Line Systems."
 - Part 4. Designing for Construction and Maintenance Loads.
 - Part 5. Considerations in Designing for Secondary or Post Failure Loads.
 - Part 6. Strength Requirements of Line Components.IEEE PES Winter Meeting, Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York, 1977.
13. Damy R. J., "Teoría General de las Estructuras I.", D.E.P.F.I - U.N.A.M.
14. Espejel V. E., "Desarrollo de Herramientas para el Análisis y Diseño Óptimos de Torres de Transmisión.", Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M, México, 1981.
15. De Buen R. P., Guerrero F. V., "Estudio de Modelos para el Análisis de Torres de Transmisión.", Informe IIE/42/3693/I 01/P, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, Junio, 1984.

16. IEEE Committee Report, "Recommendations For and Guide to Full-Scale Testing of Transmission Line Structures.", IEEE PES Winter Meeting, Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York, 1977.
17. Guerrero F. V., Neri B. E., Alvarado G. A., "Diseño Mecánico de Torres de Transmisión Asistido por Computadora.", Memorias del VI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Cd. de Puebla, México, Marzo 1988.
18. Alvarado G. A., Santana S. S., Vilar R. I., Guerrero F. V., "Sistema Modelador de Estructuras para el Diseño Interactivo de Torres de Transmisión.", Informe IIE/42/3693/I 08/P, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, Junio 1986.
19. Neri B. E., Alvarado G. A., Guerrero F. V., "Intervalos de Utilización Eficiente de Angulos Estructurales de Acero.", Informe IIE/42/3693/I 07/P, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, Mayo 1985.
20. Espejel V. E., Millán M. A., Honk H. W., "Diseño Optimo de una Torre de Transmisión Autosoportada Tipo 2M2 para 230 KV.", Boletín IIE, pp 161 - 165, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, julio/agosto 1985.
21. Espejel V. E., Investigador del Departamento de Ingeniería Civil del Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comunicación Personal, Septiembre 1988.
22. Beaufait F. W., "Computer Methods of Structural Analysis.", Ed. Prentice Hall, Inc., 1970.
23. Neri B. E., Mercado C. R., "Análisis de Estabilidad Estructural en Torres de Transmisión e Inclusión del Modelo Análítico en el Programa Diseña Torres.", Informe IIE/42/3693/I 11/P, Instituto de Investigaciones Eléctricas, México, Noviembre 1987.
24. Tall L., "Structural Steel Design.", 2nd. Edition, The Ronald Press Company, New York, 1974.
25. Villarreal G. G., Del Valle C. E., "Comportamiento Estructural de Perfiles de Acero Doblados en Frio.", Publicación 207, Instituto de Ingeniería, U.N.A.M, México, Enero 1969.

APENDICE A

Tabla A.1 Catálogo de Perfiles

Resultados para la máxima utilización
de la torre en la Zona Eólica B

Salida del programa CALCULA_CARGAS

Salida del programa FORMA_F

Salida del programa REL_B*_F

CATALOGO DE PERFILES. TORRE AUTOSOPORTADA 230 KV

ANGULOS DE LADOS IGUALES

ACERO, FY = 4000 KG/CM²

PERFIL No.	LADO2 [CM]	ESPEJOR [CM]	AREA [CM ²]	PESO [KG/M]	Rmin [CM]
1	3.8100	0.4000	2.89	2.27	0.75
4	5.0800	0.4000	3.90	3.06	1.00
7	5.0800	0.4762	4.61	3.62	1.00
8	6.3500	0.4000	4.92	3.86	1.26
15	7.6200	0.4762	7.03	5.52	1.51
22	8.8900	0.6350	10.89	8.55	1.76
25	10.1600	0.6350	12.50	9.81	2.02
28	10.1600	0.7937	15.50	12.17	2.01

TABLA A.1

Archivo de salida del programa CALCULA_CARGAS

TORRE AUTOSOPORTADA 230 KV. USO : B / 0 / 765 / 850

1	1	451.	0.	-480.
1	2	603.	0.	-380.
1	3	184.	653.	-480.
1	4	369.	0.	-480.
1	5	369.	0.	-480.
1	6	369.	0.	-480.
2	1	451.	0.	-480.
2	2	603.	0.	-380.
2	3	369.	0.	-480.
2	4	369.	0.	-480.
2	5	369.	0.	-480.
2	6	369.	0.	-480.
3	1	1349.	0.	-1942.
3	2	1802.	0.	-1742.
3	3	1102.	0.	-1942.
3	4	529.	2741.	-1942.
3	5	1102.	0.	-1942.
3	6	1102.	0.	-1942.
4	1	1349.	0.	-1942.
4	2	1802.	0.	-1742.
4	3	1102.	0.	-1942.
4	4	1102.	0.	-1942.
4	5	1102.	0.	-1942.
4	6	1102.	0.	-1942.
25	1	1350.	0.	-1942.
25	2	1805.	0.	-1742.
25	3	1103.	0.	-1942.
25	4	1103.	0.	-1942.
25	5	531.	2741.	-1942.
25	6	1103.	0.	-1942.
30	1	1350.	0.	-1942.
30	2	1805.	0.	-1742.
30	3	1103.	0.	-1942.
30	4	1103.	0.	-1942.
30	5	1103.	0.	-1942.
30	6	1103.	0.	-1942.
43	1	1353.	0.	-1942.
43	2	1808.	0.	-1742.
43	3	1105.	0.	-1942.
43	4	1105.	0.	-1942.
43	5	1105.	0.	-1942.
43	6	533.	2741.	-1942.
48	1	1353.	0.	-1942.
48	2	1808.	0.	-1742.
48	3	1105.	0.	-1942.
48	4	1105.	0.	-1942.
48	5	1105.	0.	-1942.
48	6	1105.	0.	-1942.

TIEMPO CPU: 1.48 Seg.

TORRE AUTOSOPORTADA 230 KV. USO : B / 0 / 765 / 850

1.100	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
45.100	60.300	15.400	36.900	36.900	36.900
0.000	0.000	65.300	0.000	0.000	0.000
-48.000	-38.000	-48.000	-48.000	-48.000	-48.000
45.100	60.300	36.900	36.900	36.900	36.900
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-48.000	-38.000	-48.000	-48.000	-48.000	-48.000
134.900	180.200	110.200	52.900	110.200	110.200
0.000	0.000	0.000	274.100	0.000	0.000
-194.200	-174.200	-194.200	-194.200	-194.200	-194.200
134.900	180.200	110.200	110.200	110.200	110.200
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-194.200	-174.200	-194.200	-194.200	-194.200	-194.200
135.000	180.600	110.300	110.300	53.100	110.300
0.000	0.000	0.000	0.000	274.100	0.000
-194.200	-174.200	-194.200	-194.200	-194.200	-194.200
135.000	180.600	110.300	110.300	110.300	110.300
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-194.200	-174.200	-194.200	-194.200	-194.200	-194.200
135.300	180.800	110.500	110.500	110.500	53.300
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	274.100
-194.200	-174.200	-194.200	-194.200	-194.200	-194.200
135.300	180.800	110.500	110.500	110.500	110.500
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-194.200	-174.200	-194.200	-194.200	-194.200	-194.200
3.838	5.126	2.813	2.813	2.813	2.813

TIEMPO CPU: 1.48 Seg.

Archivo de salida del programa FORMA_F

Matriz [F] de Fuerzas Externas; Interviene en

$$[p] = [B^*] [F]$$

ARCHIVO DE SALIDA DEL PROGRAMA REL_B*_F

El significado de las abreviaturas en el encabezado de cada página es el siguiente:

GPO Grupo de diseño al que pertenecen las barras
NB Número de la barra
IMP Importancia de la barra
LONGITUD Longitud de la barra entre nudos, [cm.]
KL/R Relación de esbeltez, eje menor.
CAP_COMP Resistencia a la compresión, [kg.]
CAP_TEN Resistencia a la tensión, [kg.]
REL_MIN Valor mínimo de la relación entre carga
actuante resistencia de la barra
REL_MAX Valor máximo de la relación entre carga
actuante y resistencia de la barra
CC_MIN Número de la combinación de carga en la
cual ocurre REL_MIN
CC_MAX Número de la combinación de carga en la
cual ocurre REL_MAX

El significado de los términos anteriores se explica en varias secciones de este trabajo.

TORRE AUTOSOPORTADA 230 KV. USO : B / O / 765 / 850

**** REVISION : CARGAS ACTUANTES VS. RESISTENCIAS ****

GPO	NB	IMP	LONGITUD	KL/R	PERFIL	CAP_COMP	CAP_TEN	REL_MIN	REL_MAX	CC_MIN	CC_MAX
1	1	1	858.20	182.	4	2948.	7877.	0.080	0.278	2	3
1	2	1	858.20	182.	4	2948.	7877.	0.011	0.157	3	4
1	3	1	858.20	182.	4	2948.	7877.	0.108	0.208	2	4
1	4	1	858.20	182.	4	2948.	7877.	0.155	0.187	4	1
2	5	1	873.13	133.	8	5688.	10258.	0.015	-0.225	3	5
2	6	1	873.13	133.	8	5688.	10258.	-0.181	-0.470	2	3
2	7	1	873.13	133.	8	5688.	10258.	-0.181	-0.258	2	4
2	8	1	873.13	133.	8	5688.	10258.	-0.181	-0.228	2	5
3	9	1	473.50	155.	4	3247.	7877.	0.388	0.747	2	4
3	10	1	473.50	155.	4	3247.	7877.	0.072	0.424	4	3
3	11	1	473.50	155.	4	3247.	7877.	0.388	0.447	2	4
3	12	1	473.50	155.	4	3247.	7877.	0.388	0.414	2	5
3	17	1	473.50	155.	4	3247.	7877.	0.308	0.728	4	5
3	18	1	473.50	155.	4	3247.	7877.	0.083	0.511	5	4
3	19	1	473.50	155.	4	3247.	7877.	0.388	0.512	2	4
3	20	1	473.50	155.	4	3247.	7877.	0.307	0.413	4	8
3	25	1	473.50	155.	4	3247.	7877.	0.328	0.741	5	8
3	26	1	473.50	155.	4	3247.	7877.	0.077	0.481	8	5
3	27	1	473.50	155.	4	3247.	7877.	0.388	0.507	2	4
3	28	1	473.50	155.	4	3247.	7877.	0.312	0.408	4	1
4	13	1	448.11	78.	8	8888.	8188.	0.138	-0.372	4	1
4	14	1	448.11	78.	8	8888.	8188.	-0.357	-0.773	5	4
4	15	1	448.11	78.	8	8888.	8188.	-0.179	-0.273	2	4
4	16	1	448.11	78.	8	8888.	8188.	-0.179	-0.248	2	5
4	21	1	448.11	78.	8	8888.	8188.	0.157	-0.372	5	1
4	22	1	448.11	78.	8	8888.	8188.	-0.357	-0.798	8	5
4	23	1	448.11	78.	8	8888.	8188.	-0.178	-0.321	2	4
4	24	1	448.11	78.	8	8888.	8188.	-0.189	-0.248	4	8
4	29	1	448.11	78.	8	8888.	8188.	0.143	-0.372	8	1
4	30	1	448.11	78.	8	8888.	8188.	-0.385	-0.778	2	8
4	31	1	448.11	78.	8	8888.	8188.	-0.178	-0.317	2	4
4	32	1	448.11	78.	8	8888.	8188.	-0.173	-0.232	4	1
5	41	2	180.00	178.	4	2447.	7877.	0.402	0.582	2	4
5	43	2	180.00	178.	4	2447.	7877.	0.332	0.458	4	8
8	53	2	180.00	142.	8	4881.	10258.	-0.401	-0.735	4	5
8	55	2	180.00	142.	8	4881.	10258.	-0.838	-1.008	2	4

==== REVISION : CARGAS ACTUANTES VS. RESISTENCIAS ====

OPO	NB	IMP	LONGITUD	KL/R	PERFIL	CAP_COMP	CAP_TEN	REL_MIN	REL_MAX	CC_MIN	CC_MAX
7	45	2	180.00	178.	4	2447.	7677.	0.334	0.521	4	5
7	46	2	180.00	178.	4	2447.	7677.	0.022	0.085	4	2
7	47	2	180.00	178.	4	2447.	7677.	0.284	0.473	5	4
7	48	2	180.00	178.	4	2447.	7677.	-0.377	-0.575	4	2
8	57	2	180.00	142.	8	4891.	10258.	-0.173	-0.813	5	4
8	58	2	180.00	142.	8	4891.	10258.	-0.381	-0.788	4	5
9	48	2	180.00	142.	8	4891.	10258.	0.230	0.402	4	6
9	50	2	180.00	142.	8	4891.	10258.	0.124	0.284	4	2
9	51	2	180.00	142.	8	4891.	10258.	0.232	0.408	8	4
9	52	2	180.00	142.	8	4891.	10258.	-0.383	-0.661	4	2
10	188	2	80.00	81.	8	9002.	8188.	0.083	-0.357	8	1
10	170	2	80.00	81.	8	9002.	8188.	-0.187	-0.458	2	5
10	173	2	80.00	81.	8	9002.	8188.	0.004	-0.219	4	1
10	174	2	80.00	81.	8	9002.	8188.	-0.351	-0.708	2	8
11	81	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	0.017	0.082	5	2
11	82	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	-0.028	0.082	5	4
11	83	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	-0.024	-0.134	5	4
11	84	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	-0.004	-0.048	3	5
11	85	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	-0.051	-0.228	8	4
11	86	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	0.038	0.082	8	2
11	87	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	-0.010	-0.250	5	4
11	88	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	-0.018	0.148	2	4
12	89	2	232.40	115.	4	5898.	7677.	0.011	-0.301	3	4
12	70	2	232.40	115.	4	5898.	7677.	-0.018	-0.322	3	2
12	71	2	232.40	115.	4	5898.	7677.	-0.014	-0.300	8	4
12	72	2	232.40	115.	4	5898.	7677.	0.008	0.188	5	4
12	73	2	232.40	115.	4	5898.	7677.	-0.185	-0.671	5	4
12	74	2	232.40	115.	4	5898.	7677.	0.088	0.438	5	4
12	75	2	232.40	115.	4	5898.	7677.	-0.010	-0.579	5	4
12	76	2	232.40	115.	4	5898.	7677.	0.011	0.453	8	4
13	77	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	0.018	-0.328	3	4
13	78	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	-0.021	-0.311	3	2
13	79	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	-0.011	-0.288	5	4
13	80	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	0.010	0.222	8	4
13	81	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	-0.138	-0.583	5	4
13	82	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	0.142	0.502	5	4
13	83	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	-0.015	-0.608	8	4
13	84	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	0.007	0.428	5	4

*** REVISION : CARGAS ACTUANTES VS. RESISTENCIAS ***

OPO	Nº	IMP	LONGITUD	KL/R	PERFIL	CAP_COMP	CAP_TEN	REL_MIN	REL_MAX	CC_MIN	CC_MAX
14	85	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	0.021	-0.288	3	4
14	86	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	-0.031	-0.345	3	2
14	87	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	-0.014	-0.300	8	4
14	88	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	0.008	0.198	5	4
14	89	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	-0.198	-0.864	5	4
14	90	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	0.108	0.448	5	4
14	91	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	-0.010	-0.578	5	4
14	92	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	0.011	0.453	8	4
15	93	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	0.088	0.241	5	2
15	94	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	0.022	-0.383	5	2
15	95	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	-0.177	-0.418	8	4
15	98	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	0.088	-0.281	4	2
15	97	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	-0.251	-0.821	8	4
15	98	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	0.142	0.273	8	4
15	99	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	0.080	-0.513	8	4
15	100	2	234.31	118.	4	5831.	7677.	0.055	0.463	8	4
16	101	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	0.127	0.414	3	2
16	102	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	0.133	-0.576	5	2
16	103	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	-0.080	-0.337	1	5
16	104	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	-0.020	0.179	8	5
16	105	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	-0.333	-0.825	8	4
16	106	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	0.218	0.554	8	4
16	107	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	0.007	-0.563	8	5
16	108	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	0.037	0.472	1	5
17	109	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	0.133	0.435	3	2
17	110	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	0.102	-0.588	5	2
17	111	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	0.015	-0.238	8	5
17	112	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	0.044	0.250	1	5
17	113	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	-0.298	-0.748	8	4
17	114	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	0.251	0.818	8	4
17	115	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	-0.048	-0.831	1	5
17	116	2	231.77	115.	4	5720.	7677.	-0.010	0.417	8	5
18	117	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	-0.131	0.432	5	2
18	118	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	0.123	-0.588	5	2
18	119	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	-0.080	-0.337	1	5
18	120	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	-0.020	0.179	8	5
18	121	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	-0.348	-0.838	8	4
18	122	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	0.228	0.564	8	4
18	123	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	0.007	-0.563	8	5
18	124	2	232.40	115.	4	5808.	7677.	0.037	0.472	1	5

==== REVISION : CARGAS ACTUANTES VS. RESISTENCIAS ====

OPD	NO	IMP	LONGITUD	KL/R	PERFIL	CAP_CMP	CAP_TEN	REL_MIN	REL_MAX	CC_MIN	CC_MAX
19	125	2	234.31	92.	8	8944.	8189.	0.013	0.380	5	2
19	126	2	234.31	92.	8	8944.	8189.	0.017	-0.429	5	2
19	127	2	234.31	92.	8	8944.	8189.	-0.279	-0.425	8	5
19	128	2	234.31	92.	8	8944.	8189.	-0.085	-0.422	4	2
19	129	2	234.31	92.	8	8944.	8189.	-0.335	-0.803	1	4
19	130	2	234.31	92.	8	8944.	8189.	0.240	0.380	3	2
19	131	2	234.31	92.	8	8944.	8189.	0.076	0.382	3	2
19	132	2	234.31	92.	8	8944.	8189.	0.272	0.598	1	5
20	133	1	150.00	100.	15	13945.	24189.	-0.041	-0.102	2	4
20	134	1	150.00	100.	15	13945.	24189.	-0.088	-0.113	5	4
20	135	1	150.00	100.	15	13945.	24189.	-0.047	-0.080	4	5
20	136	1	150.00	100.	15	13945.	24189.	-0.010	-0.058	4	3
21	137	1	147.00	98.	15	14384.	24189.	0.000	-0.008	3	5
21	138	1	147.00	98.	15	14384.	24189.	-0.131	-0.199	4	2
21	139	1	147.00	98.	15	14384.	24189.	-0.185	-0.198	8	2
21	140	1	147.00	98.	15	14384.	24189.	-0.010	-0.072	1	4
22	141	1	148.00	97.	15	14529.	24189.	0.038	0.118	8	2
22	142	1	148.00	97.	15	14529.	24189.	-0.115	-0.377	4	2
22	143	1	148.00	97.	15	14529.	24189.	-0.255	-0.384	5	4
22	144	1	148.00	97.	15	14529.	24189.	0.004	0.118	3	2
23	145	1	147.00	98.	15	14384.	20257.	0.108	0.248	8	2
23	146	1	147.00	98.	15	14384.	20257.	-0.108	-0.527	4	2
23	147	1	147.00	98.	15	14384.	20257.	-0.307	-0.540	5	4
23	148	1	147.00	98.	15	14384.	20257.	-0.033	0.248	4	2
24	149	1	150.00	100.	15	13945.	20257.	0.118	0.301	5	2
24	150	1	150.00	100.	15	13945.	20257.	-0.201	-0.728	4	2
24	151	1	150.00	100.	15	13945.	20257.	-0.452	-0.728	5	2
24	152	1	150.00	100.	15	13945.	20257.	0.080	0.301	3	2
25	153	1	147.00	84.	22	27828.	33118.	0.137	0.291	8	2
25	154	1	147.00	84.	22	27828.	33118.	-0.143	-0.515	4	2
25	155	1	147.00	84.	22	27828.	33118.	-0.353	-0.515	8	2
25	156	1	147.00	84.	22	27828.	33118.	-0.057	0.291	4	2
26	157	1	148.00	83.	22	27828.	33118.	0.231	0.427	8	2
26	158	1	148.00	83.	22	27828.	33118.	-0.180	-0.884	4	2
26	159	1	148.00	83.	22	27828.	33118.	-0.444	-0.884	8	2
26	160	1	148.00	83.	22	27828.	33118.	-0.008	0.427	4	2

**** REVISION : CARGAS ACTUALES VSRESISTENCIAS ****

GPO	NO	IMP	LONGITUD	KL/R	PERFIL	CAP_COMP	CAP_TEN	REL_MIN	REL_MAX	CC_MIN	CC_MAX
27	181	1	147.00	84.	22	27636.	33118.	0.310	0.540	8	2
27	182	1	147.00	84.	22	27636.	33118.	-0.208	-0.818	4	2
27	183	1	147.00	84.	22	27636.	33118.	-0.508	-0.818	8	2
27	184	1	147.00	84.	22	27636.	33118.	0.037	0.540	4	2
28	185	1	150.00	88.	22	27088.	33118.	0.300	0.585	8	2
28	186	1	150.00	88.	22	27088.	33118.	-0.278	-0.948	4	2
28	187	1	150.00	88.	22	27088.	33118.	-0.584	-0.948	8	2
28	188	1	150.00	88.	22	27088.	33118.	0.034	0.585	4	2
29	33	2	254.58	187.	1	2048.	5443.	0.138	0.288	2	4
29	34	2	254.58	187.	1	2048.	5443.	0.024	0.172	4	5
30	35	2	254.58	128.	4	4885.	7988.	-0.127	-0.358	2	4
30	36	2	254.58	128.	4	4885.	7988.	0.048	-0.152	4	8
30	37	2	254.58	128.	4	4885.	7988.	-0.075	-0.411	2	5
30	38	2	254.58	128.	4	4885.	7988.	-0.041	0.155	8	5
30	39	2	254.58	128.	4	4885.	7988.	-0.107	-0.480	2	8
30	40	2	254.58	128.	4	4885.	7988.	-0.082	0.142	4	8
31	177	2	138.80	138.	7	5005.	8177.	-0.044	-0.458	3	8
31	178	2	138.80	138.	7	5005.	8177.	0.022	0.248	3	8
31	179	2	138.80	138.	7	5005.	8177.	-0.002	-0.825	1	4
31	180	2	138.80	138.	7	5005.	8177.	-0.002	0.338	1	4
31	181	2	138.80	138.	7	5005.	8177.	-0.174	-0.718	1	4
31	182	2	138.80	138.	7	5005.	8177.	0.083	0.380	1	4
31	183	2	138.80	138.	7	5005.	8177.	-0.002	-0.757	1	8
31	184	2	138.80	138.	7	5005.	8177.	-0.002	0.411	1	8
32	185	2	337.85	148.	8	4585.	10258.	-0.028	-0.421	3	8
32	186	2	337.85	148.	8	4585.	10258.	0.013	-0.240	3	2
32	187	2	337.85	148.	8	4585.	10258.	0.001	-0.588	1	4
32	188	2	337.85	148.	8	4585.	10258.	0.001	0.285	1	4
32	189	2	337.85	148.	8	4585.	10258.	-0.178	-0.882	1	4
32	190	2	337.85	148.	8	4585.	10258.	0.081	0.311	1	4
32	191	2	337.85	148.	8	4585.	10258.	-0.002	-0.718	1	8
32	192	2	337.85	148.	8	4585.	10258.	-0.002	0.321	1	8
33	193	2	373.88	182.	8	3748.	10258.	-0.008	-0.358	3	8
33	194	2	373.88	182.	8	3748.	10258.	0.000	-0.257	3	2
33	195	2	373.88	182.	8	3748.	10258.	-0.001	-0.530	2	4
33	196	2	373.88	182.	8	3748.	10258.	-0.001	0.182	2	4
33	197	2	373.88	182.	8	3748.	10258.	-0.183	-0.845	1	4
33	198	2	373.88	182.	8	3748.	10258.	0.088	0.234	1	4
33	199	2	373.88	182.	8	3748.	10258.	-0.004	-0.847	1	8
33	200	2	373.88	182.	8	3748.	10258.	-0.004	0.234	1	8

**** REVISION : CARGAS ACTUANTES VS. RESISTENCIAS ****

GPO	NO	IMP	LONGITUD	KL/R	PERFIL	CAP_COMP	CAP_TEN	REL_MIN	REL_MAX	CC_MIN	CC_MAX
34	201	2	440.40	177.	8	3137.	10258.	0.008	-0.330	3	8
34	202	2	440.40	177.	8	3137.	10258.	-0.022	-0.298	3	2
34	203	2	440.40	177.	8	3137.	10258.	-0.008	-0.533	1	4
34	204	2	440.40	177.	8	3137.	10258.	-0.008	0.158	1	4
34	205	2	440.40	177.	8	3137.	10258.	-0.225	-0.888	1	4
34	206	2	440.40	177.	8	3137.	10258.	0.087	0.201	1	4
34	207	2	440.40	177.	8	3137.	10258.	0.001	-0.834	1	8
34	208	2	440.40	177.	8	3137.	10258.	0.001	0.188	1	8
35	209	2	532.80	155.	8	4077.	10258.	0.015	-0.182	3	8
35	210	2	532.80	155.	8	4077.	10258.	-0.044	-0.241	3	2
35	211	2	532.80	155.	8	4077.	10258.	0.001	-0.330	1	4
35	212	2	532.80	155.	8	4077.	10258.	0.001	0.133	1	4
35	213	2	532.80	155.	8	4077.	10258.	-0.181	-0.447	1	4
35	214	2	532.80	155.	8	4077.	10258.	0.070	0.177	1	4
35	215	2	532.80	155.	8	4077.	10258.	-0.007	-0.408	1	8
35	216	2	532.80	155.	8	4077.	10258.	-0.007	0.158	1	8
38	217	2	588.78	172.	8	3338.	10258.	0.024	-0.138	3	8
38	218	2	588.78	172.	8	3338.	10258.	0.037	-0.288	4	2
38	219	2	588.78	172.	8	3338.	10258.	-0.005	-0.324	1	4
38	220	2	588.78	172.	8	3338.	10258.	-0.005	0.103	1	4
38	221	2	588.78	172.	8	3338.	10258.	-0.225	-0.471	1	4
38	222	2	588.78	172.	8	3338.	10258.	0.072	0.151	1	4
38	223	2	588.78	172.	8	3338.	10258.	0.000	-0.380	1	8
38	224	2	588.78	172.	8	3338.	10258.	0.000	0.127	1	8
37	225	2	880.50	188.	15	5022.	12813.	0.028	0.083	3	2
37	226	2	880.50	188.	15	5022.	12813.	0.014	-0.217	4	2
37	227	2	880.50	188.	15	5022.	12813.	-0.002	-0.185	2	4
37	228	2	880.50	188.	15	5022.	12813.	-0.002	0.070	2	4
37	229	2	880.50	188.	15	5022.	12813.	-0.183	-0.294	1	4
37	230	2	880.50	188.	15	5022.	12813.	0.082	0.113	1	4
37	231	2	880.50	188.	15	5022.	12813.	-0.003	-0.224	1	8
37	232	2	880.50	188.	15	5022.	12813.	-0.003	0.088	1	8
38	233	2	285.10	187.	15	4052.	12813.	0.001	-0.258	4	2
38	234	2	285.10	187.	15	4052.	12813.	-0.007	0.081	4	2
38	235	2	285.10	187.	15	4052.	12813.	-0.003	0.052	1	4
38	236	2	285.10	187.	15	4052.	12813.	-0.003	-0.171	1	4
38	237	2	285.10	187.	15	4052.	12813.	0.080	0.084	1	4
38	238	2	285.10	187.	15	4052.	12813.	-0.185	-0.304	1	4
38	239	2	285.10	187.	15	4052.	12813.	-0.002	0.084	2	8
38	240	2	285.10	187.	15	4052.	12813.	-0.002	-0.207	2	8

**** REVISION : CARGAS ACTUALES VS. RESISTENCIAS ****

OPD	NO	IMP	LONGITUD	KL/R	PERFIL	CAP_COMP	CAP_TEN	REL_MIN	REL_MAX	CC_MIN	CC_MAX
39	241	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	-0.020	0.123	4	2
39	242	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	0.002	-0.438	5	2
39	243	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	-0.012	-0.280	1	4
39	244	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	-0.012	0.080	1	4
39	245	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	-0.329	-0.508	1	4
39	246	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	0.081	0.145	1	4
39	247	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	-0.012	-0.348	1	8
39	248	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	-0.012	0.087	1	8
40	249	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	-0.018	-0.408	8	2
40	250	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	0.007	0.124	8	2
40	251	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	0.000	0.085	1	4
40	252	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	0.000	-0.217	1	4
40	253	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	0.080	0.130	3	4
40	254	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	-0.285	-0.430	3	4
40	255	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	0.002	0.080	1	8
40	256	2	524.14	182.	15	3832.	12813.	0.002	-0.258	1	8
41	257	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	-0.084	-0.451	8	2
41	258	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	-0.123	-0.487	8	2
41	259	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	0.051	0.258	8	2
41	260	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	0.044	0.238	8	2
41	261	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	0.008	0.084	1	4
41	262	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	0.028	0.108	1	4
41	263	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	-0.024	-0.135	3	4
41	264	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	0.008	-0.158	1	4
41	265	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	0.181	0.238	3	2
41	266	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	0.188	0.258	3	2
41	267	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	-0.334	-0.487	3	2
41	268	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	-0.308	-0.451	3	2
41	269	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	0.013	0.101	3	8
41	270	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	-0.014	-0.084	3	2
41	271	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	-0.074	-0.282	1	8
41	272	2	188.70	148.	8	4451.	8188.	-0.024	-0.224	1	8
42	288	3	133.43	137.	8	5287.	10579.	-0.008	-0.007	3	2
42	290	3	133.43	137.	8	5287.	10579.	0.008	0.019	3	2
42	291	3	133.43	137.	8	5287.	10579.	0.008	0.019	4	2
42	292	3	133.43	137.	8	5287.	10579.	-0.008	-0.007	4	2
42	293	3	133.43	137.	8	5287.	10579.	-0.001	-0.002	2	4
42	294	3	133.43	137.	8	5287.	10579.	-0.027	-0.048	4	2
42	295	3	133.43	137.	8	5287.	10579.	-0.027	-0.048	3	2
42	296	3	133.43	137.	8	5287.	10579.	-0.001	-0.002	2	3

==== REVISION : CARGAS ACTUANTES VS. RESISTENCIAS ====

OPO	Nº	IMP	LONGITUD	KL/R	PERFIL	CAP_COMP	CAP_TEN	REL_MIN	REL_MAX	CC_MIN	CC_MAX
43	275	3	288.80	227.	8	1903.	10579.	-0.041	-0.075	3	2
43	276	3	182.45	152.	8	4279.	10579.	-0.012	-0.027	3	2
43	277	3	288.80	227.	8	1903.	10579.	-0.041	-0.075	3	2
43	278	3	182.45	152.	8	4279.	10579.	-0.012	-0.027	3	2
43	281	3	288.80	227.	8	1903.	10579.	0.007	0.014	4	2
43	282	3	182.45	152.	8	4279.	10579.	0.010	0.018	4	2
43	285	3	288.80	227.	8	1903.	10579.	0.007	0.014	4	2
43	288	3	182.45	152.	8	4279.	10579.	0.010	0.018	4	2
44	297	3	37.80	50.	1	8848.	5443.	-0.002	-0.002	1	1
44	298	3	37.80	50.	1	8848.	5443.	-0.002	-0.002	1	1
44	299	3	37.80	50.	1	8848.	5443.	-0.002	-0.002	1	1
44	300	3	37.80	50.	1	8848.	5443.	-0.002	-0.002	1	1
45	273	3	182.45	152.	8	4279.	10579.	0.010	0.018	3	2
45	274	3	288.80	227.	8	1903.	10579.	0.007	0.014	3	2
45	279	3	182.45	152.	8	4279.	10579.	-0.012	-0.027	4	2
45	280	3	288.80	227.	8	1903.	10579.	-0.041	-0.075	4	2
45	283	3	182.45	152.	8	4279.	10579.	-0.012	-0.027	4	2
45	284	3	288.80	227.	8	1903.	10579.	-0.041	-0.075	4	2
45	287	3	182.45	152.	8	4279.	10579.	0.010	0.018	3	2
45	288	3	288.80	227.	8	1903.	10579.	0.007	0.014	3	2
46	309	2	258.58	195.	8	2840.	10258.	0.040	0.214	8	2
46	310	2	258.58	195.	8	2840.	10258.	-0.138	-0.811	8	2
46	311	2	258.58	195.	8	2840.	10258.	-0.021	-0.337	1	4
46	312	2	258.58	195.	8	2840.	10258.	-0.021	0.080	1	4
46	313	2	258.58	195.	8	2840.	10258.	-0.560	-0.811	3	2
46	314	2	258.58	195.	8	2840.	10258.	0.148	0.214	3	2
46	315	2	258.58	195.	8	2840.	10258.	0.010	-0.384	1	8
46	318	2	258.58	195.	8	2840.	10258.	0.010	0.110	1	8
47	317	2	151.97	150.	4	3433.	7877.	0.001	-0.005	2	3
47	318	2	151.97	150.	4	3433.	7877.	-0.023	-0.030	3	2
47	319	2	151.97	150.	4	3433.	7877.	0.001	-0.005	2	3
47	320	2	151.97	150.	4	3433.	7877.	0.001	-0.005	2	4
47	321	2	151.97	150.	4	3433.	7877.	-0.023	-0.030	4	2
47	322	2	151.97	150.	4	3433.	7877.	0.001	-0.005	2	4
47	323	2	151.97	150.	4	3433.	7877.	-0.023	-0.030	4	2
47	324	2	151.97	150.	4	3433.	7877.	-0.023	-0.030	3	2
48	341	2	223.00	178.	8	3187.	10258.	-0.018	-0.027	3	2
48	342	2	223.00	178.	8	3187.	10258.	0.003	0.008	4	2
48	343	2	223.00	178.	8	3187.	10258.	-0.002	-0.003	2	4
48	344	2	223.00	178.	8	3187.	10258.	-0.002	-0.002	2	3

**** REVISION : CARGAS ACTUALES VS. RESISTENCIAS ****

OPD	Nº	IMP	LONGITUD	KL/R	PERFIL	CAP_COMP	CAP_TEN	REL_MIN	REL_MAX	CC_MIN	CC_MAX
48	345	2	223.00	178.	8	3187.	10258.	0.003	0.008	3	2
48	346	2	223.00	178.	8	3187.	10258.	-0.018	-0.027	4	2
48	347	2	223.00	178.	8	3187.	10258.	-0.004	-0.005	4	2
48	348	2	223.00	178.	8	3187.	10258.	-0.004	-0.005	3	2
48	301	2	227.08	151.	15	8178.	20257.	0.002	0.205	8	2
48	302	2	227.08	151.	15	8178.	20257.	-0.127	-0.888	8	2
48	303	2	227.08	151.	15	8178.	20257.	-0.013	-0.288	1	4
48	304	2	227.08	151.	15	8178.	20257.	-0.013	0.080	1	4
48	305	2	227.08	151.	15	8178.	20257.	-0.478	-0.888	3	2
48	306	2	227.08	151.	15	8178.	20257.	0.138	0.205	3	2
48	307	2	227.08	151.	15	8178.	20257.	-0.008	-0.347	2	8
48	308	2	227.08	151.	15	8178.	20257.	-0.008	0.100	2	8
50	348	2	828.81	124.	8	8338.	8188.	0.078	0.518	8	2
50	350	2	828.81	124.	8	8338.	8188.	-0.148	-0.718	8	2
50	351	2	828.81	124.	8	8338.	8188.	-0.025	-0.288	1	4
50	352	2	828.81	124.	8	8338.	8188.	-0.025	0.183	1	4
50	353	2	828.81	124.	8	8338.	8188.	-0.488	-0.718	3	2
50	354	2	828.81	124.	8	8338.	8188.	0.348	0.518	3	2
50	355	2	828.81	124.	8	8338.	8188.	-0.020	-0.358	2	8
50	356	2	828.81	124.	8	8338.	8188.	-0.020	0.243	2	8
51	357	1	87.02	48.	25	38788.	38588.	0.312	0.804	8	2
51	358	1	87.02	48.	25	38788.	38588.	-0.238	-0.778	4	2
51	359	1	87.02	48.	25	38788.	38588.	-0.518	-0.778	8	2
51	360	1	87.02	48.	25	38788.	38588.	0.038	0.804	4	2
52	381	1	252.83	83.	25	38838.	38588.	0.288	0.511	8	2
52	382	1	252.83	83.	25	38838.	38588.	-0.301	-0.888	4	2
52	383	1	252.83	83.	25	38838.	38588.	-0.818	-0.888	8	2
52	384	1	252.83	83.	25	38838.	38588.	0.001	0.511	4	2
53	385	1	252.81	83.	25	38810.	38588.	0.324	0.537	3	2
53	386	1	252.81	83.	25	38810.	38588.	-0.337	-0.832	4	2
53	387	1	252.81	83.	25	38810.	38588.	-0.848	-0.832	3	2
53	388	1	252.81	83.	25	38810.	38588.	0.028	0.537	4	2
54	389	1	303.17	75.	28	43828.	48813.	0.288	0.450	3	2
54	370	1	303.17	75.	28	43828.	48813.	-0.307	-0.807	4	2
54	371	1	303.17	75.	28	43828.	48813.	-0.558	-0.807	3	2
54	372	1	303.17	75.	28	43828.	48813.	0.038	0.450	4	2
55	373	1	353.88	88.	28	37817.	48813.	0.273	0.461	3	2
55	374	1	353.88	88.	28	37817.	48813.	-0.388	-0.878	4	2

**** REVISION : CARGAS ACTUAENTES VS. RESISTENCIAS ****

OPO	NO	IMP	LONGITUD	KL/R	PERFIL	CAP_COMP	CAP_TEN	REL_MIN	REL_MAX	CC_MIN	CC_MAX
55	375	1	353.00	80.	28	37817.	48813.	-0.671	-0.978	3	2
55	376	1	353.00	80.	28	37817.	48813.	0.050	0.461	4	2
56	377	1	353.00	80.	28	37820.	48813.	0.276	0.488	3	2
56	378	1	353.00	80.	28	37820.	48813.	-0.412	-1.011	4	2
56	379	1	353.00	80.	28	37820.	48813.	-0.892	-1.011	3	2
56	380	1	353.00	80.	28	37820.	48813.	0.058	0.488	4	2
57	381	1	404.20	80.	28	47744.	48813.	0.277	0.473	3	2
57	382	1	404.20	80.	28	47744.	48813.	-0.348	-0.830	4	2
57	383	1	404.20	80.	28	47744.	48813.	-0.586	-0.830	3	2
57	384	1	404.20	80.	28	47744.	48813.	0.083	0.473	4	2
58	385	1	404.20	80.	28	47744.	48813.	0.275	0.473	3	2
58	386	1	404.20	80.	28	47744.	48813.	-0.380	-0.847	4	2
58	387	1	404.20	80.	28	47744.	48813.	-0.577	-0.847	3	2
58	388	1	404.20	80.	28	47744.	48813.	0.083	0.473	4	2
59	389	1	404.22	80.	28	47743.	48813.	0.275	0.477	3	2
59	390	1	404.22	80.	28	47743.	48813.	-0.368	-0.904	4	2
59	391	1	404.22	80.	28	47743.	48813.	-0.811	-0.904	3	2
59	392	1	404.22	80.	28	47743.	48813.	0.088	0.477	4	2
60	393	1	151.57	75.	28	43828.	48813.	0.270	0.472	3	2
60	394	1	151.57	75.	28	43828.	48813.	-0.417	-0.955	4	2
60	395	1	151.57	75.	28	43828.	48813.	-0.849	-0.955	3	2
60	396	1	151.57	75.	28	43828.	48813.	0.083	0.472	4	2
61	397	1	879.10	74.	28	44369.	48813.	0.288	0.489	3	2
61	398	1	879.10	74.	28	44369.	48813.	-0.415	-0.947	4	2
61	399	1	879.10	74.	28	44369.	48813.	-0.845	-0.947	3	2
61	400	1	879.10	74.	28	44369.	48813.	0.080	0.489	4	2
62	333	2	157.88	198.	4	1977.	7999.	-0.004	-0.005	4	2
62	334	2	157.88	198.	4	1977.	7999.	-0.032	-0.054	3	2
62	335	2	157.88	198.	4	1977.	7999.	0.008	0.011	3	2
62	336	2	157.88	198.	4	1977.	7999.	-0.004	-0.004	2	4
62	337	2	157.88	198.	4	1977.	7999.	-0.004	-0.004	2	3
62	338	2	157.88	198.	4	1977.	7999.	0.008	0.011	4	2
62	339	2	157.88	198.	4	1977.	7999.	-0.031	-0.054	4	2
62	340	2	157.88	198.	4	1977.	7999.	-0.004	-0.005	3	2
63	325	2	200.77	284.	1	822.	5443.	-0.038	-0.078	3	2
63	326	2	200.77	284.	1	822.	5443.	0.009	0.015	3	2
63	327	2	200.77	284.	1	822.	5443.	-0.038	-0.078	3	2
63	328	2	200.77	284.	1	822.	5443.	0.009	0.015	3	2

**** REVISION : CARGAS ACTUAENTES VS. RESISTENCIAS ****

OPD	NB	IMP	LONGITUD	KL/R	PERFIL	CAP_COMP	CAP_TEN	REL_MIN	REL_MAX	CC_MIN	CC_MAX
83	328	2	200.77	284.	1	822.	5443.	0.008	0.015	4	2
83	330	2	200.77	284.	1	822.	5443.	-0.037	-0.078	4	2
83	331	2	200.77	284.	1	822.	5443.	0.008	0.015	5	2
83	332	2	200.77	284.	1	822.	5443.	-0.037	-0.078	5	2
84	42	2	180.00	178.	4	2447.	7877.	-0.440	-0.508	2	3
84	44	2	180.00	178.	4	2447.	7877.	-0.444	-0.510	2	3
85	54	2	180.00	178.	4	2447.	7877.	0.180	0.181	2	1
85	58	2	180.00	178.	4	2447.	7877.	0.180	0.183	2	3
86	58	2	180.00	178.	4	2447.	7877.	0.217	0.272	4	2
86	80	2	180.00	178.	4	2447.	7877.	-0.021	0.078	2	4
87	171	2	80.00	115.	4	5705.	7877.	0.081	0.384	2	4
87	172	2	80.00	115.	4	5705.	7877.	-0.010	-0.270	3	4
87	175	2	80.00	115.	4	5705.	7877.	0.148	0.488	2	8
87	178	2	80.00	115.	4	5705.	7877.	0.088	-0.298	3	8

TIEMPO CPU: 38.80 Seg.

APENDICE B: CALCULO DE CARGAS EXTERNAS

En este Apéndice se muestra la forma en que se calcularon las cargas externas sobre la torre para el ejemplo de aplicación que se presenta en el capítulo 4, correspondientes a cada utilización considerada, con base en lo establecido en el Capítulo C.2.3 del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad, [5].

B.1 CONDICIONES BASICAS, COMBINACIONES Y FACTORES DE CARGA

El Manual recomienda, en su sección 3.6, emplear para el análisis y diseño de las torres de transmisión las siguientes combinaciones y factores de carga:

- 1) $(A + B) 1.1 + (C1 + D1 + G) 1.5$
- 2) $(A + B + C1 + D1 + F + G) 1.1$
- 3) $(A + B + C2 + D2 + G) 1.1$
- 4) $(B + E) 1.1$

TABLA B.1

Asimismo, recomienda incluir otras 2 combinaciones de carga en aquellos casos en los que se tenga evidencia confiable de la aparición periódica de cargas debidas a la acumulación de hielo sobre los cables. En este trabajo no se toman en cuenta tales combinaciones considerando que las Referencias [8, 9, 10] clasifican, para este efecto, la zona

fronteriza entre México y Estados Unidos, como "ligera" y asigna cero milímetros al espesor de la capa de hielo que pudiera acumularse en los cables.

El significado de las literales empleadas en la tabla anterior lo da el Manual en sus secciones 3.5 y 3.5.1 y se explica a continuación:

- (A) Carga vertical debida al peso de cables conductores, cables de guarda, aisladores, herrajes y accesorios. Deberá incluirse además una carga de 200 kg. (peso de 2 trabajadores) en cada fase y 100 kg. en los soportes de los cables de guarda, excepto en la combinación de carga número 3 (viento con velocidad máxima).
- (B) Peso propio de la torre.
- (C) Carga transversal transmitida por los cables a la torre; se calculará para 2 velocidades de viento: media (C1) y máxima (C2). Deberá incluir las fuerzas debidas al cambio de dirección de la línea tomando en cuenta las tensiones mecánicas existentes en los cables calculadas como se indica en la sección III del propio Manual.
- (D) Carga transversal sobre la propia torre debida a la acción del viento. Se calculará también para 2 velocidades de viento: media (D1) y máxima (D2).
- (E) Carga longitudinal sobre la torre debida a la acción del viento con velocidad máxima.
- (F) Carga por rotura de cables. Debe escogerse la alternativa y posición de cables rotos que provoque los elementos mecánicos más adversos sobre la estructura. El valor de la fuerza considerada depende de la tensión mecánica en el cable, previa a la ruptura. Si la torre tiene 8 ó más cables con resistencia a la ruptura mayor que 1350 kg., se considera la ruptura de dos cables; en caso contrario, se considera la ruptura de un solo cable.
- (G) Carga longitudinal sobre la torre debida a tensiones desbalanceadas en los cables para la condición de viento en estudio.

En la sección 3.5.1 el Manual hace las siguientes consideraciones adicionales :

La longitud de los cables para calcular las cargas de peso propio se puede tomar igual al claro de peso. (Ver figura 2.1 del capítulo 2 de este trabajo).

Las velocidades media y máxima para viento y las cargas que éste produce se calcularán de acuerdo con la sección III del propio Manual.

Para el cálculo de las fuerzas debidas al viento sobre los cables, (condiciones C1 y C2), la presión calculada se afectará por un factor de reducción igual a 0.6 cuando el claro de viento sea mayor que 350 m. y la velocidad de diseño sea mayor que 100 km/h.; cuando alguna de estas condiciones no se cumpla, este factor de reducción será 0.8.

La fuerza producida por el viento actuando en dirección transversal sobre crucetas de la torre se tomará igual a 1/3 de la fuerza que resultaría considerando que el viento actuase longitudinalmente.

Para la condición de rotura de cables (F), en torres de suspensión se tomará el 67% del valor de la tensión mecánica en los cables calculada para el caso de velocidad media del viento y temperatura ambiente mínima (máxima tensión mecánica en los cables). Para torres que no sean de suspensión este factor será igual al 133% de dicha tensión.

B.2 DISEÑO POR VIENTO

El Manual establece en su sección III.3.3 la forma en que se calcula la presión que ejerce el viento sobre torres y cables para efectos de diseño estructural de líneas de transmisión. La fórmula básica es:

$$p = 0.0048 G C v_D^2$$

- p es la presión del viento en kg/m²
G es un factor correctivo por altitud
C es un coeficiente de arrastre, adimensional.
v_D es la velocidad de diseño en Km./h.

A su vez G puede calcularse con cualquiera de las dos expresiones siguientes :

$$G = 0.392 B / (273 + T)$$

- B es la presión barométrica en mm. de mercurio.
T es la temperatura ambiente en grados centígrados.

O bien, en forma aproximada :

$$G = (8 + H) / (8 + 2H)$$

H es la altura en Km. sobre el nivel del mar.

Para elementos cilíndricos como cables conductores, de guarda, retenidas y cadenas de aisladores $C = 1.2$. Para la torre, C depende de su geometría, de la forma de los miembros que la componen y del factor de solidez ϕ ; éste se define como la relación entre la proyección vertical del área expuesta de los miembros y el área total encerrada por el perímetro exterior de la zona en consideración. (figura III.4 del Manual). Para torres de sección transversal cuadrada formadas por perfiles tipo ángulo C vale:

$$C = 4 - 6\phi + 4\phi^2$$

La velocidad de diseño se obtiene conforme a la siguiente expresión:

$$V_D = V_R * K * (Z/10)^a * FR$$

- V_R es la velocidad regional. Para efecto del diseño estructural de líneas de transmisión, la República Mexicana se divide en 3 zonas eólicas, cuyas velocidades regionales media y máxima en Km/h. son :

ZONA	VEL. MEDIA	VEL. MAXIMA
A	125	180
B	100	135
C	70	100

TABLA B.2

- K es un factor de exposición para tomar en cuenta el tipo de terreno en la ruta que siga el tendido de la línea. Sus valores se dan en la Tabla III.2 del Manual.

En este trabajo se utilizó $K = 1.0$ que corresponde a campo abierto.

- El factor $(Z/10)^{\alpha}$ es para tomar en cuenta la variación de la velocidad con la altura ($Z > 10$) sobre el terreno. El coeficiente α depende del tipo de terreno y se da en la Tabla III.3 del Manual. En este trabajo se utilizó $\alpha = 0.14$ que corresponde a litoral o campo abierto interior.
- FR es un factor de ráfaga; 1.0 para cables y torres. Solamente cuando la torre tenga más de 60 metros de altura y se considere actuando viento con velocidad media, se tomará para la torre $FR = 1.3$

B.3 COMBINACIONES DE CARGA EMPLEADAS

Como se mencionó en el capítulo 4, la torre para el ejemplo de aplicación es autosoportada, de suspensión, de 2 circuitos para 230 KV. Con base en los requisitos expuestos en los párrafos anteriores, se calcularon las cargas externas considerándose, tanto para el diseño original, como para determinar el intervalo de utilización mecánica correspondiente a cada zona eólica, las siguientes 6 combinaciones de carga:

1. Viento con velocidad media. Sin rotura de cables.
2. Viento con velocidad máxima. Sin rotura de cables.
3. Viento con velocidad media. Rotura del cable de guarda izquierdo.
4. Viento con velocidad media. Rotura del cable conductor superior izquierdo.
5. Viento con velocidad media. Rotura del cable conductor central izquierdo.
6. Viento con velocidad media. Rotura del cable conductor inferior izquierdo.

Estas combinaciones de carga resultan de aplicar las combinaciones 1, 2 y 3 de la Tabla B.1. La combinación de carga 4 de la Tabla se eliminó porque contiene a la condición básica de carga "E" que se refiere a la carga longitudinal sobre la torre debida a la acción del viento con velocidad máxima. Debido a su simetría, la torre

presenta casi la misma área expuesta en dirección longitudinal que en dirección transversal pero, en esta última dirección, se agrega el efecto del viento sobre los cables. Por lo anterior, rigen las condiciones básicas C2 + D2 sobre la condición básica E.

En las combinaciones de carga consideradas tampoco se incluyó la condición básica "G" que se refiere a la carga longitudinal sobre la torre debida a tensiones desbalanceadas en los cables. Esto es porque el Manual en su sección 3.3 indica que las tensiones longitudinales desbalanceadas pueden desprejarse si la diferencia entre los claros a cada lado de una torre no se aproxima al 50%; así se consideró para este trabajo, tomando en cuenta los resultados del cálculo de tensiones mecánicas en los cables que se presentan más adelante.

Por otra parte, se recurrió al programa CALCULA_CARGAS para calcular las fuerzas que transmiten los cables y cadenas de aisladores a la torre correspondientes a cada una de las 6 combinaciones de carga de cada uno de los usos analizados para la torre. El programa toma en cuenta las velocidades regionales, la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el terreno, las tensiones mecánicas en los cables y demás datos que se indican en el capítulo 3 de este trabajo. Para tales cálculos, cabe mencionar que, de acuerdo a los datos del proyecto, el peso de cada cadena de aisladores es de 119 kilogramos, su longitud 2.5 metros y su diámetro promedio 0.18 metros. Considerando que se trata de una torre de suspensión, el valor de la fuerza por rotura de cable se tomó igual al 67% de la tensión mecánica en el cable previa a la ruptura.

B.4 TENSIONES MECANICAS EN CABLES

El cálculo de flechas y tensiones mecánicas en los cables se realizó usando el programa FLETEN que forma parte del SIDETT, (ver figura 3.1). El programa FLETEN se basa en la llamada Ecuación de cambio de estado que presenta el Manual en su sección III.3.2 tomada de su Referencia [13].

Para la determinación de las presiones de viento sobre los cables y las tensiones mecánicas correspondientes en la zona eólica B, se consideró la velocidad de viento a una altura promedio de 39.0 metros para los cables de guarda y de 30.5 metros para los cables conductores. Estos valores resultan de considerar sus respectivas flechas para el caso de viento con velocidad media y temperatura ambiente de 20 grados centígrados, como puede apreciarse en las Tablas B.3 y B.4 donde se incluyen también los datos de los cables empleados.

GUARDAS SM, 3/8" CABLEADO 7, ZONA EOLICA B, ALTURA = 39.0 M.

DIAMETRO [M] 9.50000E-03
 AREA [M^2] 5.12000E-05
 PESO [KG/M] 4.08000E-01
 RESISTENCIA [KG] 3.18000E+03
 COEF. DILATAION 1.19000E-05
 MOD. ELAST. [KG/M^2] 1.90000E+10

CLARO	ESPESOR HIELO	PRESION VIENTO	TEMP.	FLECHA	TENSION	RESF. ROT.
450.0	0.000	0.0	50.0	18.51	555.2	0.178
450.0	0.000	0.0	-10.0	17.09	601.4	0.190
450.0	0.000	49.4	-10.0	17.73	855.9	0.280
450.0	0.000	44.3	20.0	18.31	808.5	0.258
450.0	0.000	80.8	20.0	19.03	1154.4	0.355
550.0	0.000	0.0	50.0	27.85	555.2	0.178
550.0	0.000	0.0	-10.0	26.21	585.7	0.185
550.0	0.000	49.4	-10.0	26.85	873.8	0.277
550.0	0.000	44.3	20.0	27.45	805.8	0.255
550.0	0.000	80.8	20.0	28.20	1164.1	0.368
650.0	0.000	0.0	50.0	38.62	555.2	0.178
650.0	0.000	0.0	-10.0	37.17	576.8	0.183
650.0	0.000	49.4	-10.0	37.80	866.7	0.274
650.0	0.000	44.3	20.0	38.41	804.2	0.254
650.0	0.000	80.8	20.0	39.18	1170.1	0.370
750.0	0.000	0.0	50.0	51.42	555.2	0.178
750.0	0.000	0.0	-10.0	49.97	571.3	0.181
750.0	0.000	49.4	-10.0	50.59	862.2	0.273
750.0	0.000	44.3	20.0	51.21	803.1	0.254
750.0	0.000	80.8	20.0	51.99	1174.1	0.372
850.0	0.000	0.0	50.0	66.04	555.2	0.178
850.0	0.000	0.0	-10.0	64.59	567.7	0.180
850.0	0.000	49.4	-10.0	65.21	859.1	0.272
850.0	0.000	44.3	20.0	65.83	802.4	0.254
850.0	0.000	80.8	20.0	66.62	1176.5	0.372
950.0	0.000	0.0	50.0	82.50	555.2	0.178
950.0	0.000	0.0	-10.0	81.04	565.2	0.179
950.0	0.000	49.4	-10.0	81.66	857.0	0.271
950.0	0.000	44.3	20.0	82.28	801.9	0.254
950.0	0.000	80.8	20.0	83.08	1178.8	0.373

TABLA B.3 FLECHAS Y TENSIONES

CABLE CONDUCTOR CANARY, ZONA EOLICA B, ALTURA PROM. = 30.6 M.

DIAMETRO [M]	2.95100E-02
AREA [M^2]	5.15200E-04
PESO [KG/M]	1.72300E+00
RESISTENCIA [KG]	1.46500E+04
COEF. DILATACION	1.93000E-05
MOD. ELAST. [KG/M^2]	7.00000E+09

CLARO	ESPESOR HIELO	PRESION VIENTO	TEMP.	FLECHA	TENSION	WESF.ROT.
450.0	0.000	0.0	50.0	16.94	2574.0	0.176
450.0	0.000	0.0	-10.0	14.44	3020.1	0.206
450.0	0.000	46.1	-10.0	14.94	3718.6	0.254
450.0	0.000	41.4	20.0	16.09	3322.1	0.227
450.0	0.000	75.4	20.0	16.70	4266.4	0.291
550.0	0.000	0.0	50.0	25.31	2574.0	0.176
550.0	0.000	0.0	-10.0	22.77	2861.6	0.195
550.0	0.000	46.1	-10.0	23.25	3569.9	0.244
550.0	0.000	41.4	20.0	24.43	3266.4	0.223
550.0	0.000	75.4	20.0	25.05	4247.4	0.290
650.0	0.000	0.0	50.0	35.35	2574.0	0.176
650.0	0.000	0.0	-10.0	32.79	2775.2	0.189
650.0	0.000	46.1	-10.0	33.25	3485.6	0.238
650.0	0.000	41.4	20.0	34.45	3236.6	0.221
650.0	0.000	75.4	20.0	35.09	4235.8	0.289
750.0	0.000	0.0	50.0	47.07	2574.0	0.176
750.0	0.000	0.0	-10.0	44.49	2722.8	0.186
750.0	0.000	46.1	-10.0	44.96	3433.2	0.234
750.0	0.000	41.4	20.0	46.16	3216.6	0.220
750.0	0.000	75.4	20.0	46.80	4226.3	0.289
850.0	0.000	0.0	50.0	60.45	2574.0	0.176
850.0	0.000	0.0	-10.0	57.88	2688.7	0.184
850.0	0.000	46.1	-10.0	58.33	3396.6	0.232
850.0	0.000	41.4	20.0	59.54	3203.0	0.219
850.0	0.000	75.4	20.0	60.18	4223.1	0.288
950.0	0.000	0.0	50.0	75.52	2574.0	0.176
950.0	0.000	0.0	-10.0	72.93	2665.1	0.182
950.0	0.000	46.2	-10.0	73.39	3377.2	0.231
950.0	0.000	41.4	20.0	74.60	3193.5	0.218
950.0	0.000	75.4	20.0	75.24	4219.4	0.288

TABLA B.4 FLECHAS Y TENSIONES

B.5 CARGAS POR VIENTO SOBRE LA TORRE

Como se explicó en el capítulo 2, para fines de análisis y diseño estructural de torres de transmisión, la acción del viento se maneja como un conjunto de fuerzas estáticas F_1 concentradas en diversos nudos de la torre. Para el ejemplo, en la figura B.1 estos nudos se indican con un pequeño círculo; asimismo, en dicha figura se muestran los valores de las fuerzas concentradas en cada nudo. Este conjunto de fuerzas "normalizadas" constituye el caso de carga número 26 para la generación de la matriz $[B^*]$ de coeficientes de influencia a lo cual se hace referencia en el capítulo 4 y en la figura 4.3.

Para determinar este conjunto de fuerzas se consideró, de acuerdo al Manual, que una vez definida la geometría de la estructura y el exponente α que toma en cuenta la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el terreno, la distribución de fuerzas debidas a la acción del viento sobre el cuerpo de la torre queda fija; solamente varía su intensidad en función de la velocidad regional de cada zona eólica. En consecuencia, se dividió a la torre en áreas tributarias para los nudos indicados en la figura B.1; para cada una se calculó la proyección vertical del área total encerrada por el perímetro exterior y del área expuesta de los miembros; se obtuvo el factor de solidez ϕ y el correspondiente valor del coeficiente de arrastre C. Para facilitar los cálculos, se usó 100 km/hr como velocidad regional del viento y, a partir de este valor, se calculó la velocidad del viento para cada área tributaria tomando en cuenta su variación con la altura sobre el terreno. Las fuerzas por viento así obtenidas se repartieron igualmente sobre los nudos localizados al mismo nivel, como se indica en la figura B.1 y, finalmente, para "normalizarlas" simplemente se obtuvo la proporción de cada una respecto a la más pequeña a la cual se asoció un valor igual a 10.0 para facilitar las operaciones. Para obtener las fuerzas por viento sobre el cuerpo de la torre correspondientes a las diferentes zonas eólicas, factores de carga y a los casos de velocidad media o velocidad máxima, simplemente se afectan las fuerzas "normalizadas" por los factores necesarios que se incluyen en los archivos FCPP_VTO.DAT mencionados en el capítulo 3.

Para el caso específico de la utilización mecánica máxima que se obtuvo para la zona eólica B, los valores numéricos resultantes para las 6 combinaciones de carga analizadas se listan en el Anexo A en el archivo de salida del programa CALCULA_CARGAS y se muestran a continuación como "árboles de carga" en la figura B.2.

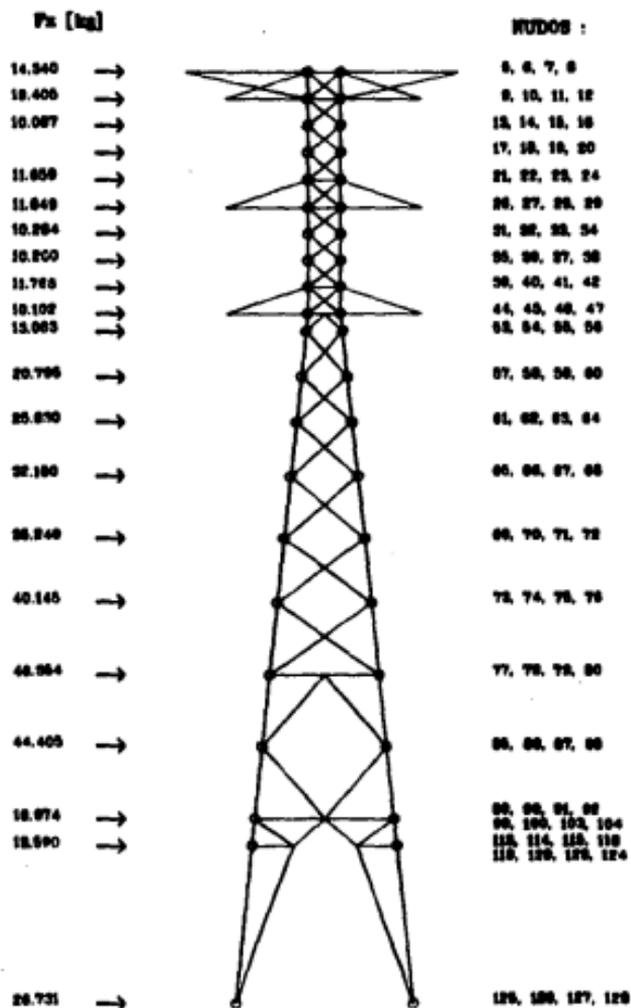
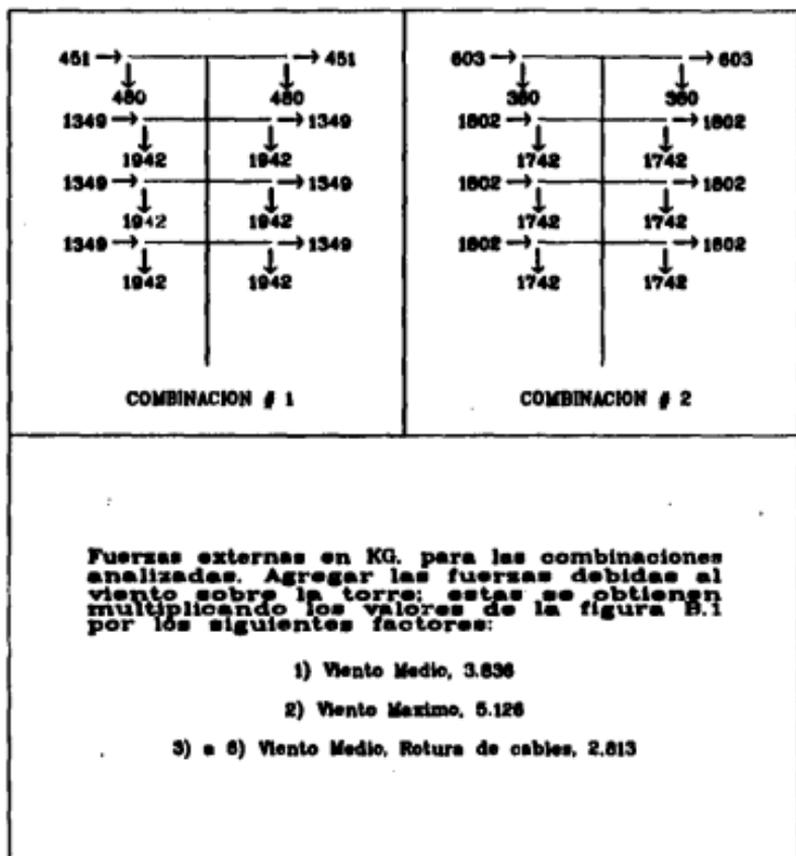


FIGURA B.1 FUERZAS "NORMALIZADAS" POR VIENTO SOBRE EL CUERPO DE LA TORRE



**FIGURA B.2 "ARBOLES DE CARGA"
ZONA EOLICA B. USO 0/765/850**

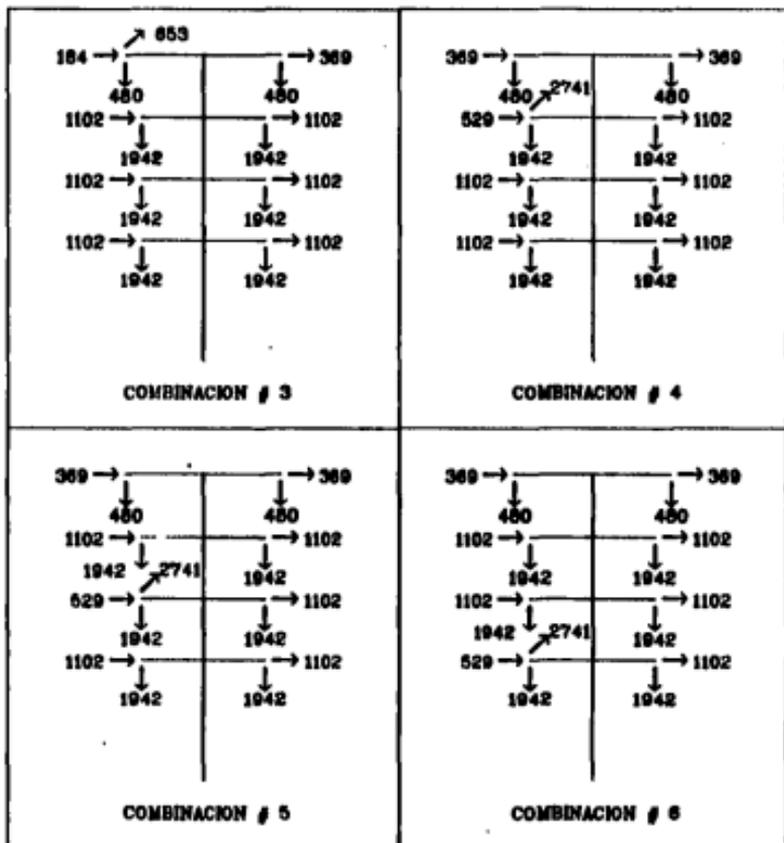


FIGURA B.2 (cont.)

FACULTAD DE

INGENIERIA

MAESTRIA EN INGENIERIA (ESTRUCTURA)

CLAVE: 011 61

AÑO : 1989