

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
SECCION DE POSGRADO



**“TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA
RENOVABLE”**

Tesis para optar el Grado de Maestro en Ciencias con
Mención en Ingeniería Estructural

Presentado por el Ingeniero:
CARLOS ALEJANDRO CORDOVA ROJAS

LIMA – PERU

2,010



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

ING. CARLOS ALEJANDRO CÓRDOVA ROJAS

Presentado a la sección de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil en cumplimiento de los requerimientos para optar el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERIA
ESTRUCTURAL

de la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Junio del 2010

© 2010, Derechos reservados del autor, se autoriza la reproducción a la UNI

Autor:

ING. CARLOS ALEJANDRO CORDOVA ROJAS
Facultad de Ingeniería Civil
Junio del 2010

Recomendado por:

Dr. JAVIER PIQUE DEL POZO
Profesor de Posgrado
Asesor de Tesis

Aceptado por:

Dr. JOSE CARLOS MATIAS LEON
Jefe de la Sección de Posgrado



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

AGRADECIMIENTO

Agradezco a los profesores de la Escuela de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, quienes con sus valiosas enseñanzas colaboraron con el desarrollo del presente trabajo, en especial a mi asesor Dr. Javier Pique del Pozo, al Dr. Hugo Scaletti Farina quien colaboro con el desarrollo del modelo estructural y al Ing. Juan Cruz Rodríguez, Profesor de Termodinámica de la facultad de Ingeniería Mecánica de la UNI.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

DEDICATORIA

A mi adorable esposa e hijos, quienes con su amor me ayudan a lograr mis objetivos, y a todos los que de una u otra manera contribuyen a salvar nuestro planeta.



TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

RESUMEN

Debido a la contaminación del medio ambiente producto de la emanación de gases contaminantes hacia la atmosfera proveniente del uso de combustibles fósiles, la deforestación de los bosques y el aumento de la población, han intensificado el denominado “efecto invernadero”, haciendo que la temperatura del planeta se eleve con repercusiones desastrosas, ocasionando la escases de agua, sequias, incendios, inundaciones, derretimiento de los hielos polares y el aumento del nivel de los océanos, este incremento de temperatura es el llamado “calentamiento global”, que está ocasionando cambios climáticos que traen como consecuencia grandes problemas para la humanidad, siendo las plantas de energía convencional o no renovable, que funcionan quemando combustibles fósiles, aquellas que más contaminan la atmosfera con dióxido de carbono, metano y otros gases. Es por tal motivo que se hace necesario plantear nuevas fuentes de energía, la cual tiene que ser limpia y renovable, que no contamine nuestra atmósfera, tal como se plantea en el presente trabajo de tesis, en el que se propone como fuente de energía renovable la “TORRE SOLAR”, que consiste en una estructura tipo chimenea de gran altura, cuyo sistema combina la tecnología solar térmica, eólica y geotérmica para generar electricidad limpia, basándose en un fenómeno tan simple como es la convección (el aire caliente pesa menos y tiende a subir).

La planta consta de una superficie circular de terreno que se recubre con un material transparente (plástico o vidrio) con una torre hueca central. El aire al calentarse asciende por la chimenea moviendo unas turbinas que se encuentran en su interior, unas tuberías enterradas en el terreno sirven de almacenamiento térmico, lo que garantiza el funcionamiento las 24 horas del día (aun sin sol), además la superficie transparente puede ser utilizada como invernadero agrícola y la torre como mirador turístico.

Esta fuente de energía renovable es totalmente limpia, su único combustible es el sol y la tecnología utilizada en su construcción es muy simple (plástico o cristal y una simple torre de concreto armado) por lo que la electricidad generada resultará pronto competitiva, con mayor razón en la zona de interés de nuestro estudio (Región Loreto – Amazonía Peruana) considerada el pulmón del mundo. Siendo el caso que en dichos lugares, se están utilizando como fuente de energía, las centrales térmicas, que funcionan quemando petróleo, contaminando enormemente la atmosfera con dióxido de carbono.



SOLAR UPDRAFT TOWER AS A SOURCE OF RENEWABLE ENERGY

SUMMARY

Due to the environmental pollution because of the pollutant gas emissions towards the atmosphere as a result of the use of fossil fuels, forest deforestation and the population increase have intensified the “greenhouse effect,” making the planet’s temperature raise with terrible consequences, generating the shortage of water, droughts, fires, floods, melting of polar ice caps and the increase of the oceans’ level. This increase of temperature is named “global warming” which is causing climate changes giving big problems to humans, being the conventional or non-renewable power plants, which burn fossil fuels, those who pollute the most with carbon dioxide, methane and other gases. For that reason, it is necessary to consider new energy sources which have to be clean and renewable for not polluting our atmosphere, as presented in this thesis project that suggest the use of a “SOLAR UPDRAFT TOWER” as a source of renewable energy. This tower consists of a very tall chimney-like structure, which system combines solar, thermal, wind and geothermal technology to generate clean electricity, based on a very simple phenomenon like convection (warm air weights less and tends to rise up).

The plant has a round surface of land covered by a transparent material (plastic or glass) with a superficial central tower. When the air warms, it rises up by the chimney moving some turbines located inside it, some pipes buried in the land serve as thermal storage, guarantying the functioning during the 24 hours of a day (even without sun); also, the transparent surface can be used as an agricultural greenhouse and the tower as a tourist viewpoint.

This renewable energy source is totally clean, its only fuel is the sun and the technology used in its construction is very simple (plastic or crystal and a simple tower of reinforced concrete), so the electricity generated will become competitive very soon, mainly in the area of interest of our research (Region of Loreto – Peruvian Amazonia), considered the lungs of the world. Since those places are being used as energy source, the thermal stations that operate by burning oil pollute the atmosphere with carbon dioxide.



INDICE GENERAL

RESUMEN EN ESPAÑOL	4
RESUMEN EN INGLES	5
CAPITULO 1	
CONCEPTOS PRELIMINARES	
1.1 Antecedentes	8
1.2 Efecto invernadero, Calentamiento global	12
1.3 Acciones tomadas para mitigar el efecto invernadero	15
1.4 Fuentes de energía renovable	20
1.5 Zonas de interés para el desarrollo del presente estudio	33
1.6 Oferta y demanda de energía en las zonas de interés	36
CAPITULO 2:	
PRE-DIMIENSIONAMIENTO DE LA TORRE SOLAR	
2.1 Potencia de la planta	43
2.2 Conceptos de energía eólica	44
2.3 Conceptos de termodinámica usados en el diseño	50
2.4 Conceptos de estabilidad estructural	60
CAPITULO 3:	
CALCULO ESTRUCTURAL DE LA TORRE SOLAR	
3.1 Teoría de análisis dinámico de sistemas continuos	69
3.2 Definición del modelo matemático – SAP 2000	79
3.3 Cargas a considerar en el análisis de la estructura	84
3.4 Análisis por cargas de uso	85
3.5 Análisis por cargas de sismo	87
3.6 Análisis por cargas de viento	101
3.7 Estabilidad de la estructura	120
3.7.1 Verificación de la velocidad de vibración	122
3.8 Análisis por pandeo	125
3.9 Análisis y diseño estructural de la cimentación	
3.9.1 Platea de cimentación	126



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

3.9.2 Cimentación profunda (pilotes) para suelos cohesivos	137
CAPITULO 4:	
DISEÑO DE ELEMENTOS	
4.1 Diseño de elementos de la torre solar	195
CAPITULO 5:	
EVALUACION ECONOMICA DEL PROYECTO	
5.1 Costos y presupuestos del proyecto	203
5.2 Análisis de rentabilidad del proyecto	204
CAPITULO 6:	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
6.1 Conclusiones	221
6.2 Recomendaciones	222
7.- ANEXOS	
7.1 Planos del Proyecto	223
7.2 Cuadro en Excel sobre el cálculo del acero de refuerzo en chimenea	233
7.3 Norma ACI 307.98	235
8.- REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	266



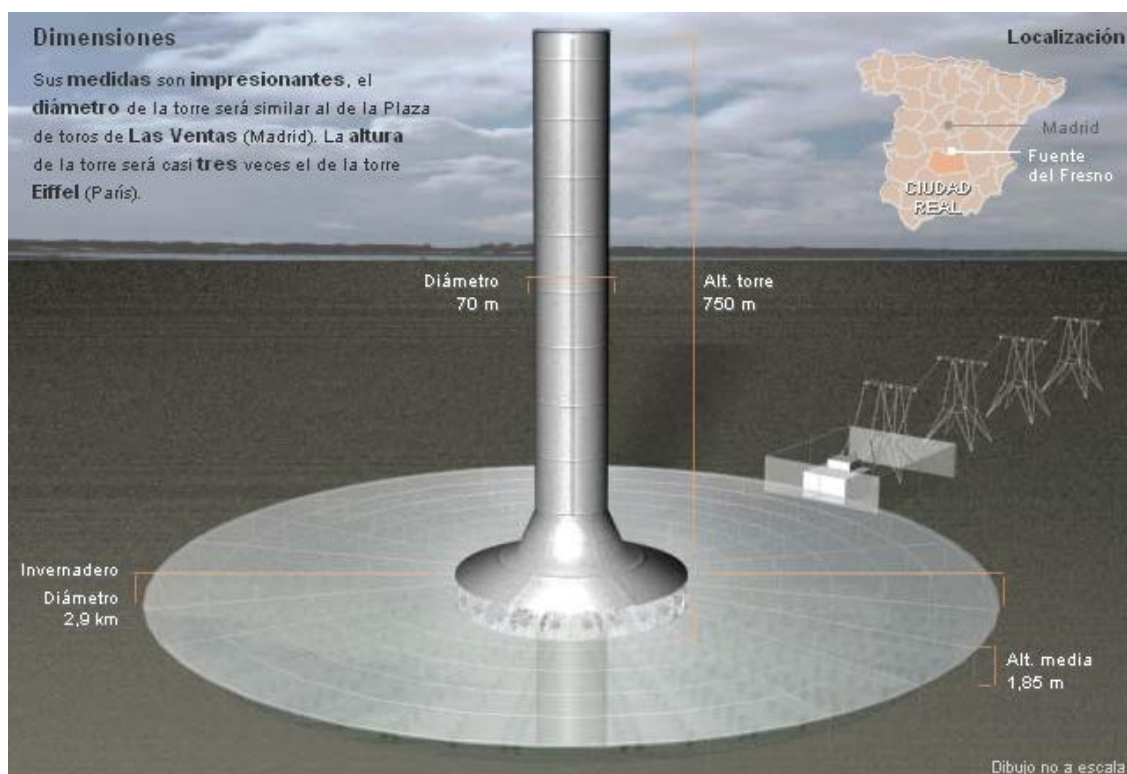
CAPITULO 1:

CONCEPTOS PRELIMINARES

1.1 Antecedentes: (1, 2, 3)

Las Torres o chimeneas solares consisten en un sistema que combina la tecnología solar térmica, eólica y geotérmica para generar electricidad limpia basándose en un fenómeno tan simple como es la convección (el aire caliente pesa menos y tiende a subir). La planta consta de una superficie circular de terreno que se recubre con un material transparente con una torre hueca central, el aire al calentarse asciende por la chimenea moviendo unas turbinas que se encuentran en su interior. Unas tuberías enterradas en el terreno sirven de almacenamiento térmico garantizando el funcionamiento las 24 horas del día (aún sin sol) y además la superficie transparente puede utilizarse como invernadero agrícola.

En los años ochenta estuvo en funcionamiento en Manzanares (Ciudad Real - España) un primer prototipo de 50 KW funcionando durante más de 15,000 horas. Fruto de estos ensayos son varios los proyectos que se están llevando a cabo a nivel mundial entre los que destacan una planta de 40 MW en Ciudad Real y otra de 200 MW en Australia con chimeneas de 750 y 1,000 metros respectivamente.





TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

La energía eólica con sus más de 100 GW instalados en el mundo en la actualidad y con una previsión de 250 GW en el 2012 es sin duda la más madura y más fiable técnicamente hablando de todas las renovables, a esto hay que añadir cero emisiones de gases del efecto invernadero, la menor ocupación de terreno y no suponer consumo alguno de agua. El único inconveniente que tiene es, lógicamente, la necesidad de disponer de viento, recurso que únicamente está disponible en determinadas zonas del planeta.



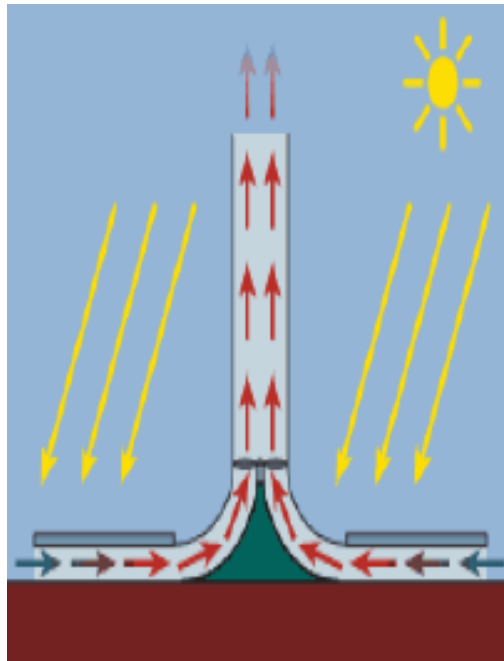
A principios de los años ochenta el ingeniero alemán Jorg Schiach planteó la posibilidad de utilizar la energía térmica del sol para reproducir los fenómenos que rigen la generación del viento y provocar vientos artificiales de velocidad suficiente para mover una turbina eólica convencional. Para ello se basó en un principio básico de la física de los gases, que es que el aire al calentarse disminuye su densidad, tendiendo a ascender hacia zonas superiores de la atmósfera, dejando un vacío que será ocupado por aire frío procedente de la parte inferior, tal como el principio de funcionamiento de los globos aerostáticos. Así surgió el primer diseño de la “Torre Solar”. Esta construcción consiste simplemente en una superficie de forma circular que es cubierta por una material transparente (plástico o vidrio) situado a una cierta altura, constituyendo una especie de invernadero. En la parte central del círculo se construye una torre hueca en cuya base se colocan una serie de turbinas eólicas.



**TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE**

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

La radiación solar atraviesa el recubrimiento transparente, chocando contra el suelo y siendo de nuevo re-irradiado hacia el exterior, pero en este caso con unas longitudes de onda diferentes (en el rango de los infrarrojos) que no son capaces de atravesar de nuevo el material transparente y calientan el aire que se encuentra en el interior. Este, al aumentar su temperatura, disminuye su densidad por lo que tiende a ascender, siendo dirigido hacia la chimenea en la que alcanza velocidades comprendidas entre 50 y 70 km/h.



Las ventajas de esta tecnología que combina la energía eólica, solar y geotérmica con respecto a cada una de ellas es que se puede utilizar en zonas desérticas de gran irradiación pero que no disponen de viento, que aprovecha toda la radiación solar (difusa y directa) no solo la directa como hace la solar térmica de concentración y que aprovecha la capacidad de almacenamiento térmico que tiene el terreno bajo el acristalamiento, pudiéndose acumular energía sin necesidad de sistemas especiales para que la torre funcione también durante las 24 horas del día (para ello dispone de un sistema de tubos auxiliares por los que circula un fluido y calienta el aire por la noche). Por otra parte, no hay ningún consumo de agua y la ocupación del terreno es similar a cualquier otro sistema de generación de energía eléctrica con la ventaja de que además el terreno cubierto con el material transparente se puede utilizar como invernadero para producción agrícola. Como principal inconveniente su bajo rendimiento (entorno al 5%) pero como el combustible es gratuito (el sol) y la tecnología utilizada en su construcción es muy simple



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

(plástico o cristal y una simple torre de concreto o mortero armado), por lo que la electricidad generada resultará pronto competitiva.

El primer prototipo de esta tecnología fue ensayado en Manzanares (Ciudad Real – España), con un recolector de 240 metros de diámetro y una torre de 195 metros. Estuvo en funcionamiento durante siete años (1982 – 1989), en unas instalaciones de Unión Fenosa, donde consiguieron demostrar la viabilidad de la tecnología con una planta que suministraba picos de 50 KW, y que consiguió hacer funcionar de forma continuada una media de 9 horas al día, acumulando un total de 15,000 horas de funcionamiento.



En la actualidad hay dos proyectos en marcha a nivel mundial, uno de 40 MW también en España, concretamente en Fuente del Fresno (Ciudad Real), que con un presupuesto 240 millones de euros será construido por la empresa Campo 3 en colaboración con la empresa alemana Schlaich Bergemann y la participación de la Universidad de Castilla - La Mancha y el Ministerio Medioambiental español. Es un proyecto novedoso en Europa que tiene prevista la construcción de una torre de 750 metros de altura, con un campo de 350 hectáreas de las cuales 250 podrán ser utilizadas como invernaderos horto – frutícolas que con un costo total de 240 millones de euros proporcionara la energía que anualmente consumen 1, 200,000 personas.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

El segundo proyecto en marcha es una planta de 200 MW de potencia y 700 GWh de producción anual que se construirá en el desierto de Nuevo Gales en Australia, dará electricidad para 200,000 hogares suponiendo un ahorro de emisiones de dióxido de carbono equivalente al ahorro de 700,000 barriles de petróleo y, por lo tanto, una reducción de emisiones de dióxido de carbono de 900,000 toneladas. El costo estimado de esta planta es de 380 millones de euros y la superficie acristalada será de 20 km² con un diámetro de 5 km. La torre tendrá un kilómetro de altura, con un espesor en su base de 1.00 metro y un espesor en la parte superior de 25cm. El sol calentará el aire y provocará vientos con velocidades de 56 km/h. que pasará a través de 32 turbinas situadas en la base de la torre con una potencia de 6.5 MW cada una. El proyecto será llevado a cabo por la empresa Solar missions Technologies y para la construcción serán necesarios 20 km² de plástico o cristal y 400,000m³ de concreto.

En la red podemos encontrar un video 3D muy ilustrativo del funcionamiento de la Torre Solar.

1.2 Efecto Invernadero y Calentamiento Global: (4, 5, 6)

El efecto invernadero: es un fenómeno natural que permite la vida en la Tierra. Es causado por una serie de gases que se encuentran en la atmósfera, provocando que parte del calor del sol que nuestro planeta refleja, quede atrapado manteniendo la temperatura media global en +15° centígrados, favorable a la vida, en lugar de -18° centígrados, que resultarían nocivos.

Así, durante muchos millones de años, el efecto invernadero natural mantuvo el clima de la Tierra a una temperatura media relativamente estable y permitía que se desarrollase la vida. Los gases invernadero retenían el calor del sol cerca de la superficie de la tierra, ayudando a la evaporación del agua superficial para formar las nubes, las cuales devuelven el agua a la Tierra, en un ciclo vital que se había mantenido en equilibrio.

Durante unos 160 mil años, la Tierra tuvo dos periodos en los que las temperaturas medias globales fueron alrededor de 5° centígrados más bajas de las actuales. El cambio fue lento, transcurrieron varios miles de años para salir de la era glacial. Ahora, sin embargo, las concentraciones de gases invernadero en la atmósfera están creciendo rápidamente, como consecuencia de que el mundo quema cantidades cada vez mayores de combustibles fósiles y destruye los bosques y praderas, que de otro modo podrían absorber dióxido de carbono y favorecer el equilibrio de la temperatura.



Fuente: UNEP -GRID-Arendal.

Ante ello, la comunidad científica internacional ha alertado que si el desarrollo mundial, el crecimiento demográfico y el consumo energético basado en los combustibles fósiles, siguen aumentando al ritmo actual, antes del año 2050 las concentraciones de dióxido de carbono se habrán duplicado con respecto a las que había antes de la Revolución Industrial. Esto podría acarrear consecuencias funestas para la vida planetaria.

El aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) proveniente del uso de combustibles fósiles (emitidos por las plantas de energía no renovable y los automóviles), ha provocado la intensificación del fenómeno y el consecuente aumento de la temperatura global, el derretimiento de los hielos polares y el aumento del nivel de los océanos.





**TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE**

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

El vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el gas metano (CH₄), los óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃) y los clorofluorocarbonos (CFCs), forman una capa natural en la atmósfera terrestre denominada gases de efecto invernadero (GEI), que retiene parte de la energía proveniente del Sol. El uso de combustibles fósiles, la destrucción de los bosques y praderas, el aumento indiscriminado de la población ha provocado el aumento de los gases de efecto invernadero (GEI), formando una capa cada vez más gruesa en la atmósfera, trayendo como consecuencia el incremento de la temperatura del planeta lo que conocemos con el nombre del “calentamiento global”, produciendo cambios climáticos que están ocasionando graves problemas para la humanidad. Por lo tanto es necesario plantear nuevas fuentes de energía, la cual tiene que ser limpia y renovable y que no contaminen nuestra atmósfera, tal como se plantea en el presente trabajo de tesis, en la que se propone como fuente de energía renovable la “TORRE SOLAR”, con mayor razón en la zona de interés del estudio (Región Loreto – Amazonía Peruana) considerada el pulmón del mundo, siendo el caso que en dichos lugares se están utilizando como fuente de energía, las centrales térmicas que funcionan con petróleo, contaminando enormemente el medio ambiente con dióxido de carbono.

Los denominados gases de efecto invernadero (GEI) o gases invernadero, responsables del efecto descrito, son:

- Vapor de agua (H₂O).
- Dióxido de carbono (CO₂).
- Metano (CH₄).
- Óxidos de nitrógeno (NO_x).
- Ozono (O₃).
- Clorofluorocarbonos (CFCs).

Si bien todos ellos (salvo los CFCs) son naturales, en tanto que ya existían en la atmósfera antes de la aparición del hombre, desde la Revolución Industrial y debido principalmente al uso intensivo de los combustibles fósiles en las actividades industriales y el transporte, se han producido sensibles incrementos en las cantidades de dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno emitidas a la atmósfera, con el agravante de que otras actividades humanas, como la deforestación, han limitado la capacidad regenerativa de la atmósfera para eliminar el dióxido de carbono, principal responsable del efecto invernadero. Los países que más contaminan son: Estados Unidos (22.2%), China (18.4%) y la Unión Europea (11.4%).



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Estos cambios causan un paulatino incremento de la temperatura terrestre, el llamado cambio climático o calentamiento global que, a su vez, es origen de otros problemas ambientales:

CONSECUENCIAS:

- Desertización y sequías, que causan escases de agua y hambrunas.
- Deforestación, que aumenta aún más el cambio climático.
- Aumento de los niveles del mar, que causan las inundaciones costeras.
- Huracanes, ciclones, debido a la mayor evaporación de cantidad de agua.
- Fusión de los casquetes polares y otros glaciares, que causa un ascenso del nivel del mar, sumergiendo zonas costeras. Sólo influye en dicha variación el hielo apoyado en suelo firme, ya que el hielo que flota en el mar no aumenta el nivel del agua.
- Destrucción de ecosistemas, extinción de especies vegetales y animales.
- Grandes olas de calor, provocando la muerte de niños y ancianos.
- Nuevas plagas y enfermedades transmitidas por mosquitos.
- Además, los clorofluorocarbonos (CFCs) son los responsables de la destrucción de la capa de ozono, el que nos protege de la radiación ultravioleta proveniente del sol, ocasionado enfermedades como el cáncer a la piel, cataratas oculares y supresión del sistema inmunológico en humanos y otras especies.



1.3 Acciones tomadas para mitigar el efecto invernadero:

PROTOCOLO DE KYOTO: (7, 8)

El 11 de diciembre de 1997 los países industrializados se comprometieron, en la ciudad de Kyoto, a ejecutar un conjunto de medidas para reducir los gases del efecto invernadero. Los gobiernos signatarios pactaron reducir en un 5% la media de las



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

emisiones contaminantes entre 2008 y 2012, tomando como referencia los niveles de 1990. El acuerdo entró en vigor el 16 de febrero de 2005, después de la ratificación por parte de Rusia el 18 de noviembre de 2004.

El objetivo principal es disminuir el cambio climático de origen antropogénico cuya base es el efecto invernadero. Según las cifras de la ONU, se prevé que la temperatura media de la superficie del planeta aumente entre 1,4 y 5,8 °C de aquí a 2100, a pesar de que los inviernos son más fríos y violentos. Esto se conoce como calentamiento global. «Estos cambios repercutirán gravemente en el ecosistema y en nuestras economías», señala la Comisión Europea sobre Kyoto.

Una cuestión a tener en cuenta con respecto a los compromisos en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero es que la energía nuclear queda excluida de los mecanismos financieros de intercambio de tecnología y emisiones asociados al Protocolo de Kyoto, pero es una de las formas de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en cada país. Así, el PANEL INTERGUBERNAMENTAL DEL CAMBIO CLIMATICO (IPCC) en su cuarto informe, recomienda la energía nuclear como una de las tecnologías clave para la mitigación del calentamiento global.

ENTRADA EN VIGOR

Se estableció que el compromiso sería de obligatorio cumplimiento cuando lo ratificasen los países industrializados responsables de, al menos, un 55% de las emisiones de CO₂. Con la ratificación de Rusia en noviembre de 2004, después de conseguir que la UE pague la reconversión industrial, así como la modernización de sus instalaciones, en especial las petroleras, el Protocolo ha entrado en vigor.

Además del cumplimiento que estos países hicieron en cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero se promovió también la generación de un desarrollo sostenible, de tal forma que se utilice también energías no convencionales y así disminuya el calentamiento global.

El gobierno de Estados Unidos firmó el acuerdo pero no lo ratificó (ni Bill Clinton, ni George W. Bush), por lo que su adhesión sólo fue simbólica hasta el año 2001 en el cual el gobierno de Bush se retiró del protocolo, según su declaración, no porque no compartiese su idea de fondo de reducir las emisiones, sino porque considera que la aplicación del Protocolo es ineficiente e injusta al involucrar sólo a los países



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

industrializados y excluir de las restricciones a algunos de los mayores emisores de gases en vías de desarrollo (China e India en particular), lo cual considera que perjudicaría gravemente la economía estadounidense.

Pese a los objetivos adoptados en el Protocolo de Kyoto, las emisiones efecto invernadero de los 40 países industrializados firmantes del acuerdo aumentaron en un 2,3% en el período comprendido entre el 2000 y 2006, informó el secretario ejecutivo de la Convención Marco de la ONU sobre el Cambio Climático (UNFCCC), el holandés Ivo de Boer.

“Estos resultados ponen en peligro los objetivos del protocolo de Kyoto” dijo de Boer, quien urgió a alcanzar buenos resultados en la conferencia de Poznan en Polonia, realizada entre el 1 y 13 de diciembre del 2008. Expertos reunidos en Bonn urgieron a convocar a una conferencia internacional de ministros del medio ambiente para preparar la cumbre del 2009 en Copenhague, en la que participarán los líderes de 190 naciones y tomará parte por primera vez el presidente electo de Estados Unidos, Barack Obama. En la capital danesa se espera adoptar un nuevo acuerdo que sustituya el Protocolo de Kyoto para el período posterior al 2012.

Con Barack Obama al frente del gobierno estadounidense el ministro alemán del medio ambiente, Sigmar Gabriel, espera que Estados Unidos asuma un papel de liderazgo en la protección internacional del clima. “Estados Unidos quiere dejar de ser el freno y pasar a ser la locomotora”, sostuvo Gabriel durante una entrevista con la agencia alemana DPA en Nueva Delhi. Según Gabriel eso influirá de forma decisiva en las negociaciones sobre el medio ambiente en todo el mundo. “Para muchos había sido fácil hasta ahora señalar a Estados Unidos para justificar su negativa a participar, pero en el futuro ya no será así”, dijo Gabriel durante la inauguración en Nueva Delhi del primer foro sobre el cambio climático organizado por la India y Alemania.

Pesos pesados en la economía mundial como lo son la India, China, Brasil e Indonesia están también al margen de todo compromiso y no proveen información a la Convención Marco de la ONU sobre el cambio climático sobre sus emisiones de gases de efecto invernadero. De Boer manifestó su temor porque la crisis financiera afecte las negociaciones para la protección del medio ambiente. Las energías renovables proveen en Alemania actualmente unos 250,000 empleos. El gobierno alemán quiere aumentar el



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

abastecimiento energético a partir de fuentes energéticas renovables y con ello duplicar el mercado laboral en este sector.

LA UNIÓN EUROPEA Y ESPAÑA EN EL PROTOCOLO DE KIOTO

La Unión Europea, como agente especialmente activo en la concreción del Protocolo, se comprometió a reducir sus emisiones totales medias durante el periodo 2008-2012 en un 8% respecto de las de 1990. No obstante, a cada país se le otorgó un margen distinto en función de diversas variables económicas y medioambientales según el principio de «reparto de la carga», de manera que dicho reparto se acordó de la siguiente manera: Alemania (-21%), Austria (-13%), Bélgica (-7,5%), Dinamarca (-21%), Italia (-6,5%), Luxemburgo (-28%), Países Bajos (-6%), Reino Unido (-12,5%), Finlandia (-2,6%), Francia (-1,9%), mientras que países menos industrializados, como Portugal, Grecia, Irlanda, España y Suecia podrán aumentar sus emisiones (27%, 25%, 13% , 15% y 4% respectivamente).

DESPUÉS DE KYOTO

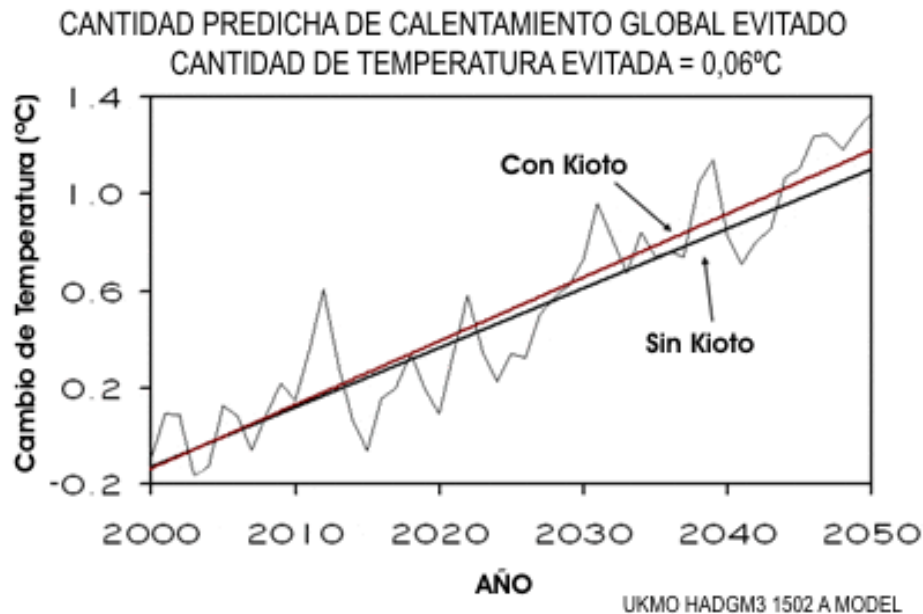
Las llamadas "Partes" (miembros de la CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMATICO - CMNUCC) se reunieron por primera vez para su seguimiento en Montreal, Canadá, en 2005, donde se estableció el llamado Grupo de Trabajo Especial sobre los Futuros Compromisos de las Partes del Anexo I en el marco del Protocolo de Kioto (GTE-PK), orientado a los acuerdos a tomar para después de 2012.

En diciembre de 2007, en Bali, Indonesia, se llevó a cabo la tercera reunión de seguimiento, así como la 13ª cumbre del clima (CdP 13 o COP13), con el foco puesto en las cuestiones post 2012. Se llegó a un acuerdo sobre un proceso de dos años, u "hoja de ruta de Bali", que tiene como objetivo establecer un régimen post 2012 en la XV Conferencia sobre Cambio Climático, (también "15º cumbre del clima", CdP 15 o COP15), diciembre de 2009, en Copenhague, Dinamarca.

Esa "hoja de ruta" se complementa con el Plan de Acción de Bali, que identifica cuatro elementos clave: mitigación, adaptación, finanzas y tecnología. El Plan también contiene una lista no exhaustiva de cuestiones que deberán ser consideradas en cada una de estas áreas y pide el tratamiento de "una visión compartida para la cooperación a largo plazo".

BONOS DE CARBONO (9)

Los bonos de carbono son un mecanismo internacional de descontaminación para reducir las emisiones contaminantes al medio ambiente; es uno de los tres mecanismos propuestos en el Protocolo de Kyoto para la reducción de emisiones causantes del calentamiento global o efecto invernadero (GEI o gases de efecto invernadero).



El sistema ofrece incentivos económicos para que empresas privadas contribuyan a la mejora de la calidad ambiental y se consiga regular la emisión generada por sus procesos productivos, considerando el derecho a emitir CO₂ como un bien canjeable y con un precio establecido en el mercado. La transacción de los bonos de carbono - un bono de carbono representa el derecho a emitir una tonelada de dióxido de carbono - permite mitigar la generación de gases invernadero, beneficiando a las empresas que no emiten o disminuyen la emisión y haciendo pagar a las que emiten más de lo permitido.

Las reducciones de emisiones de GEI se miden en toneladas de CO₂ equivalente, y se traducen en Certificados de Emisiones Reducidas (CER). Un CER equivale a una tonelada de CO₂ que se deja de emitir a la atmósfera, y puede ser vendido en el mercado de carbono a países industrializados, de acuerdo a la nomenclatura del protocolo de Kyoto. Los tipos de proyecto que pueden aplicar a una certificación son, por ejemplo, generación de energía renovable, mejoramiento de eficiencia energética de procesos, forestación, limpieza de lagos y ríos, etc.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

En un esfuerzo por reducir las emisiones que provocan el cambio climático en el planeta, como el calentamiento global o efecto invernadero, los principales países industrializados - a excepción de Estados Unidos - han establecido un acuerdo que establece metas cuantificadas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el 2012: el Protocolo de Kyoto. Para cumplir se están financiando proyectos de captura o abatimiento de estos gases en países en vías de desarrollo, acreditando tales disminuciones y considerándolas como si hubiesen sido hechas en su territorio.

Sin embargo, los críticos del sistema de venta de bonos o permisos de emisión, argumentan que la implementación de estos mecanismos tendientes a reducir las emisiones de CO₂ no tendrá el efecto deseado de reducir la concentración de CO₂ en la atmósfera, como tampoco de reducir o retardar la subida de la temperatura. Según el estudio de Wigley, 1999, la implantación del Tratado de Kyoto cumplido por todos los países del mundo, incluidos los Estados Unidos, causará una reducción de 28 partes por millón (ppm) para 2050, o reducirá la temperatura predicha para ese año en 0,06 °C, o sino retrasará la fecha en que debería cumplirse dicho aumento en 16 años.

1.4 Fuentes de energía renovable (10):

En la actualidad se está difundiendo con mayor intensidad en el mundo, el uso de fuentes de energía renovable, tales fuentes de energía pueden dividirse en dos categorías: no contaminantes o limpias y contaminantes. Entre las primeras:

- El sol: energía solar.
- El viento: energía eólica.
- Los ríos y corrientes de agua dulce: energía hidráulica.
- Los mares y océanos: energía mareomotriz.
- El calor de la tierra: energía geotérmica.
- Las olas: energía undimotriz.
- La llegada de masas de agua dulce a masas de agua salada: energía azul.

La energía renovable contaminante se obtienen a partir de la materia orgánica o biomasa, y se pueden utilizar directamente como combustible (madera u otra materia vegetal sólida), bien convertida en bioetanol o biogás mediante procesos de fermentación orgánica o en biodiésel, mediante procesos industriales de esterificación y transesterificación (procesos químicos cruciales para producir biodiesel a partir de los aceites vegetales o grasas animales).



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Las energías de fuentes renovables contaminantes tienen el mismo problema que la energía producida por combustibles fósiles: en la combustión emiten dióxido de carbono, gas de efecto invernadero, y a menudo son aún más contaminantes puesto que la combustión no es tan limpia, emitiendo hollines y otras partículas sólidas. Se encuadran dentro de las energías renovables porque mientras puedan cultivarse los vegetales que las producen, no se agotarán. También se consideran más limpias que sus equivalentes fósiles, porque teóricamente el dióxido de carbono emitido en la combustión ha sido previamente absorbido al transformarse en materia orgánica mediante fotosíntesis. En realidad no es equivalente la cantidad absorbida previamente con la emitida en la combustión, porque en los procesos de siembra, recolección, tratamiento y transformación, también se consume energía, con sus correspondientes emisiones.

Además, se puede atrapar gran parte de las emisiones de CO₂ para alimentar cultivos de microalgas / ciertas bacterias y levaduras (potencial fuente de fertilizantes y piensos, sal en el caso de las microalgas de agua salobre o salada) y biodiesel / etanol respectivamente, y medio para la eliminación de hidrocarburos y dioxinas en el caso de las bacterias y levaduras (proteínas petrolíferas) y el problema de las partículas se resuelve con la gasificación y la combustión completa (combustión a muy altas temperaturas, en una atmósfera muy rica en O₂) en combinación con medios descontaminantes de las emisiones como los filtros y precipitadores de partículas (como el precipitador Cottrel), o como las superficies de carbón activado.

También se puede obtener energía a partir de los residuos sólidos urbanos y de los lodos de las centrales depuradoras y potabilizadoras de agua. Energía que también es contaminante, pero que también lo sería en gran medida si no se aprovechara, pues los procesos de pudrición de la materia orgánica se realizan con emisión de gas natural y de dióxido de carbono.

Evolución histórica (11)

Las energías renovables han constituido una parte importante de la energía utilizada por los humanos desde tiempos remotos, especialmente la solar, la eólica y la hidráulica. La navegación a vela, los molinos de viento o de agua y las disposiciones constructivas de los edificios para aprovechar el sol, son buenos ejemplos de ello.

Con el invento de la máquina de vapor por James Watt, se van abandonando estas formas de aprovechamiento, por considerarse inestables en el tiempo y caprichosas y se



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL **TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE**

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

utilizan cada vez más los motores térmicos y eléctricos, en una época en que el todavía relativamente escaso consumo, no hacía prever un agotamiento de las fuentes, ni otros problemas ambientales que más tarde se presentaron.

Hacia la década de años 1970 las energías renovables se consideraron una alternativa a las energías tradicionales, tanto por su disponibilidad presente y futura garantizada (a diferencia de los combustibles fósiles que precisan miles de años para su formación) como por su menor impacto ambiental en el caso de las energías limpias, y por esta razón fueron llamadas energías alternativas. Actualmente muchas de estas energías son una realidad, no una alternativa, por lo que el nombre de alternativas ya no debe emplearse.

Según la Comisión Nacional de Energía española, la venta anual de energía del Régimen Especial se ha multiplicado por más de 10 en España, a la vez que sus precios se han rebajado un 11 %.

En España las energías renovables suponen un 30% del total, un 20% es hidroeléctrica un 8% eólica y el 2% otras. La energía eólica es la que más crece, se supone que de aquí al 2010 ocupará un 12% de dicha energía

Las fuentes de energía

Las fuentes de energía se pueden dividir en dos grandes subgrupos: permanentes (renovables) y temporales (no renovables).

No renovables

Los combustibles fósiles son recursos no renovables: no podemos reponer lo que gastamos. En algún momento, se acabarán, y tal vez sea necesario disponer de millones de años de evolución similar para contar nuevamente con ellos. Son aquellas cuyas reservas son limitadas y se agotan con el uso. Las principales son la energía nuclear y los combustibles fósiles (el petróleo, el gas natural y el carbón).

Energía fósil

Los combustibles fósiles se pueden utilizar en forma sólida (carbón), líquida (petróleo) o gaseosa (gas natural). Son acumulaciones de seres vivos que vivieron hace millones de años y que se han fosilizado formando carbón o hidrocarburos. En el caso del carbón se



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL **TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE**

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

trata de bosques de zonas pantanosas, y en el caso del petróleo y el gas natural de grandes masas de plancton marino acumuladas en el fondo del mar. En ambos casos la materia orgánica se descompuso parcialmente por falta de oxígeno y acción de la temperatura, la presión y determinadas bacterias de forma que quedaron almacenadas moléculas con enlaces de alta energía. La energía más utilizada en el mundo es la energía fósil. Si se considera todo lo que está en juego, es de suma importancia medir con exactitud las reservas de combustibles fósiles del planeta. Se distinguen las “reservas identificadas” aunque no estén explotadas, y las “reservas probables”, que se podrían descubrir con las tecnologías futuras. Según los cálculos, el planeta puede suministrar energía durante 40 años más (si sólo se utiliza el petróleo) y más de 200 (si se sigue utilizando el carbón). Hay alternativas actualmente en estudio: la energía fisil – nuclear, las pilas de hidrógeno o la fusión nuclear.

Energía nuclear

El núcleo atómico de elementos pesados como el uranio, puede ser desintegrado (fisión nuclear) y liberar energía radiante y cinética. Las centrales termonucleares aprovechan esta energía para producir electricidad mediante turbinas de vapor de agua. Se obtiene al romper los átomos de minerales radiactivos en reacciones en cadena que se producen en el interior de un reactor nuclear.

Una consecuencia indeseable de la actividad de producción de este tipo de energía, son los residuos nucleares, que pueden tardar miles de años en desaparecer y tardan mucho tiempo en perder la radiactividad.

Renovables

En principio, las fuentes permanentes son las que tienen origen solar, de hecho, se sabe que el Sol permanecerá por más tiempo que la Tierra. Aun así, el concepto de renovabilidad depende de la escala de tiempo que se utilice y del ritmo de uso de los recursos.

Energía hidráulica

La energía potencial acumulada en los saltos de agua puede ser transformada en energía eléctrica. Las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía de los ríos para poner en



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

funcionamiento unas turbinas que mueven un generador eléctrico. En el Perú se utiliza el gran potencial hídrico de los ríos, lagos y lagunas para generar la electricidad que utilizamos. Esta generación hidroeléctrica representa el 60% del total de nuestra electricidad. El otro 40% lo generan las centrales térmicas, que trabajan con la fuerza del vapor y cuyo combustible principal es todavía el petróleo.



Biomasa

La formación de biomasa a partir de la energía solar se lleva a cabo por el proceso denominado fotosíntesis vegetal que a su vez es desencadenante de la cadena biológica. Mediante la fotosíntesis las plantas que contienen clorofila, transforman el dióxido de carbono y el agua de productos minerales sin valor energético, en materiales orgánicos con alto contenido energético y a su vez sirven de alimento a otros seres vivos. La biomasa mediante estos procesos almacena a corto plazo la energía solar en forma de carbono. La energía almacenada en el proceso fotosintético puede ser posteriormente transformada en energía térmica, eléctrica o carburantes de origen vegetal, liberando de nuevo el dióxido de carbono almacenado.

Biomasa puede ser:

- Residuos agrícolas: paja, orugas.
- Residuos forestales: ramas finas, otros.
- Restos de madera de industrias forestales: astillas, aserrín.
- Cultivos energéticos: cardo
- Residuos ganaderos: excrementos de ganado, otros.

Aquí en el dibujo se muestra como trabajan una planta de biomasa:



- | | |
|--|---------------------------|
| ① Cultivo y recolección de madera | ⑥ Recuperación de calor |
| ② Transporte de madera | ⑦ Condensador y generador |
| ③ Almacenamiento y procesado de biomasa | ⑧ Transformadores |
| ④ Almacenamiento de combustible de apoyo | ⑨ Líneas de transporte |
| ⑤ Caldera | |

Energía solar

La energía solar es una fuente de vida y origen de la mayoría de las demás formas de energía en la tierra. Cada año la radiación solar aporta a la tierra la energía equivalente a varios miles de veces la cantidad de energía que consume la humanidad. Recogiendo de forma adecuada la radiación solar, esta puede transformarse en otras formas de energía como energía térmica o energía eléctrica utilizando paneles solares.

Mediante colectores solares, la energía solar puede transformarse en energía térmica, y utilizando paneles fotovoltaicos la energía luminosa puede transformarse en energía eléctrica. Ambos procesos nada tienen que ver entre sí en cuanto a su tecnología. Así mismo, en las centrales térmicas solares se utiliza la energía térmica de los colectores solares para generar electricidad.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



Colector Solar Parabólico



Paneles Fotovoltaicos

Se distinguen dos componentes en la radiación solar: la radiación directa y la radiación difusa. La radiación directa es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La difusa es la emitida por la bóveda celeste diurna gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes, y el resto de elementos atmosféricos y terrestres. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas direcciones. Sin embargo, tanto la radiación directa como la radiación difusa son aprovechables.

Se puede diferenciar entre receptores activos y pasivos en que los primeros utilizan mecanismos para orientar el sistema receptor hacia el Sol -llamados seguidores- y captar mejor la radiación directa.

Una importante ventaja de la energía solar es que permite la generación de energía en el mismo lugar de consumo mediante la integración arquitectónica. Así, podemos dar lugar a sistemas de generación distribuida en los que se eliminen casi por completo las pérdidas relacionadas con el transporte -que en la actualidad suponen aproximadamente el 40% del total- y la dependencia energética.

Las diferentes tecnologías fotovoltaicas se adaptan para sacar el máximo rendimiento posible de la energía que recibimos del sol. De esta forma por ejemplo los sistemas de concentración solar fotovoltaica (CPV por sus siglas en inglés) utilizan la radiación directa con receptores activos para maximizar la producción de energía y conseguir así un costo menor por KW/h producido. Esta tecnología resulta muy eficiente para lugares de alta radiación solar, pero actualmente no puede competir en precio en localizaciones de baja



radiación solar como Centro Europa, donde tecnologías como la Capa Fina (Thin Film) están consiguiendo reducir también el precio de la tecnología fotovoltaica tradicional.

Energía eólica

La energía eólica es la energía obtenida de la fuerza del viento, es decir, mediante la utilización de la energía cinética generada por las corrientes de aire.

El término eólico viene del latín Aeolicus, perteneciente o relativo a Éolo o Eolo, dios de los vientos en la mitología griega y, por tanto, perteneciente o relativo al viento. La energía eólica ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus aspas. Es un tipo de energía verde, no contaminante.

La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales (gradiente de presión).



Aerogeneradores en campos eólicos

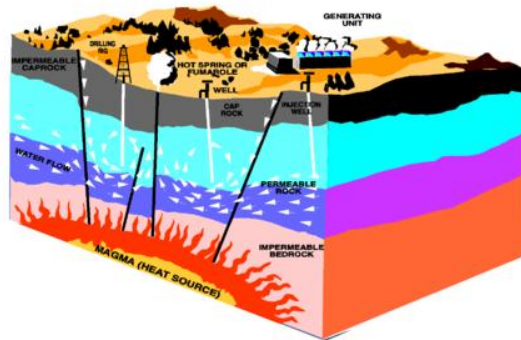


Aerogenerador

Energía geotérmica

La energía geotérmica es aquella energía que puede ser obtenida por el hombre mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. Parte del calor interno de la Tierra (5.000 °C) llega a la corteza terrestre. En algunas zonas del planeta, cerca de la

superficie, las aguas subterráneas pueden alcanzar temperaturas de ebullición, y, por tanto, servir para accionar turbinas eléctricas o para calentar. El calor del interior de la Tierra se debe a varios factores, entre los que destacan el gradiente geotérmico y el calor radiogénico. Geotérmico viene del griego geo, "Tierra"; y de thermos, "calor"; literalmente "calor de la Tierra".



Esquema de energía geotérmica



Planta geotérmica en Islandia

Energía mareomotriz

La energía mareomotriz se debe a las fuerzas gravitatorias entre la Luna, la Tierra y el Sol, que originan las mareas, es decir, la diferencia de altura media de los mares según la posición relativa entre estos tres astros. Esta diferencia de alturas puede aprovecharse en lugares estratégicos como golfos, bahías o estuarios utilizando turbinas hidráulicas que se interponen en el movimiento natural de las aguas, junto con mecanismos de canalización y depósito, para obtener movimiento en un eje. Mediante su acoplamiento a un alternador se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica, una forma energética más útil y aprovechable.

La energía mareomotriz tiene la cualidad de ser renovable en tanto que la fuente de energía primaria no se agota por su explotación, y es limpia, ya que en la transformación energética no se producen subproductos contaminantes durante la fase de explotación. Sin embargo, la relación entre la cantidad de energía que se puede obtener con los medios actuales y el costo económico y el impacto ambiental de instalar los dispositivos para su proceso han impedido una proliferación notable de este tipo de energía.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Otras formas de extraer energía del mar son la energía undimotriz, que es la energía producida por el movimiento de las olas; y la energía debida al gradiente térmico oceánico, que marca una diferencia de temperaturas entre la superficie y las aguas profundas del océano.



Central eléctrica mareomotriz en Francia.

Ventajas e inconvenientes de la energía renovable

Energías ecológicas

Las fuentes de energía renovables son distintas a las de combustibles fósiles o centrales nucleares debido a su diversidad y abundancia. Se considera que el Sol abastecerá estas fuentes de energía (radiación solar, viento, lluvia, etc.) durante los próximos cuatro mil millones de años. La primera ventaja de una cierta cantidad de fuentes de energía renovables es que no producen gases de efecto invernadero ni otras emisiones, contrariamente a lo que ocurre con los combustibles, sean fósiles o renovables. Algunas fuentes renovables no emiten dióxido de carbono adicional, salvo los necesarios para su construcción y funcionamiento, y no presentan ningún riesgo suplementario, tales como el riesgo nuclear.

No obstante, algunos sistemas de energía renovable generan problemas medio ambientales particulares. Así pues, los primeros aerogeneradores eran peligrosos para los pájaros, pues sus aspas giraban muy deprisa, mientras que las centrales



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

hidroeléctricas pueden crear obstáculos a la emigración de ciertos peces, un problema serio en muchos ríos del mundo (en los del noroeste de Norteamérica que desembocan en el Océano Pacífico, se redujo la población de salmones drásticamente).

Naturaleza difusa

Un problema inherente a las energías renovables es su naturaleza difusa, con la excepción de la energía geotérmica la cual, sin embargo, sólo es accesible donde la corteza terrestre es fina, como las fuentes calientes y los géiseres.

Puesto que ciertas fuentes de energía renovable proporcionan una energía de una intensidad relativamente baja, distribuida sobre grandes superficies, son necesarias nuevos tipos de "centrales" para convertirlas en fuentes utilizables. Para 1.000 KWh de electricidad, consumo anual per cápita en los países occidentales, el propietario de una vivienda ubicada en una zona nublada de Europa debe instalar ocho metros cuadrados de paneles fotovoltaicos (suponiendo un rendimiento energético medio del 12,5%).

Sin embargo, con cuatro metros cuadrados de colector solar térmico, un hogar puede obtener gran parte de la energía necesaria para el agua caliente sanitaria aunque, debido al aprovechamiento de la simultaneidad, los edificios de pisos pueden conseguir los mismos rendimientos con menor superficie de colectores y, lo que es más importante, con mucha menor inversión por vivienda.

Irregularidad

La producción de energía eléctrica permanente exige fuentes de alimentación fiables o medios de almacenamiento (sistemas hidráulicos de almacenamiento por bomba, baterías, futuras pilas de combustible de hidrógeno, etc.). Así pues, debido al elevado costo del almacenamiento de la energía, un pequeño sistema autónomo resulta raramente económico, excepto en situaciones aisladas, cuando la conexión a la red de energía implica costos más elevados.

Fuentes renovables contaminantes

En lo que se refiere a la biomasa, es cierto que almacena activamente el carbono del dióxido de carbono, formando su masa con él y crece mientras libera el oxígeno de nuevo, al quemarse vuelve a combinar el carbono con el oxígeno, formando de nuevo



*TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE*

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

dióxido de carbono. Teóricamente el ciclo cerrado arrojaría un saldo nulo de emisiones de dióxido de carbono, al quedar las emisiones fruto de la combustión fijadas en la nueva biomasa. En la práctica, se emplea energía contaminante en la siembra, en la recolección y la transformación, por lo que el balance es negativo.

Por otro lado, también la biomasa no es realmente inagotable, aun siendo renovable. Su uso solamente puede hacerse en casos limitados. Existen dudas sobre la capacidad de la agricultura para proporcionar las cantidades de masa vegetal necesaria si esta fuente se populariza, lo que se está demostrando con el aumento de los precios de los cereales debido a su aprovechamiento para la producción de biocombustibles. Por otro lado, todos los biocombustibles producen mayor cantidad de dióxido de carbono por unidad de energía producida que los equivalentes fósiles.

La energía geotérmica no solo se encuentra muy restringida geográficamente sino que algunas de sus fuentes son consideradas contaminantes. Esto debido a que la extracción de agua subterránea a alta temperatura genera el arrastre a la superficie de sales y minerales no deseados y tóxicos. La principal planta geotérmica se encuentra en la Toscana, cerca de la ciudad de Pisa y es llamada Central Geotérmica de Larderello. Una imagen de la central en la parte central de un valle y la visión de kilómetros de cañerías de un metro de diámetro que van hacia la central térmica muestran el impacto paisajístico que genera.

En Argentina la principal central fue construida en la localidad de Copahue y en la actualidad se encuentra fuera de funcionamiento la generación eléctrica. El surgente se utiliza para calefacción distrital, calefacción de calles y aceras y baños termales.

Diversidad geográfica

La diversidad geográfica de los recursos es también significativa. Algunos países y regiones disponen de recursos sensiblemente mejores que otros, en particular en el sector de la energía renovable. Algunos países disponen de recursos importantes cerca de los centros principales de viviendas donde la demanda de electricidad es importante. La utilización de tales recursos a gran escala necesita, sin embargo, inversiones considerables en las redes de transformación y distribución, así como en la propia producción.



Administración de las redes eléctricas

Si la producción de energía eléctrica a partir de fuentes renovables se generalizase, los sistemas de distribución y transformación no serían ya los grandes distribuidores de energía eléctrica, pero funcionarían para equilibrar localmente las necesidades de electricidad de las pequeñas comunidades. Los que tienen energía en excedente venderían a los sectores deficitarios, es decir, la explotación de la red debería pasar de una "gestión pasiva" donde se conectan algunos generadores y el sistema es impulsado para obtener la electricidad "descendiente" hacia el consumidor, a una gestión "activa", donde se distribuyen algunos generadores en la red, debiendo supervisar constantemente las entradas y salidas para garantizar el equilibrio local del sistema. Eso exigiría cambios importantes en la forma de administrar las redes.

Sin embargo, el uso a pequeña escala de energías renovables, que a menudo puede producirse "in situ", disminuye la necesidad de disponer de sistemas de distribución de electricidad. Los sistemas corrientes, raramente rentables económicamente, revelaron que un hogar medio que disponga de un sistema solar con almacenamiento de energía, y paneles de un tamaño suficiente, sólo tiene que recurrir a fuentes de electricidad exteriores algunas horas por semana. Por lo tanto, los que abogan por la energía renovable piensan que los sistemas de distribución de electricidad deberían ser menos importantes y más fáciles de controlar.

La integración en el paisaje

Un inconveniente evidente de las energías renovables es su impacto visual en el ambiente local. Algunas personas odian la estética de los generadores eólicos y mencionan la conservación de la naturaleza cuando hablan de las grandes instalaciones solares eléctricas fuera de las ciudades. Sin embargo, todo el mundo encuentra encanto en la vista de los "viejos molinos a viento" que, en su tiempo, eran una muestra bien visible de la técnica disponible.

Otros intentan utilizar estas tecnologías de una manera eficaz y satisfactoria estéticamente: los paneles solares fijos pueden duplicar las barreras anti-ruido a lo largo de las autopistas, hay techos disponibles y podrían incluso ser sustituidos completamente por captadores solares, células fotovoltaicas amorfas que pueden emplearse para teñir las ventanas y producir energía, etc.



**TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE**

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Las fuentes de energía renovables en la actualidad

Representan un 20% del consumo mundial de electricidad, siendo el 90% de origen hidráulico. El resto es muy marginal: biomasa 5,5%, geotérmica 1,5%, eólica 0,5% y solar 0,05%.

Alrededor de un 80% de las necesidades de energía en las sociedades industriales occidentales se centran en torno a la industria, la calefacción, la climatización de los edificios y el transporte (coches, trenes, aviones). Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones a gran escala de la energía renovable se concentra en la producción de electricidad.

Producción de energía (12)

Greenpeace presentó un informe en el que sostiene que la utilización de energías renovables para producir el 100% de la energía es técnicamente viable y económicamente asumible, por lo que, según la organización ecologista, lo único que falta se dejen a un lado las energías sucias, es necesaria voluntad política. Para lograrlo, son necesarios dos desarrollos paralelos: de las energías renovables y de la eficiencia energética (eliminación del consumo superfluo).

Por otro lado, un 64% de los directivos de las principales generadoras consideran que en el horizonte de 2018 existirán tecnologías limpias, asequibles y renovables de generación local, lo que obligará a las grandes corporaciones del sector a un cambio de mentalidad.

Instituciones que fomentan las Energías Renovables

- ISES - International Solar Energy Association
- ASADES - Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente
- IRENA – International Renewable Energy Agency
- LAWEA Asociación Latinoamericana de Energía Eólica

1.5 Zonas de interés para el desarrollo del presente estudio (13)

Este estudio se basa en datos recopilados en la ciudad de Iquitos y sus provincias, siendo dichas zonas apropiadas para el desarrollo de la tecnología de la torre solar,



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

debido a la cercanía a la línea Ecuatorial y al gran calor existente en la zona. Este proyecto también puede ser factible en las zonas desérticas del Norte del Perú.

Según los datos proporcionados por la empresa de electricidad en la ciudad de Iquitos “ELECTRO ORIENTE S.A”, respecto a la máxima demanda de consumo de energía eléctrica en las ciudades de Requena, Contamana, Nauta y Caballo Cocha, durante el año 2008, se decidió concentrar el presente estudio en dichas ciudades, ya que cuentan con similar demanda de consumo de energía eléctrica y cuentan con redes primarias y secundarias existentes. Sin embargo la zona de mayor interés es la ciudad de Nauta, que es la ciudad más antigua de la Amazonía peruana y está ubicada en un lugar de gran potencial turístico a nivel mundial, por estar ubicado muy cerca al punto de nacimiento del majestuoso “Rio Amazonas” producto de la unión del rio Marañón y el rio Ucayali, así mismo es la puerta de acceso a la mundialmente conocida “Reserva Nacional del Pacaya Samiria”.

Ubicación



Región: Loreto
Provincias: Maynas y Loreto
Distritos: Iquitos y Nauta



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Cabe señalar que recientemente se ha construido un mirador turístico denominado “Donde Nace el Amazonas”, ubicado en la Comunidad turística Miguel Grau, muy cercana a la ciudad de Nauta, dicho proyecto consta de una torre metálica de 30m. de altura con áreas de restaurantes, artesanías y descansos, sin embargo la altura proyectada para el mirador es insuficiente, ya que debido a la magnitud de los ríos en mención se necesita mayor altura para poder apreciar con mayor definición el nacimiento del río Amazonas, conocido mundialmente por ser el más caudaloso y largo del mundo (100 kilómetros más largo que el Nilo), candidato potencial a ser maravilla natural del mundo. Es por tal motivo que este estudio se concentrará en la ciudad de Nauta.

Distrito: Nauta

Provincia: Loreto

Ubicación Geográfica: 4° 30' 27" Latitud – 73° 34' 36" Longitud Oeste

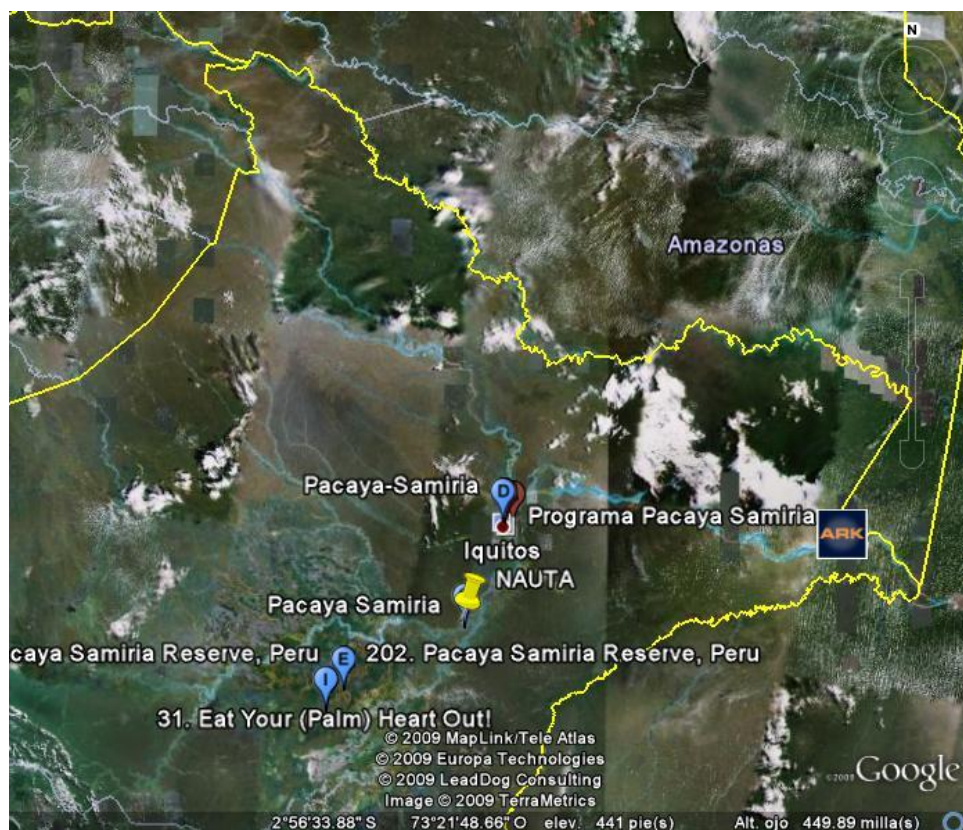
Extensión Superficial: 6,330 km²

Altitud: 111 m.s.n.m.

Población total: 35,914 hab.

Población ciudad de Nauta: 12,512 hab.

FOTOGRAFIA SATELITAL DE LA ZONA DE INTERES DEL PROYECTO





TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

1.6 Oferta y demanda de energía en las zonas de interés

Oferta de energía (13):

Básicamente se trata de la potencia instalada en cada zona, este dato fue proporcionado por la empresa prestadora del servicio eléctrico Electro Oriente S.A., de acuerdo a la tabla que se muestra a continuación, donde se aprecian el tipo de equipo, marca y potencia, instalados en la actualidad en cada zona mencionada anteriormente.

POTENCIA EFECTIVA POR GRUPO Y CENTRAL (MW)
(Al 2008)

CENTRAL	DENOMINACION DE GRUPO	POTENCIA (MW)
REQUENA	CKD-PRAHA 6	-
REQUENA	Cat.1-3512 (208)	0.450
REQUENA	Cat.3-3512 (219)	0.450
Sub Total REQUENA		0.900
CONTAMANA	Cat.2-3512 Dita	0.450
CONTAMANA	Cat. 3512 Dita	0.450
CONTAMANA	Volv.Pent.TAD-1630	0.300
Sub Total CONTAMANA		1.200
NAUTA	3 Volvo Penta	0.250
NAUTA	Caterpillar	0.350
NAUTA	Cat.3512 Dita	0.450
Sub Total NAUTA		1.050
CABALLOCOCHA	CKD BC275	0.180
CABALLOCOCHA	Cat.2-3512 Dita	0.450
CABALLOCOCHA	Cat.3512 Dita	0.450
Sub Total CABALLOCOCHA		1.080

Demanda de energía (14):

El análisis de la demanda es una de las piezas fundamentales para el estudio del uso de fuentes de energía renovable; sus resultados deben aportar el consumo actual en KW de la población a la que se desea suministrar energía, con una proyección de la demanda durante un periodo, que bien puede ser 10, 15, 20, 25, 50 años o más, según la necesidad. Esta proyección debe tener en cuenta que un periodo prolongado acarrea



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

mayores costos en los diseños y la construcción; por ello el periodo de proyección es un criterio del diseñador para satisfacer las necesidades energéticas de la comunidad.

Es constante en este tipo de estudios la carencia de información, debido al aislamiento de la comunidad, lo cual hace que quien realiza el estudio de demanda recurra a información que indirectamente le proporcionará la demanda actual. Para su evaluación se requiere verificar si:

- La comunidad no ha tenido servicio de energía eléctrica
- La comunidad ha tenido servicio de energía eléctrica
- La comunidad dispone de energía eléctrica con plantas Diesel.

En tal caso, el estudio debe orientarse a conocer la demanda actual de la comunidad, la demanda potencial de está y su proyección futura.

Demanda actual

Representa la potencia instalada de la comunidad, bien sea por familia o por vivienda; en ella se identifican los instrumentos eléctricos y su potencia.

La demanda actual se determina en función del tipo de comunidad, si ha tenido o no servicio de energía eléctrica.

Si la comunidad no ha tenido servicio de energía eléctrica

Es el caso de zonas que por sus dificultades de acceso no han tenido la oportunidad de mejorar su nivel de vida con el uso de la energía eléctrica y como sustituto de ella utilizan otras fuentes como leña, petróleo, gas, baterías, carbón, velas y otros.

Con el fin de identificar la demanda actual de la comunidad a la cual se suministrará energía, se debe conocer información que refleje el consumo energético. Para obtener una visión preliminar se recomienda inicialmente recolectar la siguiente información:

- Número de habitantes
- Número de familias
- Número de casas
- Industrias agrícolas, mineras, pesqueras, madereras u otras.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Con esta información preliminar puede conocerse la demanda actual aproximada, asignándole un consumo en KWh por familia, habitantes o casa y multiplicándolo por el número de estos, así se obtendrá una visión previa del consumo de la comunidad.

Para determinar la demanda actual de una forma más exacta se requiere una mayor información acerca de las actividades de la comunidad:

- Actividades en el hogar: horas de acostarse, levantarse, preparar los alimentos, etc.
- Actividades industriales y comerciales: agricultura, industria maderera, pesca, ganadería, minería, almacenes, tiendas y otros.
- Servicios públicos: educación, acueducto, alcantarillado, servicio de salud y otros.

Para conocer el incremento de su consumo energético es necesario indagar en la población las expectativas que crea la energía eléctrica en lo residencial, industrial, comercial y servicios públicos.

Con esta información se obtiene una visión de las necesidades de la comunidad y puede asignarse una demanda o potencia eléctrica a cada una de ellas, en lo que respecta a cada uno de los sectores:

Demanda residencial: Iluminación, conservación y preparación de alimentos, recreación y comodidades.

Demanda Industrial y comercial: Motobombas, molinos, trapiches, refrigeración y otros.

Servicios públicos: Salud, educación, alumbrado público y comunicaciones entre otros.

Si la comunidad ha tenido servicio de energía eléctrica

Algunos poblados aislados han tenido temporalmente energía eléctrica, que por lo general es una planta diesel, la cual ha dejado de funcionar por falta de mantenimiento, costo de combustible y otras causas.

En estos casos le ha quedado a la comunidad una infraestructura en equipos electrodomésticos y posiblemente industriales, pero la carencia de la energía eléctrica se ha solucionado con otras fuentes energéticas menos eficientes mencionadas



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

anteriormente y posiblemente se han adquirido plantas eléctricas para uso residencial o industrial.

La demanda actual debe cubrir la demanda de los equipos ya adquiridos por la comunidad, de los que inicialmente dispusieron cuando hubo energía eléctrica; ellos suplían necesidades residenciales, industriales, servicios públicos, etc. La demanda actual se determina de la siguiente forma:

Demanda residencial: Incluye electrodomésticos actuales y por adquirir.

Demanda Industrial y comercial: Debe incluir el equipo que ha quedado en desuso por falta de energía y el equipo potencial.

Servicios públicos: Al igual que en los casos anteriores deberá incluir los que han quedado y los posibles por suministrar.

La comunidad dispone de una planta Diesel

En gran parte de las zonas no interconectadas es usual que plantas diesel suministren energía eléctrica a comunidades aisladas. Este servicio se caracteriza por su baja confiabilidad, ya que la dificultad de acceso hace que su mantenimiento y operación sean realizados por personal no calificado y que tenga un elevado costo por KWh generado debido a que el valor del combustible se incrementa por las dificultades de transporte. La mayoría de estas plantas están subsidiadas por el Estado y se limitan a suministrar energía en las horas de la noche.

El servicio deficiente y costoso que ofrecen en estas condiciones las plantas diesel, además del uso de combustibles fósiles para su funcionamiento, lo que acarrea la contaminación del medio ambiente y el incremento del efecto invernadero, posibilita la opción de usar fuentes de energía renovable para la generación de energía eléctrica; el estudio de la demanda puede ser así más exacto, ya que la comunidad tiene una reserva de electrodomésticos y se han desarrollado pequeñas industrias; solo resta indirectamente identificar la demanda que no se cubre en el horario diurno.

La demanda actual será así la demanda que cubre la planta Diesel mas la demanda por cubrir. Para determinarla se identifican los siguientes parámetros:



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Demanda residencial: Es la demanda que soporta la planta Diesel y la que se cubrirá cuando haya un servicio las 24 horas.

Demanda Industrial y comercial: Al igual que la demanda residencial debe cubrir el equivalente de la demanda soportada por la planta diesel y la futura.

Servicios públicos: Debe incluir los servicios actuales y los que se pueden mejorar o suministrar con un servicio más eficiente y constante.

Demanda potencial

La demanda potencial refleja el uso de los instrumentos eléctricos durante un día representativo, indicando dentro de un horario su uso, y reflejándose como el consumo día.

Una vez identificada la demanda actual de la comunidad, independientemente de que haya o no servicio de energía eléctrica, se requiere conocer el consumo durante un día representativo, que proyectado refleje la demanda energética de la comunidad en la semana, mes u otro periodo.

Realizando una encuesta se obtiene información característica de la comunidad en sus hábitos de consumo, distribuidos de acuerdo con el tipo de necesidad (que hemos visto en la demanda actual) y ubicados en las 24 horas del día.

La demanda potencial de la comunidad se obtiene fácilmente con el apoyo de una tabla considerando al igual que la demanda actual, es decir, residencial, industrial, servicios públicos y otros. En cada uno de estos se indica el uso de la energía eléctrica; a continuación se presentan algunas consideraciones:

Demanda residencial:

Iluminación: en ella se enumera y se indica la ubicación de cada lámpara.

Conservación y preparación de alimentos: se enumera los electrodomésticos para tal fin, por ejemplo, nevera, licuadora, estufa.

Recreación y comodidad: se enumeran y se indican electrodomésticos como el televisor, el equipo de sonido, el ventilador, la grabadora y otros.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Otros: máquina de coser, equipo de comunicaciones, etc.

Demanda Industrial y comercial: la demanda potencial industrial de la comunidad se basa en las industrias actuales y su posible tecnificación con el apoyo de la energía eléctrica. Debe tenerse en cuenta que los motores en el arranque elevan el consumo de electricidad, por ello se requiere duplicar su potencia para garantizarles el arranque; en caos donde se encuentre un número considerable de motores es indispensable el arranque en secuencia de los mismos o la adquisición de arrancadores, que por lo general son costosos.

Servicios públicos: En este caso, la demanda contiene elementos residenciales e industriales; por ello se asignan al servicio una demanda actual proporcional a estos, o se desglosa en cada una de sus actividades.

Demanda futura

La demanda futura es la proyección de la demanda potencial en un periodo de años que el diseñador ha establecido; para ello debe tenerse en cuenta información acerca de natalidad, mortalidad, migración, emigración, perspectivas de desarrollo de la comunidad, etc.

Por esta razón, quien determine la demanda futura deberá ser generoso al considerar el porcentaje de crecimiento de la demanda previniendo que inicialmente aumentará de manera drástica en aquellas comunidades que no han tenido este servicio y disminuirá si lo han tenido o si disponen de una planta Diesel. La proyección debe incluir el incremento ocasionado por otros factores que indirectamente afectan la demanda futura, como la disminución del rendimiento del equipo con el correr de los años.

Máxima demanda mensual en las zonas de interés:

Para nuestro caso en todas las zonas de interés consideradas, se cuenta con una planta diesel y la máxima demanda de energía mensual en MW se presenta en la siguiente tabla, estos datos fueron proporcionados por Electro oriente S.A (13).

Nombre del Sistema Eléctrico	Máxima demanda mensual en (MW)
Requena	0.731
Contamana	0.700
Nauta	0.529
Caballo Cocha	0.465

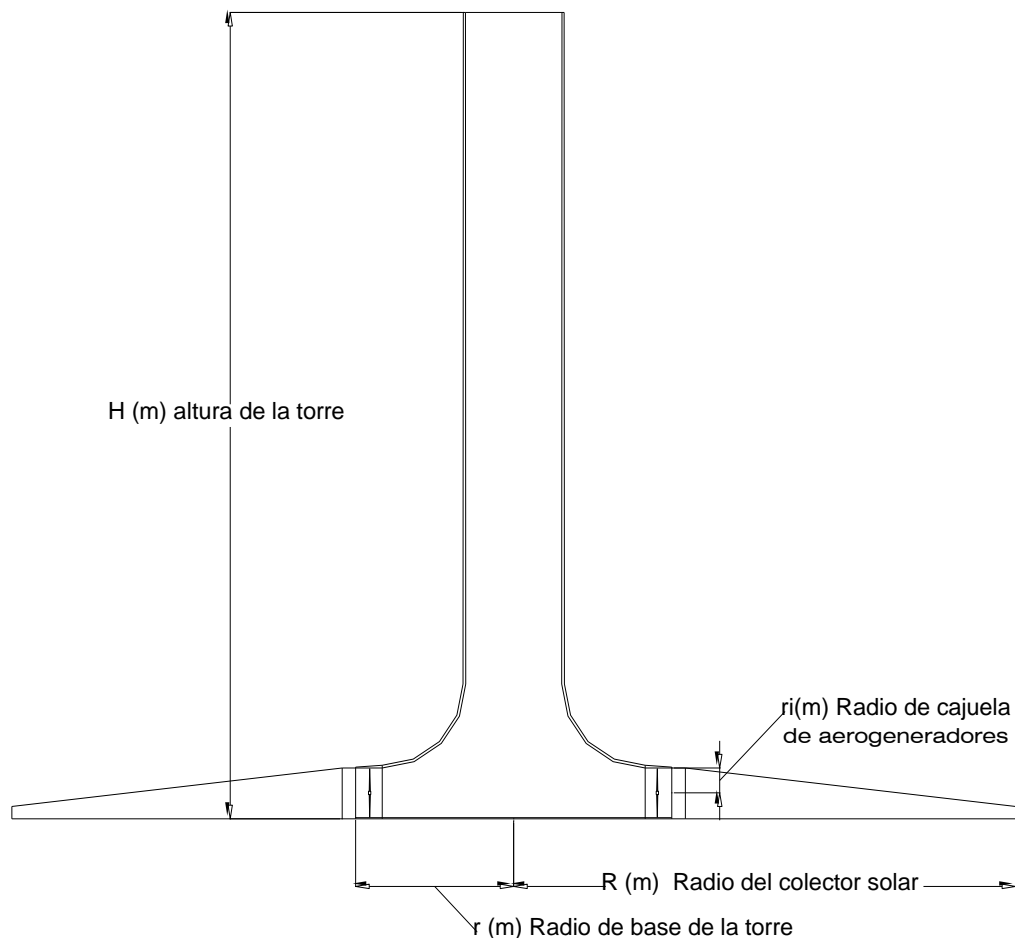


CAPITULO 2:

PRE-DIMENSIONAMIENTO DE LA TORRE SOLAR

Para el pre-dimensionamiento de la torre solar, se tendrá que evaluar en primer lugar la potencia requerida de la planta para un tiempo determinado. Luego, utilizando conceptos de energía eólica, se calculará el radio de la cajuela de los aerogeneradores, lo cual permitirá de manera geométrica, calcular el radio de la base de la torre solar. A continuación y utilizando en este paso conceptos de termodinámica, se calculará la altura necesaria de la chimenea y con los datos hallados anteriormente se calculará el radio del colector solar. Finalmente y continuando con los conceptos de termodinámica se calculará el diámetro y cantidad de tuberías que servirán como almacenadores de energía en el colector solar.

DIMENSIONES A CALCULAR EN EL PRE-DIMENSIONAMIENTO:





TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

2.1 Potencia de la planta

Tomando en cuenta la proyección futura de demanda de energía, que está relacionada directamente con la población futura y considerando además la potencia instalada actual de la zona, la eficiencia total de la torre solar, que a su vez es producto de la eficiencia del colector solar, la eficiencia de las turbinas y la eficiencia de la torre, se propone para un periodo de diseño de 50 años, una planta eléctrica "TORRE SOLAR" con una potencia de 2000 KW, es decir 2.00 MW, la cual satisface las necesidades de energía eléctrica de la zona de interés considerada en nuestro estudio.

PROYECCION DE LA POBLACION DE NAUTA AL 2,059

$$P_f = P_o + r (t - t_o)$$

Año	Población (Habitantes)	$r = \frac{(P_{i+1} - P_i)}{(t_{i+1} - t_i)}$
1,981	5,533	314.17
1,993	9,303	213.93
2,005	10,402	703.33
2,008	12,512	
	r prom. =	176.03

FUENTE: - INEI IV CENSO DE POBLACION Y VIVIENDA 1,993
CENSO DE POBLACION Y VIVIENDA 2,005

PERIODO DE DISEÑO:

Debido a la magnitud del proyecto, se considera un periodo de diseño de 50 años

POBLACION FUTURA AL :

2,059

$$\Rightarrow P(2,059) = 12,512 + 176.03 (2,059 - 2,008) = \mathbf{21,490} \text{ Hab.}$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Proyección de la población al 2059 = 21,490 / 12,512 = 1.72 veces

Potencia de la planta = demanda futura de energía / eficiencia

Demanda futura de energía = demanda actual * proyección = 529 * 1.72 = 908.88 KW.

Eficiencia de la planta (η planta = η colector * η torre * η turbina)

Eficiencia = 0.85 * 0.90 * 0.60 = 0.46

Potencia de la planta = 908.88 KW / 0.46 = 1,975.82 KW

Usaremos para el diseño de la planta, una potencia de 2,000 KW (2.00 MW)
--

2.2 Conceptos de Energía Eólica (15, 16, 17)

Energía eólica es la energía obtenida del viento, o sea, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas.

El término eólico viene del latín Aeolicus, perteneciente o relativo a Eolo, dios de los vientos en la mitología griega. La energía eólica ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus aspas.

La energía eólica, como la mayoría de las fuentes de energía terrestre, en última instancia proviene del Sol. De la energía que este irradia, entre el 1 y el 2 por ciento se convierte en viento.

El recurso eólico

Una de las características del recurso eólico es su condición aleatoria y variable, por cuanto depende de condiciones atmosféricas. Asimismo, los vientos potencialmente aprovechables para la generación de electricidad se encuentran concentrados en zonas relativamente pequeñas o sitios específicos, por lo que el primer paso para su aprovechamiento es la prospección, sin embargo, no importa que tan sofisticados sean los métodos de prospección; la evaluación de la factibilidad técnico económica de un proyecto eólico eléctrico, exige un conocimiento detallado del comportamiento del viento y, para ello, es imprescindible llevar a cabo mediciones anemométricas in situ.

Turbinas eólicas o aerogeneradores

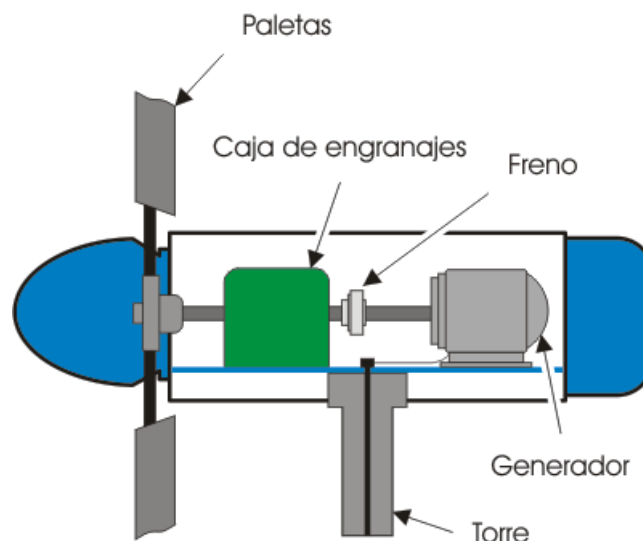
Las turbinas eólicas – llamadas aerogeneradores – son dispositivos mecánicos que aprovechan la energía del movimiento del viento (energía cinética) para convertirla en energía mecánica (movimiento de un eje) que mueve un generador eléctrico.

Hay tres parámetros que determinan la cantidad de energía aprovechable del viento por una turbina eólica:

- La velocidad del viento
- El área barrida de las paletas
- La eficacia teórica máxima de los generadores eólicos.

En la práctica las turbinas eólicas se diseñan para trabajar dentro de ciertas velocidades del viento. La velocidad más baja, llamada velocidad de corte inferior que es generalmente de 4 a 5 m/s, pues por debajo de esta velocidad no hay suficiente energía como para superar las pérdidas del sistema. La velocidad de corte superior es determinada por la capacidad de una máquina en particular de soportar fuertes vientos. La velocidad nominal es la velocidad del viento a la cual una máquina particular alcanza su máxima potencia nominal. Por arriba de esta velocidad, se puede contar con mecanismos que mantengan la potencia de salida en un valor constante con el aumento de la velocidad del viento.

Los elementos principales de cualquier turbina del viento son el rotor, una caja de engranajes, un generador, equipo del control y monitoreo y la torre.





Rotor

Las palas del rotor se diseñan para que giren con el viento, moviendo el generador de la turbina. Las turbinas del viento modernas de gran escala típicamente se equipan de rotores de tres palas con extensiones de 42 a 80 metros (138 a 262 pies) de diámetro.

Caja de engranajes

Los engranajes se utilizan para aumentar la frecuencia para la producción eléctrica.

Generador

Este es quien genera la electricidad cuando hay suficiente viento como para rotar las paletas. La electricidad se transfiere a la siguiente etapa usando el cableado (para el almacenaje, envío a la red o para el uso directo). Las turbinas de gran escala generalmente contienen generadores con capacidades entre 600 kilovatios y 2 MW.

Torre

La torre eleva el montaje de las turbinas sobre las corrientes de aire turbulentas cerca de la tierra y permite capturar un viento de mayor velocidad. El diseño de torre es particularmente crítico, pues deben ser tan altas como sea económicamente posible (generalmente entre 40 y 100 metros), también deben ser robustas, permitir el acceso a la turbina para su mantenimiento, pero no agregar costo innecesario al sistema. Un aspecto particularmente importante del diseño de torres es la eliminación de la resonancia entre la gama de frecuencias de las paletas que rotan y la frecuencia de resonancia de la torre.

Para el presente caso se tienen turbinas que se encuentran en la base de la torre, los que se encuentran dentro de una cajuela, es decir encasetonados, siendo el caso que para este tipo de turbinas, la potencia es 8 veces mayor que una turbina convencional.

La potencia extraíble de una turbina eólica se puede calcular con las siguientes ecuaciones:

$$P = e A V^3 \quad (\text{Cálculo sencillo de la potencia de salida})$$

$$P = \rho/2 C_p \eta A V^3 \quad (\text{Cálculo mejorado de la potencia de salida})$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Donde:

P = Potencia medida en Vatios

e = Factor de energía.

ρ = Densidad de la masa de aire en kg/m^3

C_p = Coeficiente de potencia máximo de una turbina ideal de eje horizontal

η = Eficiencia mecánica y eléctrica de la turbina

A = Área circular de movimiento de las palas del rotor y en la que se mueve la masa de aire expresada en m^2

V = Velocidad de la masa de aire antes de pasar por las palas, medidas en m/s

Utilizando este concepto teórico científico de la energía eólica, se determinará el área circular para albergar a cada turbina eólica en la base y de manera geométrica se calculara el área total de la base circular de la torre solar.

DISEÑO DE AEROGENERADORES

1) CALCULO SENCILLO DE LA SALIDA (PRODUCTO DE SALIDA):

$P_d =$	2,000,000.00	W	< >	2 MW
n =	Numero de aerogeneradores		=	16
(*) $P_s =$	$P_d / (8 n)$	W	=	15,625.00

$P_s = e A V^3$

 w

Donde:

P_d = Potencia de diseño de la planta (W)

P_s = Potencia promedio disponible (suministro), c/turbina (W)

e = Factor de energía entre el rango (0.15; 0.30)

A = Área barrida por el rotor = $\pi r^2 = \pi D^2/4$ (m^2)

D = Diámetro del rotor (m)

V = velocidad promedio del viento (m/s)



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Datos:		
$P_s =$	15,625.00	W
$e =$	0.225	
$V =$	12.00	m/s

$$D = 7.15 \text{ m}$$

2) CALCULOS MEJORADOS DE LA SALIDA:

Utilizando los estimados del fabricante:

A veces el fabricante ofrece un estimado de la salida (producto de salida) como una función de la velocidad del viento. Esto puede presentarse en una tabla o en un grafico.

$$P_{\max}(V) = C_{p\max} \cdot (\rho/2) \cdot (\pi/4) D^2 V^3$$

Donde:

P_{\max} = Potencia máxima (W)

$C_{p\max}$ = Coeficiente de potencia máximo.

ρ = Densidad del aire (kg/m³)

D = Diámetro del rotor (m)

V = velocidad promedio del viento (m/s)

Usando la primera formula conduce a resultados un poco más conservadores.

(*) La potencia de salida para turbinas encasetonadas, es cerca de 8 veces mayor que para turbinas normales de viento

Finalmente y teniendo en cuenta el espacio libre que debe existir para el movimiento de las hélices, se considera en el presente estudio un espacio libre de 7.5 cm. en cada extremo de la cajuela del aerogenerador, resultando por lo tanto un diámetro total requerido de $D=7.30\text{m}$, es decir el radio de la cajuela de los aerogeneradores será igual a:

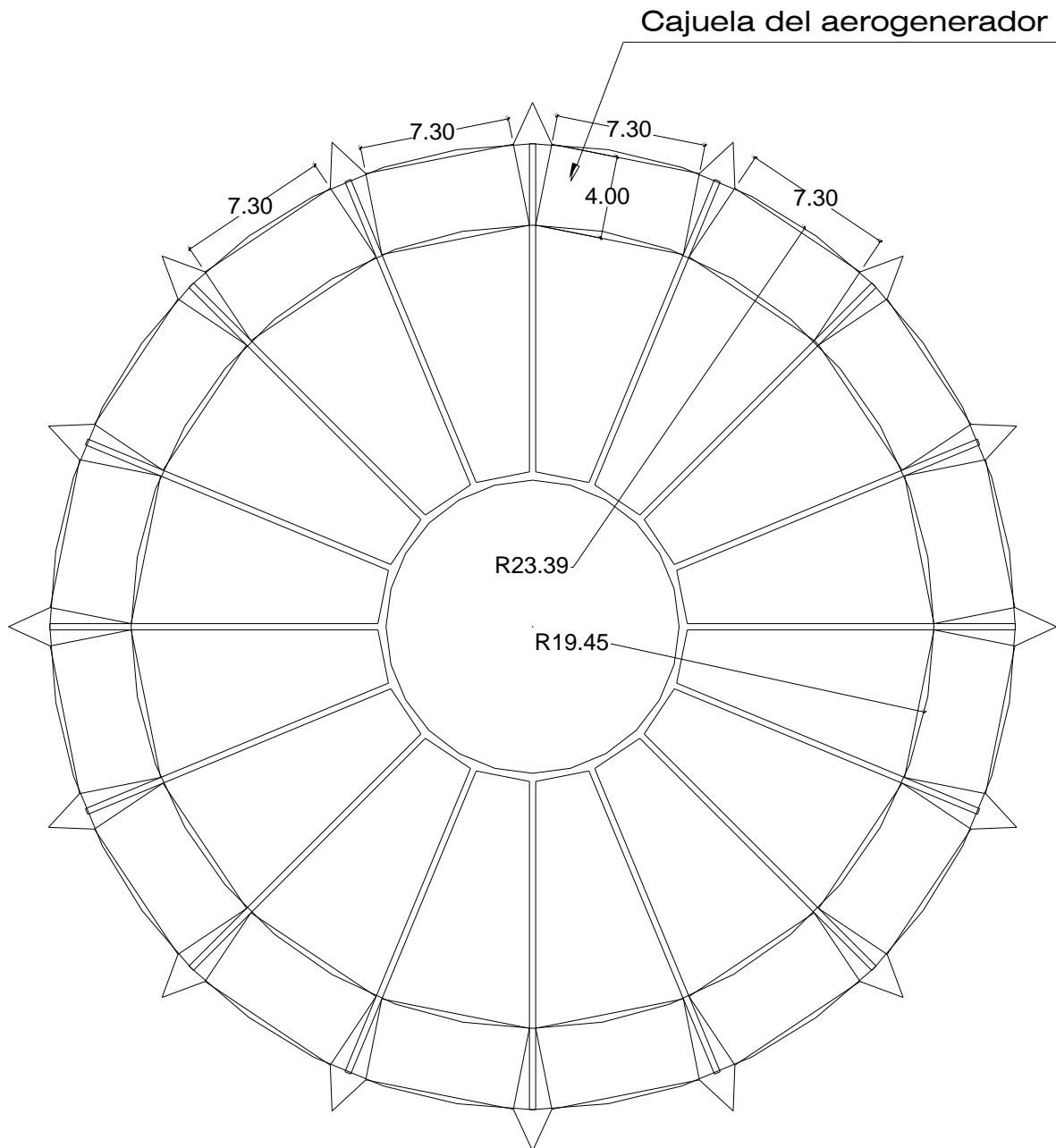
$$r_i = 3.65 \text{ m}$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Con este dato y mediante el dibujo geométrico en autocad de las 16 turbinas, se calcula el radio de la base de la torre solar, siendo en este caso:

$$r = 23.39 \text{ m}$$



ESQUEMA DE LA BASE DE LA TORRE SOLAR



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Se puede observar que en el ingreso de las cajuelas de 7.30m de diámetro existen elementos triangulares tipo cuña, esto se ha proyectado debido a que aportan un mejor comportamiento aerodinámico al sistema, así mismo se han proyectado 16 placas que sirven de apoyo a la estructura y también cumplen una función aerodinámica al encausar el flujo de aire al centro de la torre.

2.3 Conceptos de Termodinámica usados en el diseño

Fenómeno de Convección (18)

La convección es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por intermedio de un fluido (aire, agua) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos. Éstos, al calentarse, aumentan de volumen y, por lo tanto, disminuyen su densidad y ascienden desplazando el fluido que se encuentra en la parte superior y que está a menor temperatura. Lo que se llama convección en sí, es el transporte de calor por medio de las corrientes ascendente y descendente del fluido.

La transferencia de calor implica el transporte de calor en un volumen y la mezcla de elementos macroscópicos de porciones calientes y frías de un gas o un líquido. Se incluye también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido o por medio de una bomba, un ventilador u otro dispositivo mecánico (convección mecánica o asistida).

En la transferencia de calor libre o natural en la cual un fluido es más caliente o más frío y en contacto con una superficie sólida, causa una circulación debido a las diferencias de densidades que resultan del gradiente de temperaturas en el fluido.

La transferencia de calor por convección se expresa con la Ley del Enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_{inf})$$

Donde h es el coeficiente de convección (ó coeficiente de película), A_s es el área del cuerpo en contacto con el fluido, T_s es la temperatura en la superficie del cuerpo y T_{inf} es la temperatura del fluido lejos del cuerpo.



PREDIMENSIONAMIENTO DE LA ALTURA DE LA CHIMENEA (19, 20):

Arrastre

Arrastre es un término comúnmente usado para designar la presión estática generada por el pase del aire o gas en un dispositivo cerrado similar a un tubo o chimenea. Esta corriente de aire también es expresado en cuatro categorías: arrastre forzado, arrastre inducido, arrastre balanceado y arrastre natural.

Presiones y Flujos

Considerando que el “arrastre” es referido solo a la presión estática, es también importante poder determinar la presión total en cualquier punto. Esto es la presión estática más la presión de la velocidad, donde la presión de la velocidad es el equivalente de la energía cinética del flujo de aire o gas en pies-lb/lb dividido por su volumen específico.

$$p_v = \frac{V^2}{2g} \cdot \frac{1}{v}$$

Donde:

P_v = presión de velocidad, lb/pie²

V = velocidad del fluido, pie/s

g = aceleración de la gravedad, 32.2 pie/s²

v = volumen específico del aire o gas, pie³/lb

Las unidades de P_v en la ecuación anterior están dadas en lb/pie², sin embargo, es usual utilizar las unidades en pulgadas de agua, debido a que las mediciones hechas en un tubo de prueba son indicadas en pulgadas de agua, estas se realizan con un simple tubo en forma de “U”, así la ecuación anterior queda expresada en pulgadas de agua de la siguiente forma:

$$H_w = \frac{1}{5.2 v} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{pulg. de agua}$$

$$H_w = (2.4423 V^2 \rho_a) / g \quad \text{mm. de agua (formula I)}$$



Donde:

V = volumen específico del aire, $\text{pie}^3/\text{lb.} = 1 / \rho_a$

ρ_a = densidad del aire, lb/pie^3

PRODUCCION DEL TIRO (21)

La chimenea y el tiro por medio de la misma

a) El consumo de tiro:

El consumo de tiro o pérdida de carga de la corriente ascensional gaseosa, en una instalación de calderas se compone de las resistencias al tiro debidas al rozamiento de los humos en los conductos (al atravesar los haces de tubos y análogos), a los cambios de dirección de los humos, a los cambios repentinos de velocidad y a la circulación de los gases de arriba abajo en contra de su tendencia ascensional. Este consumo de tiro depende de muchos factores, como por ejemplo, el trayecto y forma de los conductos de humos; número de los haces tubulares dispuestos unas tras otros; número de series de tubos y de la separación entre ellos; número de los conductos; velocidad y temperatura de los humos; tipo de hogar y del combustible, etc., que no es posible realizar un cálculo exacto. Según Münzinger, puede hallarse el consumo de tiro con ayuda de un procedimiento grafico-numérico.

b) El tiro de la chimenea (depresión):

El tiro de la chimenea viene producido por la diferencia de peso de la columna gaseosa de la chimenea y de otra columna exterior de aire de las mismas dimensiones que aquélla. El tiro estático referido a 760 mm de columna de mercurio en el pie de la chimenea es:

$$Z = 273 H \left(\frac{\gamma_{ol}}{273 + t_l} - \frac{\gamma_{og}}{273 + t_g} \right) \text{ mm. de agua (formula II)}$$

Donde:

Z = tiro o presión en la chimenea en mm de agua

H = altura de la chimenea, m



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

γ_{ol} y γ_{og} = peso específico del aire, exterior e interior, $\text{kg/m}^3 \text{ N}$

t_l y t_g = temperaturas medias, exterior e interior, $^{\circ}\text{C}$

Como se puede apreciar se tienen dos formulas que relacionan la presión en la chimenea expresadas en mm de agua, una es la Energía Cinética del aire por unidad de volumen (Formula I) y la otra el Tiro de la Chimenea (Formula II), por lo que realizando la igualdad de presiones $H_w = Z$, se obtendrá la altura de la chimenea, a continuación se presenta una hoja de cálculo con los datos necesarios para el cálculo de la altura de la chimenea.

DISEÑO DE LA ALTURA DE LA TORRE

1) TIRO EN LA CHIMENEA (DEPRESION):

$$Z = 273 H \left[\frac{\gamma_{ol}}{(273 + t_l)} - \frac{\gamma_{og}}{(273 + t_g)} \right] \text{ mm. agua}$$

Donde:

γ_{ol} ; γ_{og} = Peso específico medio del aire, exterior e interior ($\text{kg/m}^3 \text{ N}$)

t_l ; t_g = Temperaturas medias, exterior e interior ($^{\circ}\text{C}$)

H = Altura de la Torre (m)

2) ENERGIA CINETICA DEL AIRE POR UNIDAD DE VOLUMEN:

$$H_w = 2.4423 (V^2) * \rho_a / g \text{ mm agua}$$

Donde:

V = Velocidad del aire (pie/s)

ρ_a = Densidad del aire (lb/pie^3)

g = Aceleración de la gravedad, (32.2 pie/s^2)

3) POR IGUALDAD DE PRESIONES:

$$Z = H_w$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Datos:		
$\gamma_{ol} =$	1.205	kg/m ³ N
$\gamma_{og} =$	1.20	kg/m ³ N
$t_l =$	24.5	°C
$t_g =$	42.5	°C
$V =$	49.21	pie/s
$\rho_a =$	0.0691	lb/pie ³
$g =$	32.2	pie/s ²

H =	188.27	m
------------	---------------	----------

De los resultados obtenidos y teniendo en consideración la altura necesaria para las cajuelas de los aerogeneradores ubicados en la base de la torre, utilizaremos como altura total de la torre solar:

H = 200 m

PRE-DIMENSIONAMIENTO DEL COLECTOR SOLAR:

Para determinar el área del colector solar es necesario conocer primero el área que ocuparan las turbinas o aerogeneradores eólicos en la base de la torre, los que han sido calculados anteriormente.

La determinación del área del colector solar está basada en el principio de conservación de energía, teniendo como energías equivalentes a:

a) Energía radiante solar absorbida (Q_r) (22):

que es función de la intensidad de radiación solar en la zona en estudio (I_r en W/m²- este dato es obtenido del estudio de Julián Benites C. - Estimación de la radiación solar en Iquitos - UNAP), el coeficiente de absorción del plástico (α) que cubre el colector solar (valor real dado por las especificaciones del proveedor) y el área neta de absorción solar (m²), que se obtiene calculando el área total del colector solar menos el área de la base de la torre solar.



ENERGIA RADIANTE SOLAR ABSORBIDA:

$$Q_r = I_r (A_n) \alpha$$

I_r = Intensidad de radiación solar en la Región (W /m²)

α = Coeficiente de absorción del cobertor (Plástico o Vidrio)

A_n = Área neta de absorción solar (m²)

$$A_n = \pi (R^2 - r^2)$$

En esta ecuación se tiene incógnita al radio del colector solar (R). El radio de la base de la torre (r), se determinó utilizando los principios de energía eólica desarrolladas anteriormente.

b) Calor recibido por el aire en el disco colector (Q_a):

Que es función del flujo del aire (kg/s), el calor específico promedio del aire (kJ /kg °C) y la diferencia de temperaturas en el aire que fluye por el interior del disco (°C).

Se sabe además que el flujo del aire es función de la densidad del aire (kg/m³), el área de flujo total de ingreso de aire a las turbinas (m²) la cual se determina calculando el área de cada cajuela o nicho que aloja a una turbina multiplicada por el número total de turbinas y por último de la velocidad del aire de ingreso a las turbinas (m/s).

CALOR RECIBIDO POR EL AIRE EN EL DISCO COLECTOR:

$$Q_a = m_a C_{pa} (\Delta T)$$

m_a = Flujo de aire = $\rho A_i V$ (Kg/s)

ρ = Densidad del aire (kg/m³)

A_i = Área de flujo total de ingreso a las turbinas (m²)

V = Velocidad del aire de ingreso a las turbinas (m/s)

C_{pa} = Calor específico del aire (promedio) (kJ/kg °C)

ΔT = Diferencia de temperatura en el aire que fluye por el interior del disco (°C)

r = Radio de la base de la torre (m)



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

r_i = Radio de la cajuela del aerogenerador (m)

n = Numero de aerogeneradores (unidad)

R = Radio del disco colector a ser calculado (m) **(Incógnita)**

Por último, utilizando el principio de conservación de energía e igualando ambas ecuaciones y despejando, se obtiene el radio del colector solar:

POR CONSERVACION DE ENERGIA:

$$Q_r = Q_a$$

Datos:		
$I_r =$	186.81	W/m ²
$\alpha =$	0.030	
$r =$	23.39	m
$r_i =$	7.30	m
$n =$	16.00	unidad
$\rho =$	1.1069	kg/m ³
$A_i =$	669.66	m ²
$V =$	15	m/s
$C_{pa} =$	1.0075	kJ/kg °C
$\Delta T =$	35	°C

$$R = 151.05 \text{ m}$$

$$D = 302.10 \text{ m}$$

De los resultados obtenidos, utilizaremos como diámetro del colector solar:

$$D = 305 \text{ m}$$

Energía de almacenamiento en el colector solar:

Con la finalidad de que el colector solar funcione las 24 horas del día, aun sin sol, se ha proyectado un sistema de almacenamiento de energía mediante la utilización de tubos de



ENERGIA DE ALMACENAMIENTO

CALOR RECIBIDO POR EL AIRE EN EL DISCO COLECTOR:

$$Q_a = m_a C_{pa} (\Delta T)$$

m_a = Flujo de aire = $\rho A_i V$ (kg/s)

ρ = Densidad del aire (kg/m³)

A_i = Área de flujo total de ingreso a las turbinas (m²)

V = Velocidad del aire de ingreso a las turbinas (m/s)

C_{pa} = Calor específico del aire (promedio) (kJ/kg °C)

ΔT = Diferencia de temperatura en el aire que fluye por el interior del disco (°C)

Datos:		
ρ =	1.1069	kg/m ³
A_i =	669.66	m ²
V =	15	m/s
C_{pa} =	1.0075	kJ/kg °C
ΔT =	35	°C

$$Q_a = 392,073.15 \text{ kJ}$$

Capacidad de calor del Agua = 4.30 kJ/kg

Cantidad de agua requerida = 91,179.80 kg

Volumen de agua requerida = 91.18 m³

Área de tubería PVC de Ø 4" = 0.0078539 m²

Longitud de tubo requerida = 11,609.49 m

Colocando Tuberías PVC Ø 4" llenas con agua @ 5.00m., desde la parte central del colector hasta el exterior, donde se alcanza un radio máximo de 137.50m., se obtiene una longitud total de tuberías de 11,922.35m., es decir, mayor a la longitud requerida de tuberías de 11,609.49m.



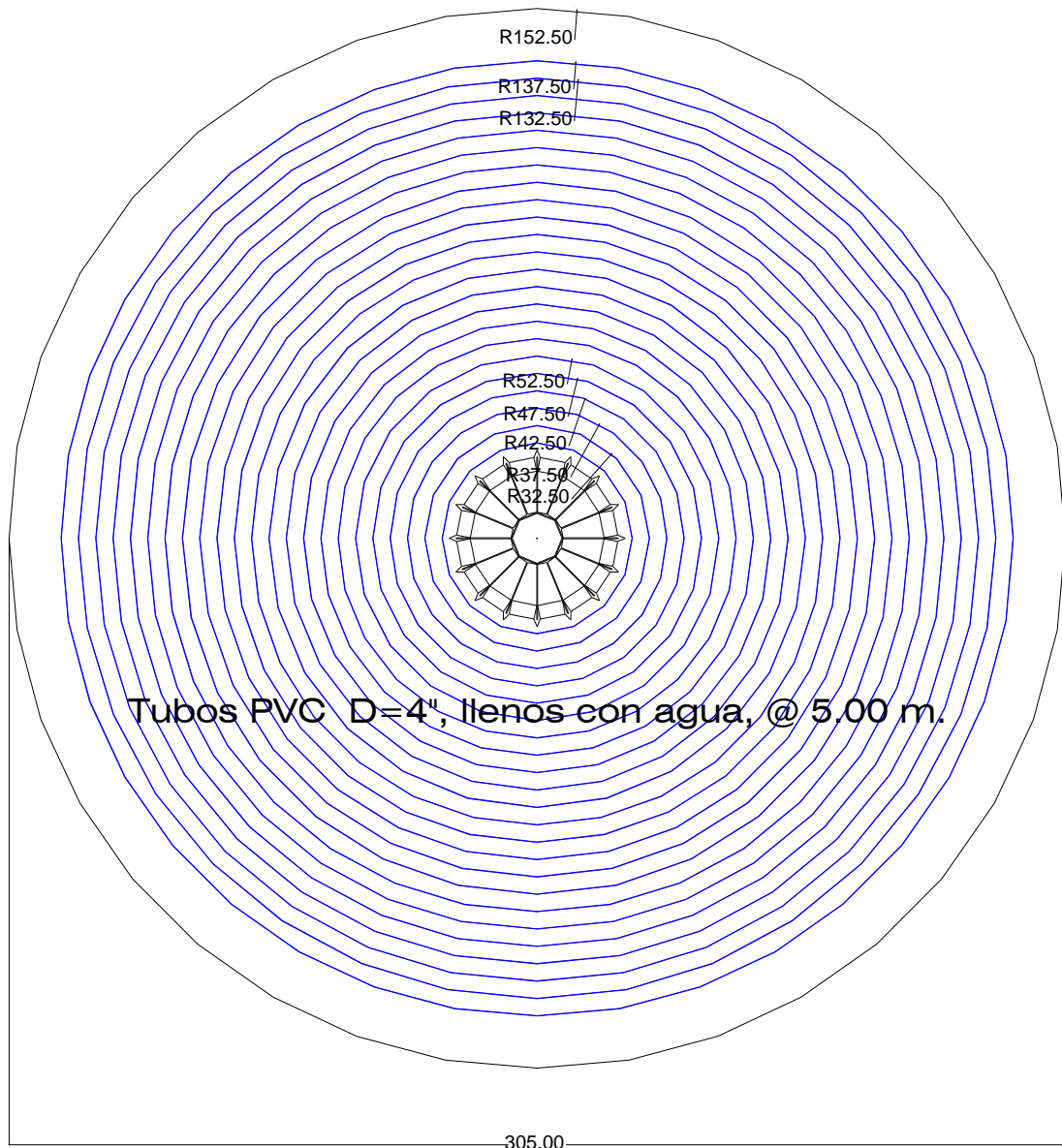
TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Radio	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	52.5	57.5	62.5	67.5	
Longitud	172.79	204.20	235.62	267.04	298.45	329.87	361.28	392.70	424.12	2,686.06 ml.

Radio	72.5	77.5	82.5	87.5	92.5	97.5	102.5	107.5	112.5	
Longitud	455.53	486.95	518.36	549.78	581.19	612.61	644.03	675.44	706.86	5,230.75 ml.

Radio	117.5	122.5	127.5	132.5	137.5					
Longitud	738.27	769.69	801.11	832.52	863.94					4,005.53 ml.

TOTAL Ø 4" 11,922.35 ml.



ESQUEMA DE DISTRIBUCION DE TUBERIA NEGRA PVC Ø 4" @ 5.00m.
PARA EL ALMACENAMIENTO DE ENERGIA



2.4 Conceptos de Estabilidad Estructural (23)

Relación altura diámetro

La relación entre la altura y el diámetro de la chimenea recomendada para una mejor estabilidad varia entra 12.5 a 15, $H/d = 12.5; 15$

Para el presente caso como la altura de la chimenea se ha determinado como $H=200m.$, entonces el diámetro de la chimenea resultaría entre el rango (13.3m.; 16m), por lo que se usará como diámetro exterior $d = 15m$

Espesor mínimo

De acuerdo a lo establecido en el reporte del ACI 307.98 (23), el espesor mínimo a utilizar en este tipo de estructuras para diámetros interiores menores o iguales a 8.50m. será de 20cm. con concreto vaciado in situ y de 18 cm. con concreto prefabricado. Este espesor se incrementará en 1.04cm., por cada metro adicional de diámetro interior mayor a 8.50m.

Para el presente caso, como se tiene un diámetro interior de 14.35m., el espesor mínimo de la torre será de $e = 20 \text{ cm.} + 1.04*(14.35 - 8.50) = 26.08\text{cm.}$, para este caso se utilizará como espesor en la parte superior de las paredes de la torre $e = 25\text{cm.}$, en la base curva de la torre se utilizará como espesor $e=40 \text{ cm.}$, este espesor varía en forma lineal. En las placas verticales de apoyo en la base se utilizará $e=30\text{cm.}$

Recubrimiento mínimo

El recubrimiento mínimo a considerar será de 3 cm., en ambas caras del elemento tipo shell, tanto en la chimenea como en la cascara circular y placas de apoyo en la base.

Criterio de deflexión

De acuerdo a lo establecido en el reporte del ACI 307-98, sobre el diseño y construcción de chimeneas de concreto reforzado, el máximo desplazamiento lateral en la parte superior de la chimenea bajo condiciones de servicio antes de la aplicación de las cargas factoradas no deberán de exceder el siguiente límite:

X máx. = 0.04 H (para unidades inglesas)

X máx. = 3.33 H (para unidades métricas)



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Donde:

X máx. = máxima deflexión lateral, pulg. (mm)

H = altura de la chimenea, pies (m)

Estabilidad al volteo

La estructura de la torre solar tiene una particularidad especial diferente a las chimeneas convencionales, esta particularidad consiste en una base mucho mayor al diámetro de la chimenea (base rígida), esto debido a que la estructura de la base debe proyectarse para alojar a las 16 turbinas eólicas, consideradas en el presente estudio. La forma de la estructura es tipo candelabro y será desarrollada al detalle en los siguientes ítems. Esta particularidad ayuda bastante a la estabilidad contra el volteo de la estructura y distribuye en una mayor área el peso total de la estructura. El factor a considerar para la estabilidad al volteo será de 1.50 ($FSV \geq 1.50$) utilizando cargas de servicio.

Calidad del concreto

Las especificaciones a utilizar con respecto a la mezcla de concreto serán las establecidas en la norma ACI 318. De acuerdo a los requerimientos del ACI 307-98, las chimeneas utilizarán una mezcla de concreto cuya resistencia mínima a la compresión será de $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días. Cabe señalar que en la zona de interés del presente estudio no existe agregado grueso, por lo que se utiliza como único agregado la arena, siendo ya conocidas sus propiedades y diseños de mezcla por los proyectistas del lugar, obteniéndose resistencias con dicha mezcla muy superiores a los requeridos para la presente estructura, llamando de ahora en adelante a dicha mezcla "mortero armado" en vez de concreto armado.

Reforzamiento

El reforzamiento deberá cumplir con las normas ASTM A 615, A 617 o A 706. La resistencia a la fluencia del acero será $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$.

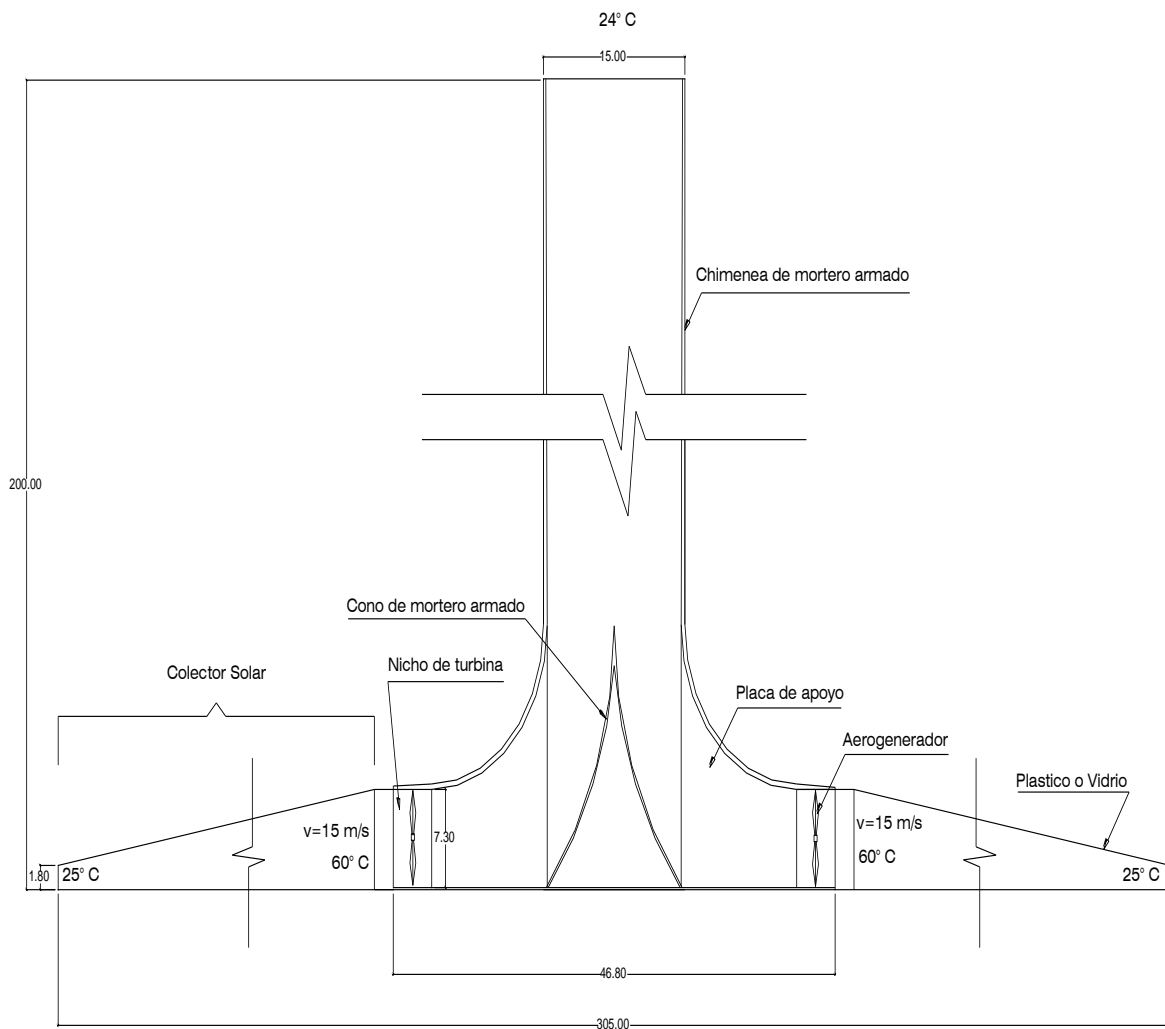
Criterios de diseño y análisis estructural

Las chimeneas se diseñarán para una combinación de cargas de acuerdo a lo establecido en el reporte ACI 307-98 utilizando el método de la rotura.

Tomando en cuenta los criterios del pre dimensionamiento del sistema de la torre solar, se obtiene una estructura inicial, la cual tendrá que ser analizada estructuralmente para luego proceder con el diseño final. Para un diseño apropiado y seguro, la chimenea o torre solar será analizada para soportar las siguientes cargas:

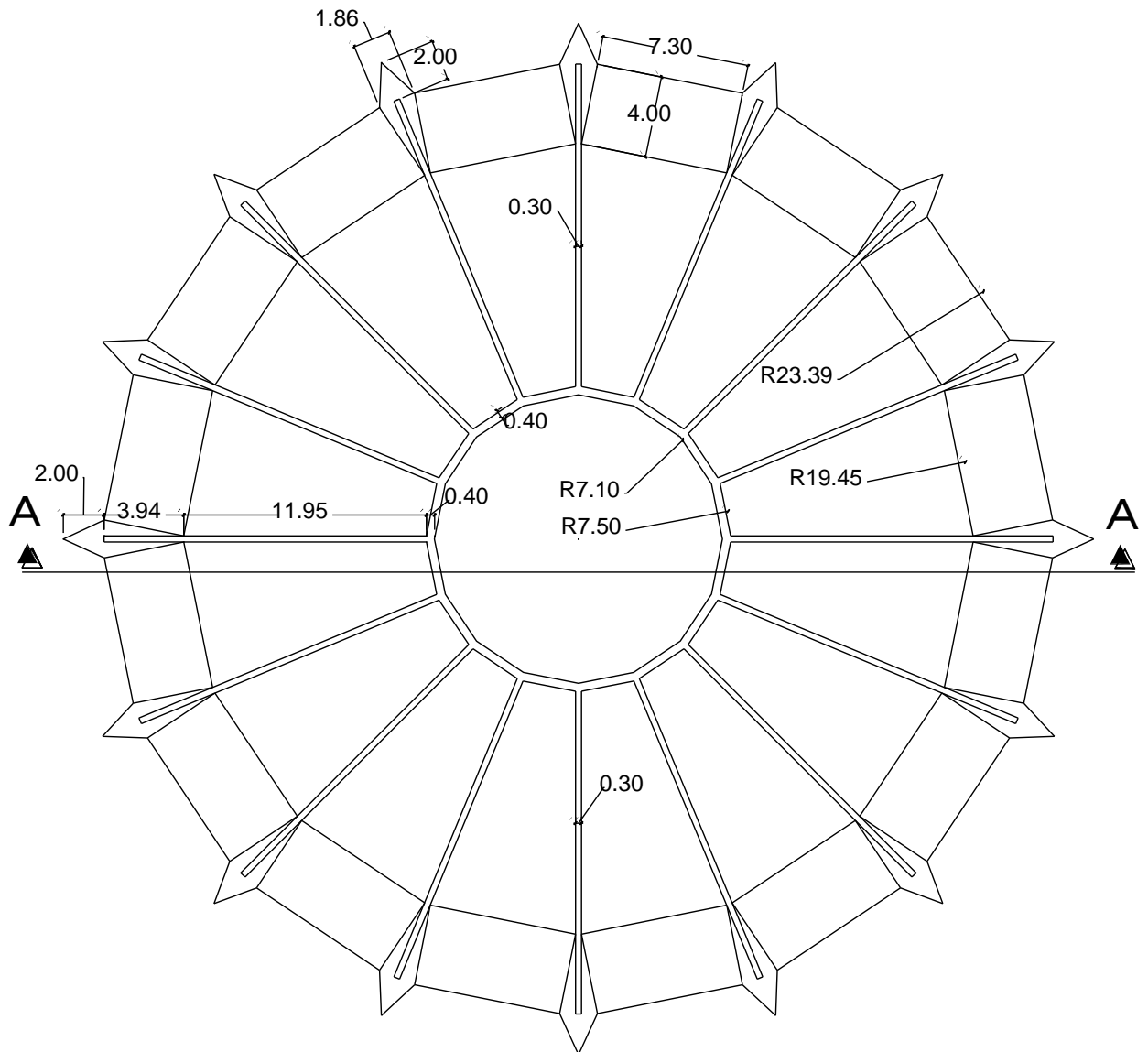
- Peso propio de la estructura (carga muerta).
- Cargas de uso de la estructura (cargas vivas).
- Carga de viento longitudinal.
- Carga de viento transversal, analizada en el 1er y 2do modo de vibración.
- Carga de sismo, utilizando el método de análisis modal espectral.

ESQUEMA GENERAL DE LA TORRE SOLAR





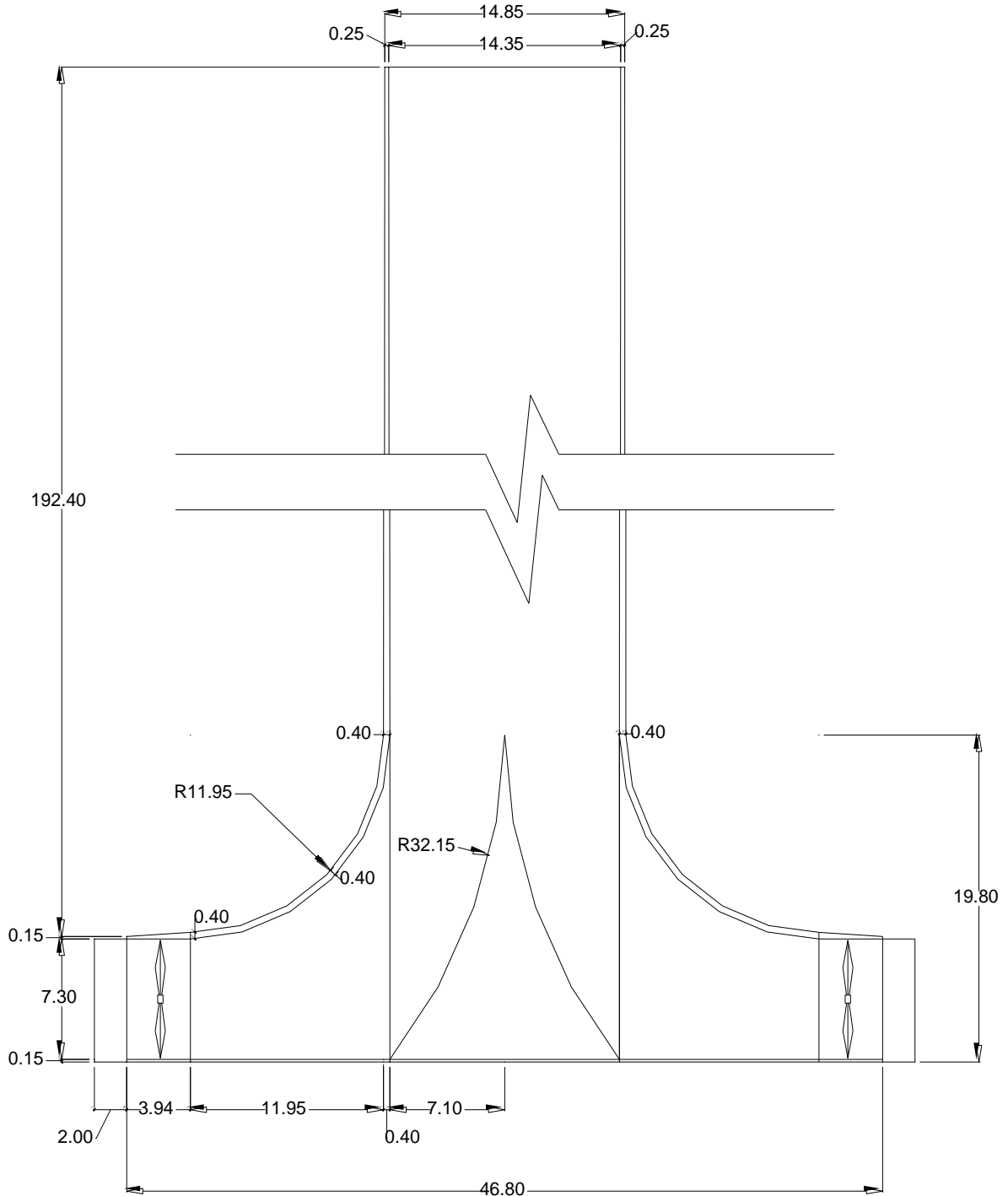
DETALLES TORRE SOLAR



PLANTA ESTRUCTURAL



ELEVACION TORRE SOLAR



CORTE A - A



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



VISTA PANORAMICA DE TODO EL SISTEMA DE LA TORRE SOLAR



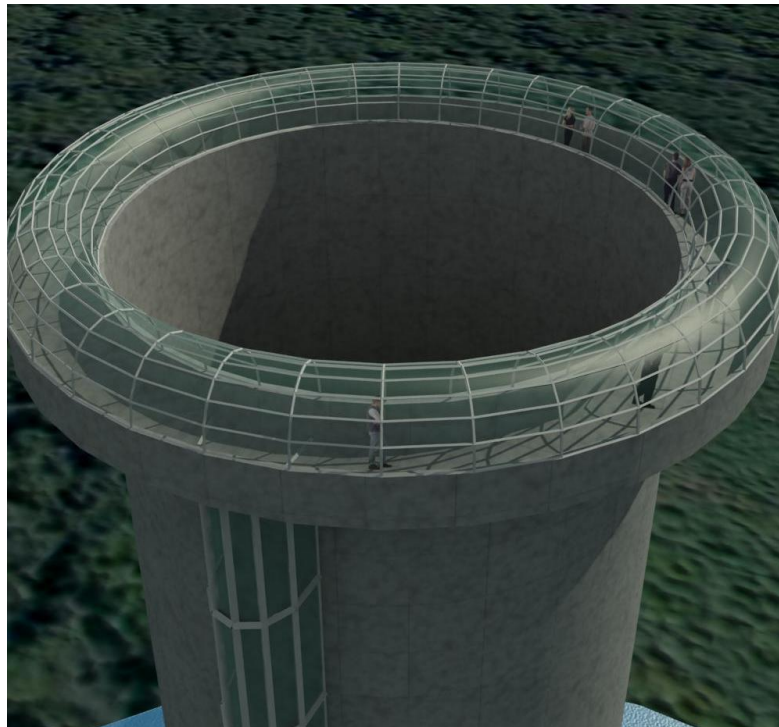
TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



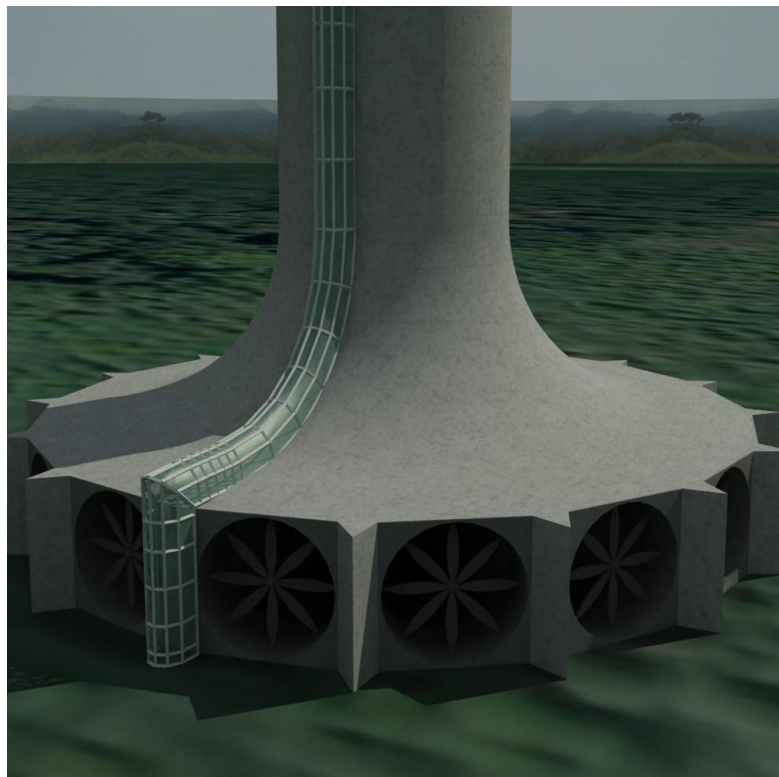
VISTA DE LA ESTRUCTURA PRINCIPAL



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



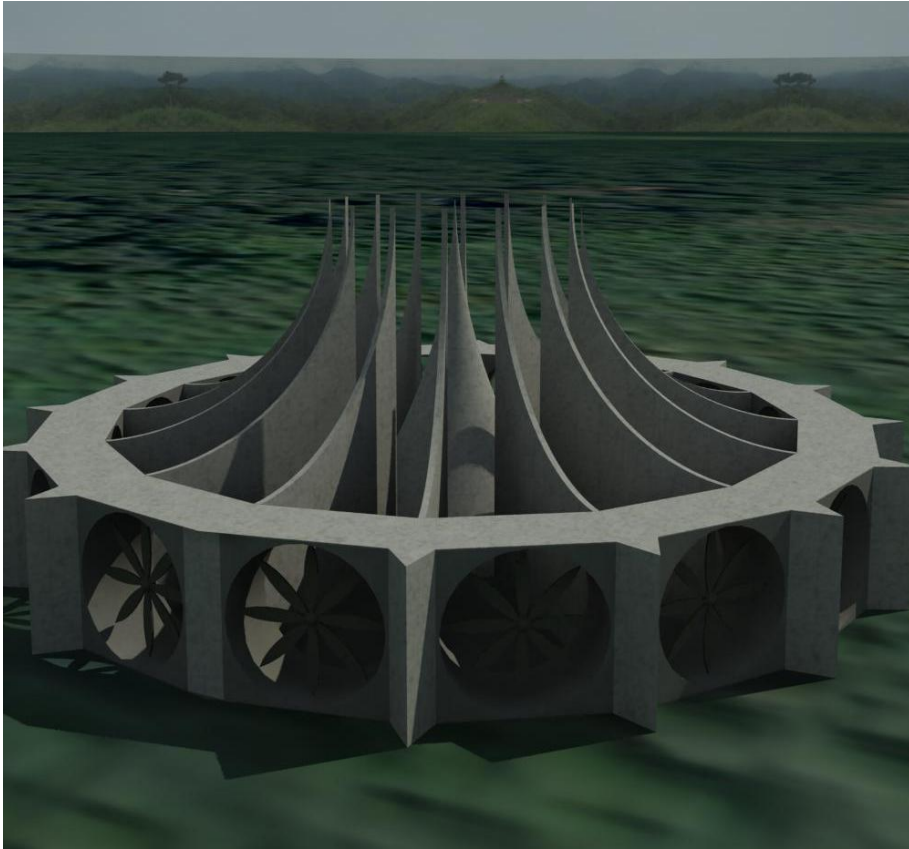
VISTA DE LA PARTE SUPERIOR (MIRADOR)



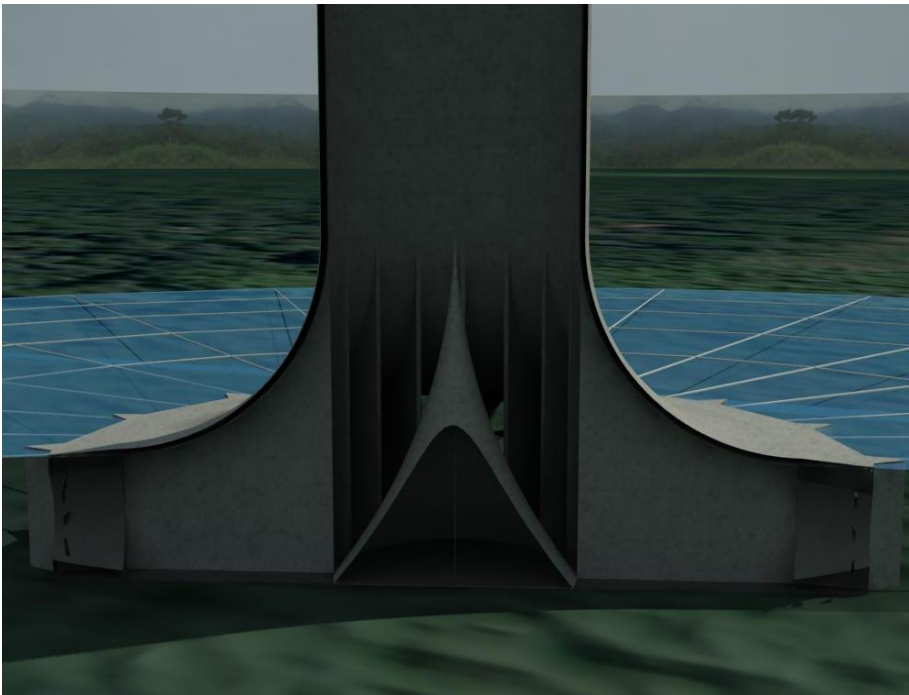
VISTA DE LA PARTE INFERIOR (BASE)



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



VISTA DE LA ESTRUCTURA INTERIOR EN LA BASE



CORTE A - A



CAPITULO 3:

CALCULO ESTRUCTURAL DE LA TORRE SOLAR

3.1 Teoría de análisis dinámico de sistemas continuos (24)

Realmente todas las estructuras son sistemas de masa distribuida desde que los modelos de resortes sin masa son físicamente imposibles. Sin embargo algunas estructuras pueden considerarse muy aproximadamente mediante el sistema de masas concentradas, tal es el caso de un edificio de pórticos, donde la masa del resorte del modelo cortante, es muy pequeño comparado con la masa concentrada en los extremos del resorte. Para otra clase de estructuras, como vigas con masa distribuida a lo largo de su longitud, es frecuentemente fácil resolver las ecuaciones basadas en sistemas de masa continua, que convertir el miembro en un sistema equivalente de parámetros concentrados.

Si la masa es continuamente distribuida, hay infinitos números de grados de libertad, desde que cada pequeño elemento puede ser considerado como una partícula discreta conectada por resortes al otro elemento. Sin embargo, solo unos cuantos modos del sistema tienen una respuesta significativa para efectos prácticos, y en algunos casos solo el modo fundamental es de importancia. Por lo tanto el análisis comienza generalmente con el aislamiento de los modos más bajos y la determinación de las frecuencias naturales y formas características de estos modos. Las respuestas modales se pueden computar y superponer tal como en el caso de los sistemas de masa concentrada.

El comportamiento de un sistema continuo está gobernado por un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que constituyen las ecuaciones de movimiento del sistema.

La respuesta en vibración libre del sistema puede obtenerse solucionando las ecuaciones de movimiento con sus respectivas condiciones de contorno. La solución analítica de estas ecuaciones es sólo posible para el caso de elementos simples, como barras o vigas de propiedades uniformes, como en el caso de una chimenea. Estas soluciones analíticas se obtienen utilizando la técnica de separación de variables, que se basa en expresar la respuesta del sistema como el producto de una función de forma que depende de la variable espacial x , y una coordenada que depende del tiempo. Este procedimiento

conduce a dos ecuaciones diferenciales lineales homogéneas separadas, una de las cuales involucra la variable de tiempo t , mientras que la otra involucra la variable espacial x como se verá a continuación.

ESTRUCTURAS CON MASA Y CARGA DISTRIBUIDA

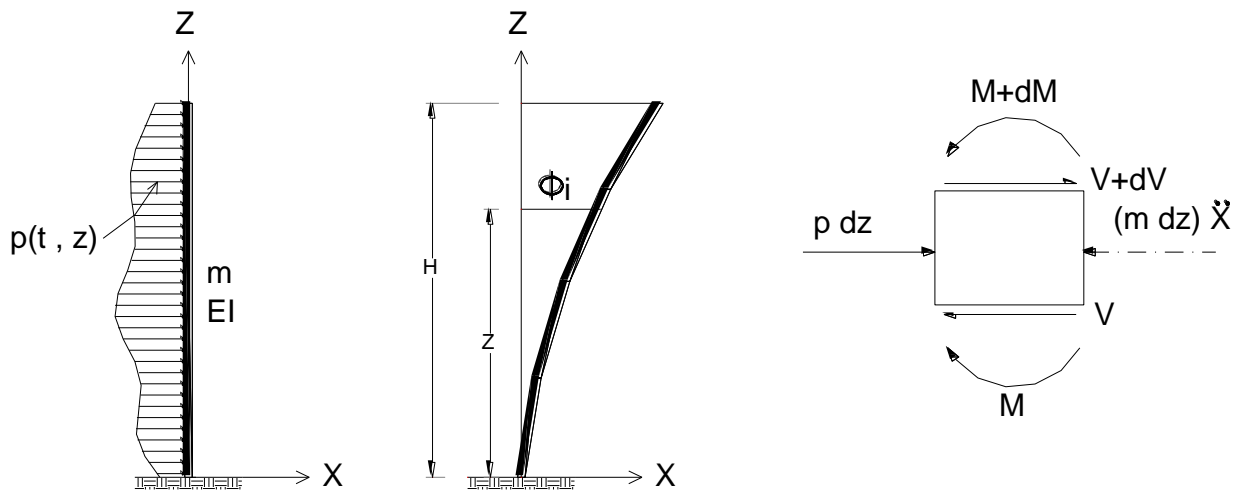


Fig. (a)

Considere un elemento tipo chimenea, que para caso práctico se considerará como una viga en voladizo mostrada en la figura (a), donde “ m ” es la intensidad de la masa en $\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{cm}^2$, “ p ” la intensidad de la carga en kg/cm . La masa se asume uniforme a lo largo de la longitud de la viga, pero “ p ” puede ser una función de ambos “ t ” y “ z ”, esto es, p varia con el tiempo y con la posición a lo largo de la viga. Considerando un elemento de la viga y efectuando el equilibrio dinámico y teniendo en cuenta que “ M ” es el momento flector y “ V ” el cortante, ambos positivos en el sentido convencional mostrado, resulta que la intensidad de la carga neta “ ω ” en el elemento será:

$$\sum F_h = 0 \rightarrow (V+dV) + pdz - (mdz) \ddot{X} - V = 0; \quad (m \ddot{X} - p) dz = dV; \quad dV/dz = m \ddot{X} - p$$

Se sabe que: $dV/dz = -\omega$ (carga); así también: $dM/dz = V$ (cortante)

Reemplazando se tiene:

$$\omega = p(t, z) - m \ddot{X}$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

La carga es positiva en la misma dirección que la dirección positiva de x. Considerando la ecuación de la elástica que relaciona el momento, la carga y deflexión, se tiene:

$$M = -EI \frac{\partial^2 x}{\partial z^2}$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial z^2} = -EI \frac{\partial^4 x}{\partial z^4} = -\omega$$

Se puede escribir la ecuación como:

$$EI \frac{\partial^4 x}{\partial z^4} + m \ddot{X} = p(t, z) \dots (I)$$

Donde EI es la rigidez de la viga, que es asumida constante a lo largo de la viga. La última ecuación obtenida es la ecuación de movimiento que gobierna la vibración transversal de la viga. Si las ecuaciones pueden ser resueltas, el resultado sería la deflexión de la viga como función de ambos el tiempo y la posición a lo largo de la viga.

Muchas aproximaciones significativas se han realizado en la solución de la ecuación de movimiento, primero, las deformaciones por corte en el elemento han sido ignoradas y segundo, la rotación del elemento no ha sido considerada. Para la mayoría de las estructuras tipo vigas, ninguno de los efectos antes mencionados son importantes por lo que se despreciaran en el presente análisis.

Por definición se tiene que para cualquier modo normal:

$$P(t, z) = 0 \quad \text{y} \quad X_n(t, z) = f_n(t) \Phi_n(z)$$

Donde $f_n(t)$ es una función del tiempo, y $\Phi_n(z)$ es la forma característica con una amplitud indeterminada. Se puede escribir entonces:

$$\ddot{X}_n = \ddot{f}_n(t) \Phi_n(z) \quad \text{y} \quad \frac{\partial^4 X_n}{\partial z^4} = f_n(t) \frac{d^4 \Phi_n(z)}{dz^4}$$

Donde \ddot{X}_n es la segunda derivada parcial de X_n respecto al tiempo. Sustituyendo en la ecuación (I), se tiene:



**TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE**

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

$$E I f_n(t) \frac{d^4 \Phi_n(z)}{dz^4} + m \Phi_n(z) \ddot{f}_n(t) = 0$$

o

$$\frac{E I}{m \Phi_n(z)} \frac{d^4 \Phi_n(z)}{dz^4} = - \frac{\ddot{f}_n(t)}{f_n(t)} \dots\dots\dots (II)$$

Desde que la parte izquierda de la ecuación (II) varía solo con Z y el lado derecho solo con el tiempo, cada una de ellas debe ser igual a una constante, que como se sabe será igual a ω_n^2 . Así pues, igualando cada lado de la ecuación a ω_n^2 , se puede escribir las dos ecuaciones

(a) $\ddot{f}_n(t) + \omega_n^2 f_n(t) = 0$

(b) $\frac{d^4 \Phi_n(z)}{dz^4} - \frac{m \omega_n^2}{E I} \Phi_n(z) = 0$

La solución de la primera ecuación es (a):

$$f_n(t) = C_1 \text{sen } \omega_n t + C_2 \text{cos } \omega_n t$$

Lo cual indica que simplemente la función es armónica, con frecuencia natural ω_n , por lo tanto la ecuación (II) es válida para los modos normales. La solución para la segunda ecuación (b) es:

$$\Phi_n(z) = A_n \text{sen } a_n z + B_n \text{cos } a_n z + C_n \text{senh } a_n z + D_n \text{cosh } a_n z \dots\dots\dots (III)$$

Donde,

$$a_n = \sqrt[4]{m \omega_n^2 / E I}$$

La ecuación (III) es en general válida para cualquier viga con cualquier tipo de restricción en los extremos. Las constantes pueden ser determinadas por condiciones de borde del problema en particular. Para el presente caso se utilizarán las condiciones de borde para una viga en voladizo.

Condiciones de borde para la viga en voladizo:



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

$$x = \frac{dx}{dz} = 0; \quad \text{para } z = 0$$

$$\frac{d^2x}{dz^2} = \frac{d^3x}{dz^3} = 0; \quad \text{para } z = H$$

La tercera derivada debe ser igual a cero en el extremo libre, puesto que en un modo normal (vibración libre sin fuerzas externas), no hay cortante en dicho punto. Introduciendo estas condiciones de borde en la ecuación (III), la ecuación en frecuencia resulta ser:

$$\cos(a_n H) \cosh(a_n H) + 1 = 0$$

La primera raíz de esta ecuación es $a_1 H = 1.875$, y las raíces superiores pueden hallarse con la siguiente aproximación:

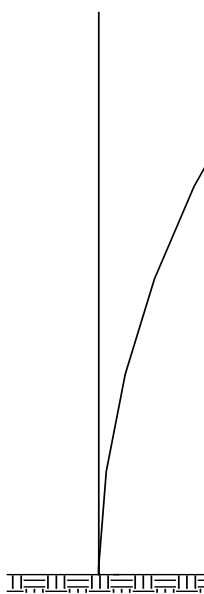
$$a_n H = (n - \frac{1}{2}) \pi \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

Siendo las frecuencias naturales las siguientes:

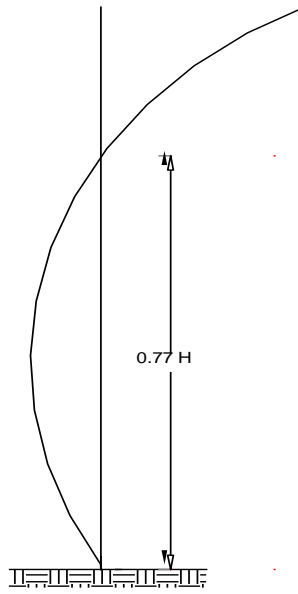
$$\omega_1 = \frac{(0.597 \pi)^2}{H^2} \sqrt{EI / m}$$

y

$$\omega_n = \frac{(n - \frac{1}{2})^2 \pi^2}{H^2} \sqrt{EI / m} \quad n > 1$$

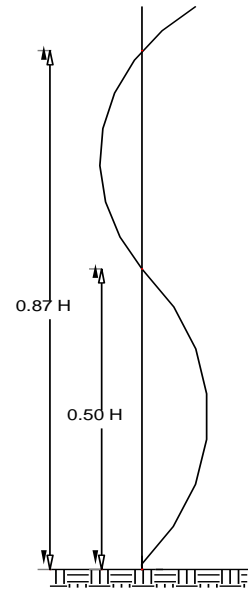


1er. modo



2do. modo

$n = 2$



3er. modo

$n = 3$



Las formas características para la viga en voladizo esta dado por:

$$\Phi_n(z) = \beta_n [(A/B)_n (\text{SENH}(a_n z) - \text{SEN}(a_n z)) + \text{COSH}(a_n z) - \text{COS}(a_n z)]$$

Donde:

$$\left(\frac{A}{B}\right)_n = - \frac{\cos a_n H + \cosh a_n H}{\text{sen } a_n H + \sinh a_n H}$$

β_n = Constante arbitraria

Vibración forzada en vigas:

Para determinar la respuesta en vigas debido a la aplicación de fuerzas dinámicas, se usarán las ecuaciones de Lagrange, de igual manera que para sistemas de masa concentrada. La deflexión dinámica puede representarse por la suma de los componentes modales:

$$X(t, z) = \sum^n A_n \Phi_n(z)$$

Donde A_n es la amplitud modal (la cual varía con el tiempo), y $\Phi_n(z)$ es la forma característica. La velocidad está dada por:

$$\dot{X}(t, z) = \sum^n \dot{A}_n \Phi_n(z)$$

Usando la ecuación de Lagrange, la energía cinética del sistema completo esta expresada por:

$$K = \frac{1}{2} m \int_0^H \dot{X}^2 dz = \frac{1}{2} m \int_0^H \left[\sum^n \dot{A}_n \Phi_n(z) \right]^2 dz$$

Donde m es la masa uniformemente distribuida, y la integración proporciona la sumatoria de toda la energía cinética a lo largo de la longitud de la viga.

Expandiendo la serie, la última ecuación puede escribirse de la siguiente forma:

$$K = \frac{1}{2} m \int_0^H \left[\sum \dot{A}_n^2 \Phi_n^2(z) \right] dz + m \int_0^H \left\{ \sum [\dot{A}_n \Phi_n(z)] [\dot{A}_m \Phi_m(z)] \right\} dz$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Donde el segundo termino de la serie indica la suma de todos los productos modales cruzados. La contribución de uno de estos productos cruzados puede escribirse como:

$$m \int_0^H \dot{A}_n \Phi_n(z) \dot{A}_m \Phi_m(z) dz$$

Reemplazando la integral por sumatoria:

$$\sum_{r=1}^j [\dot{A}_n \Phi_n(z_r)] [\dot{A}_m \Phi_m(z_r)] m \Delta z$$

Donde j es el número de elementos discretos que ha sido dividida la viga para propósitos de la sumatoria. La expresión puede también escribirse como:

$$\dot{A}_n \dot{A}_m \sum_{r=1}^j M_r \Phi_n(z_r) \Phi_m(z_r) \dots \dots \dots (IV)$$

Por las condiciones de ortogonalidad se tiene:

$$\sum_{r=1}^j M_r a_n a_m = 0$$

Esto indica que la expresión (IV) debe ser también igual a cero, desde que $\Phi_n(z_r)$ y a_r son idénticos en significado. Así el segundo término completo de la expresión para K es cero y:

$$K = \frac{1}{2} m \int_0^H [\sum \dot{A}_n^2 \Phi_n^2(z)] dz$$

$$K = \frac{1}{2} m \sum_n \dot{A}_n^2 \int_0^H \Phi_n^2(z) dz$$

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{A}_n} = m \dot{A}_n \int_0^H \Phi_n^2(z) dz$$

Además:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{A}_n} = m \ddot{A}_n \int_0^H \Phi_n^2(z) dz$$



**TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE**

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

El trabajo realizado bajo la acción de fuerzas dinámicas externas durante una arbitraria distorsión es:

$$W_e = \int_0^H p(t, z) \left[\sum^n A_n \Phi_n(z) \right] dz$$

$$= \int_0^H f(t) p_1(z) \left[\sum^n A_n \Phi_n(z) \right] dz$$

Donde $f(t)$ es la carga en función del tiempo, y $p_1(z)$ es la distribución de carga a lo largo del tramo, la cual es una función cualquiera de z . El ratio del cambio del trabajo externo con respecto a A_n es además:

$$\frac{\partial W_e}{\partial A_n} = f(t) \int_0^H p_1(z) \Phi_n(z) dz$$

Escribiendo la ecuación de Lagrange sin considerar el amortiguamiento y sustituyendo en la expresión anterior, se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{A}_n} + \frac{\partial U}{\partial A_n} = \frac{\partial W_e}{\partial A_n}$$

$$m \ddot{A}_n \int_0^H \Phi_n^2(z) dz + \frac{\partial U}{\partial A_n} = f(t) \int_0^H p_1(z) \Phi_n(z) dz$$

Es innecesario evaluar la energía de deformación U , desde que se sabe por experiencias previas que, si la última ecuación es dividida por el coeficiente \ddot{A}_n , el coeficiente A_n se convierte en ω_n^2 . Así se tiene:

$$\ddot{A}_n + \omega_n^2 A_n = \left(f(t) \int_0^H p_1(z) \Phi_n(z) dz \right) / \left(m \int_0^H \Phi_n^2(z) dz \right) \dots(V)$$

Esta última expresión viene a ser la ecuación de movimiento para en n -ésimo modo y es completamente análogo que para los sistemas de masas concentradas. La deflexión estática modal está dada por:

$$A_{nst} = \left(\int_0^H p_1(z) \Phi_n(z) dz \right) / \left(\omega_n^2 m \int_0^H \Phi_n^2(z) dz \right)$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

La respuesta modal está dada por:

$$A_n(t) = A_{nst} (FAD)_n$$

Y la respuesta total está dada por:

$$X(z, t) = \sum A_n(t) \Phi_n(z)$$

Donde $(FAD)_n$ es el factor de amplificación dinámica, equivalente al sistema de un solo grado de libertad para el modo n -ésimo. Estas ecuaciones son análogas a las ecuaciones para sistemas de masas concentradas y se hubiera podido, de hecho, deducirse directamente de ellas.

La ecuación (V) es completamente general y se aplica a vigas con cualquier tipo de apoyo y con cualquier condición de distribución de carga. Si las cargas son concentradas en vez de distribuidas, la integral en el numerador del lado derecho de la ecuación se convierte simplemente en una sumatoria, teniendo un término para cada carga. La ejecución de la integración resulta tediosa para otro tipo de vigas que la simplemente apoyada, debido a que las formas características son funciones complicadas.

Análisis sísmico de sistemas continuos:

Este análisis es similar al de sistemas con masas concentradas, el análisis recomendado para esta tipo de estructuras es el análisis modal espectral, una vez calculadas las formas características, se procederá a calcular el factor de participación de cada modo de vibración de acuerdo a la siguiente expresión:

$$a_n = \left(\int_0^H m(z) (\Phi_i)_n dz \right) / \left(\int_0^H m(z) (\Phi_i)_{n^2} dz \right) = \frac{\sum (\Phi_i)_n}{\sum (\Phi_i)_{n^2}}$$

Espectros de aceleración utilizados (25):

El espectro a utilizar será el de la Norma Técnica de edificación E-030 "Diseño Sismo Resistente", donde:

Espectro de pseudo aceleraciones: $S_{a, i} = \frac{Z U S C_i}{R} g$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Donde: $C_i = 2.5 (T_p/T_i) \leq 2.5$, es el factor de amplificación sísmica, siendo T_p el periodo fundamental del suelo y T_i el periodo de la estructura para el iésimo modo de vibración.

Respuestas modales (26):

Las respuestas, momentos y cortantes, correspondientes a cada modo de vibración, se pueden calcular con las siguientes expresiones (entendiéndose que las respuestas que se calcule, para cada uno de los modos, son las máximas)

$$(M_i)_n = E I (\Phi_i)_n (FPM)_n \frac{(S_a)_n}{\omega_n^2}$$

$$(V_i)_n = E I (\Phi_i)_n (FPM)_n \frac{(S_a)_n}{\omega_n^2}$$

Donde:

$$\Phi_n(z) = \beta_n [(A/B)_n (\text{SENH}(a_n z) - \text{SEN}(a_n z)) + \text{COSH}(a_n z) - \text{COS}(a_n z)]$$

$$\ddot{\Phi}_n(z) = \beta_n a_n^2 [(A/B)_n (\text{SENH}(a_n z) + \text{SEN}(a_n z)) + \text{COSH}(a_n z) + \text{COS}(a_n z)]$$

$$\dddot{\Phi}_n(z) = \beta_n a_n^3 [(A/B)_n (\text{COSH}(a_n z) + \text{COS}(a_n z)) + \text{SENH}(a_n z) - \text{SEN}(a_n z)]$$

Combinación modal:

$$R_k = 0.25 \sum |R_i| + 0.75 \sqrt{\sum R_i^2}$$

Alternativamente se utilizará la combinación cuadrática completa (CQC).

Para evitar cálculos tediosos, se ha desarrollado un pequeño programa en Excel, el cual permite calcular de manera inmediata, las formas de modo, los momentos y cortantes, lo que se comparará mediante un modelo en elementos finitos utilizando el programa SAP 2000.



3.2 Definición del modelo matemático – SAP 2000

Aquí se define el modelo matemático del proyecto utilizando el programa SAP 2000, para lo cual se generará un modelo tridimensional con malla de elementos finitos tipo Shell. Como la estructura tiene una variación en la base, no es posible modelarla como un cilindro de sección recta, por lo que se usará un comando muy útil en el SAP-2000, llamado “Extrude”, el que permite, previa definición de la generatriz mediante elementos tipo frame, modelar estructuras de cualquier forma, por más compleja que esta sea. Este comando “Edit / Extrude / Extrude Line to Areas”, permite convertir la generatriz lineal en una superficie.

El modelo matemático se definirá considerando el eje de los elementos considerados en el corte A-A de la elevación de la Torre Solar, definida en el pre dimensionamiento, luego se definirá las líneas base o cuadrículas del SAP 2000 (Grid Only) a fin de establecer la generatriz del modelo.

Datos para el programa:

$f_c = 210 \text{ kg/cm}^2$	(Resistencia a la compresión del mortero)
$F_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$	(Fluencia del acero corrugado)
$\gamma_c = 2,400 \text{ kg/m}^3$	(Peso del mortero por unidad de volumen)
$E = 217,370.7 \text{ kg/cm}^2$	(Modulo de elasticidad)
$\mu = 0.20$	(Modulo de Poisson)
$G = 90,571.13$	(Modulo de corte)
$\sigma_t = 1.00 \text{ kg/cm}^2$	(capacidad portante del suelo)
$K = 2,200 \text{ ton/m}^3$	(Coeficiente de Balasto del suelo)

Espesor de las paredes de la torre: Variable de 0.25m en la parte superior a 0.40m en la parte inferior.

Espesor de la sección curva en la base: 0.40m

Espesor del techo de la cajuela de los aerogeneradores: Variable de 0.15m a 0.40m

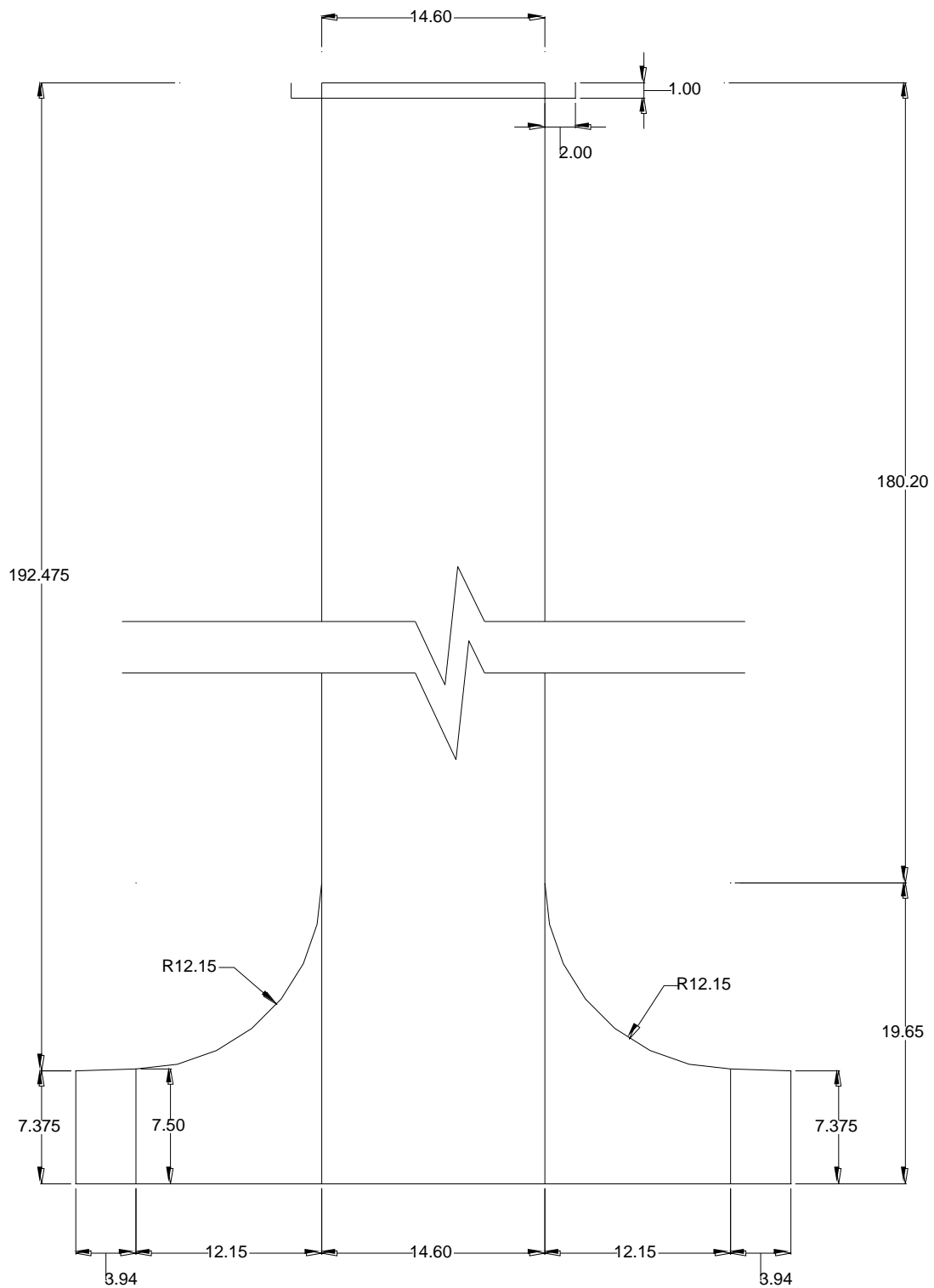
Espesor de las placas de apoyo: 0.30m

Espesor de la losa del mirador en la parte superior de la torre: 0.20m

Espesor del muro perimetral en el mirador: 0.15m



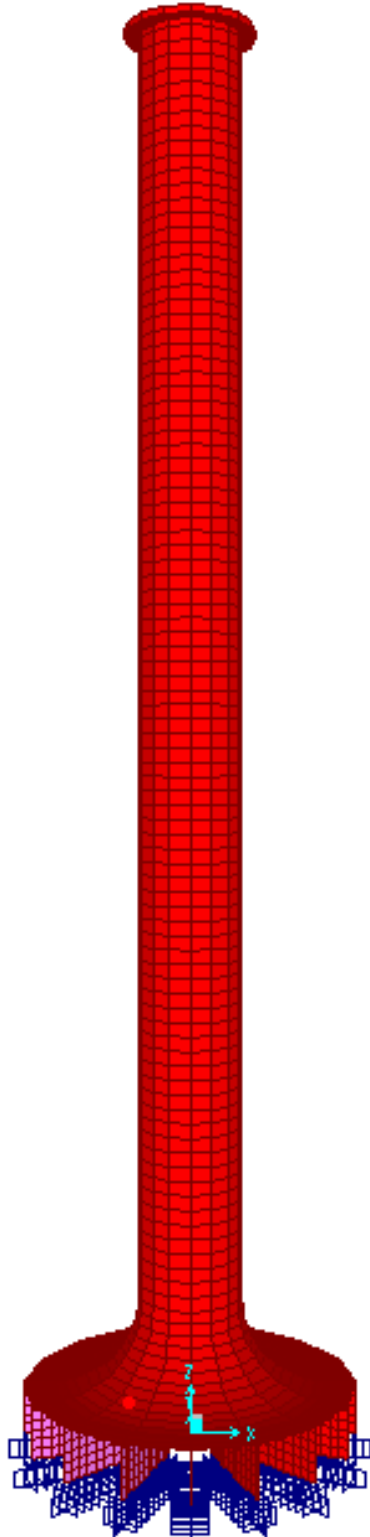
TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



MODELO MATEMATICO PARA DEFINICION DE LA GENERATRIZ



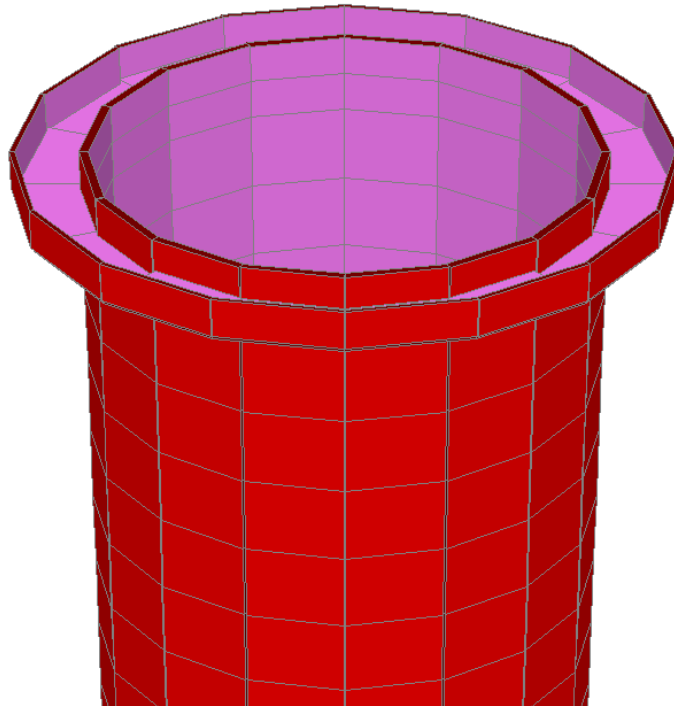
TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



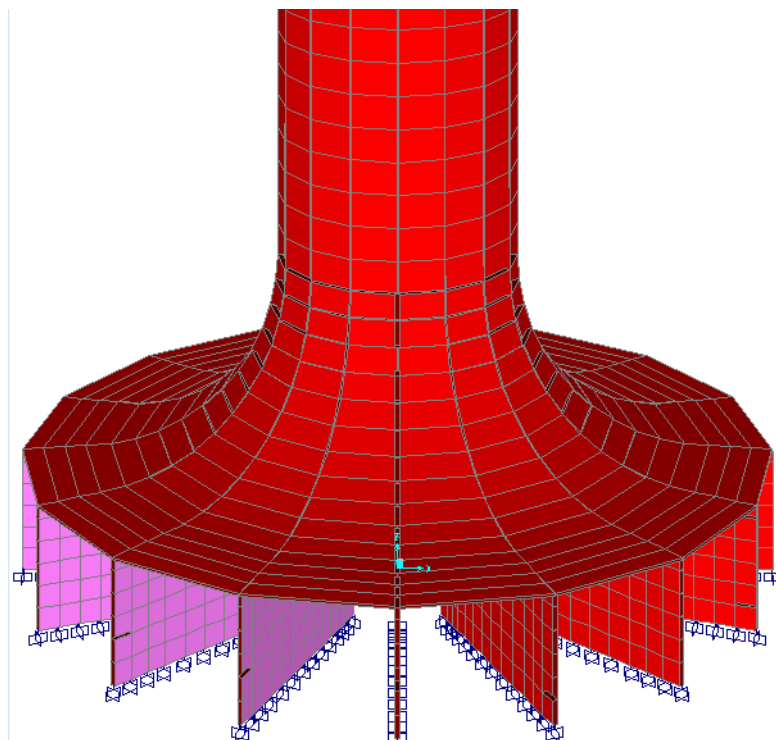
MODELO MATEMATICO COMPLETO – SAP 2000



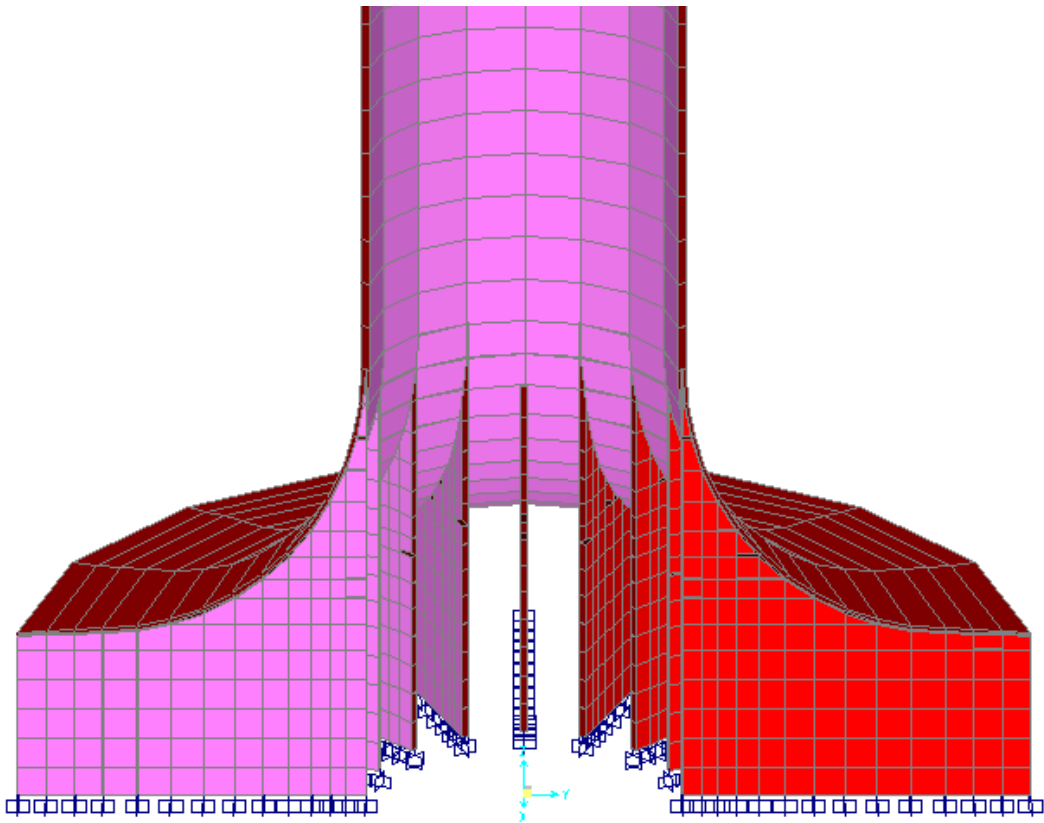
TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



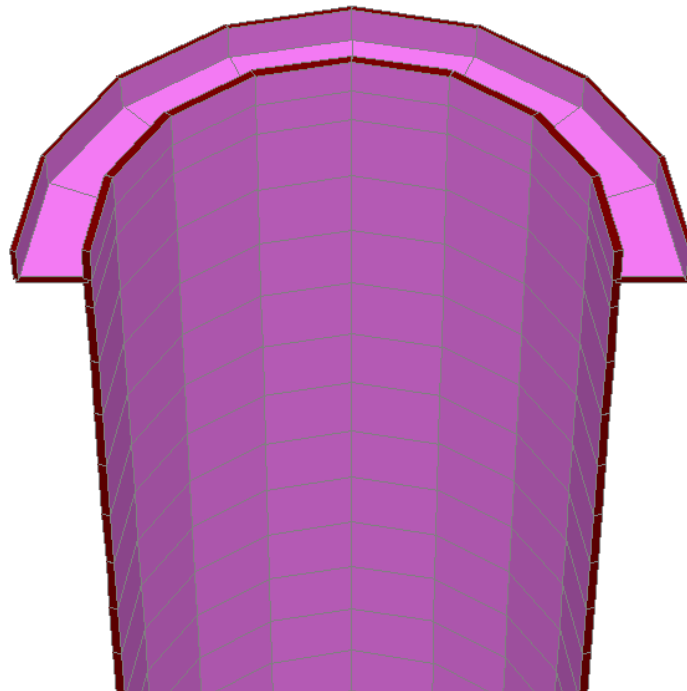
VISTA DE LA PARTE SUPERIOR DEL MODELO (MIRADOR)



VISTA DE LA PARTE INFERIOR DEL MODELO (BASE)



CORTE TRANSVERSAL EN LA BASE



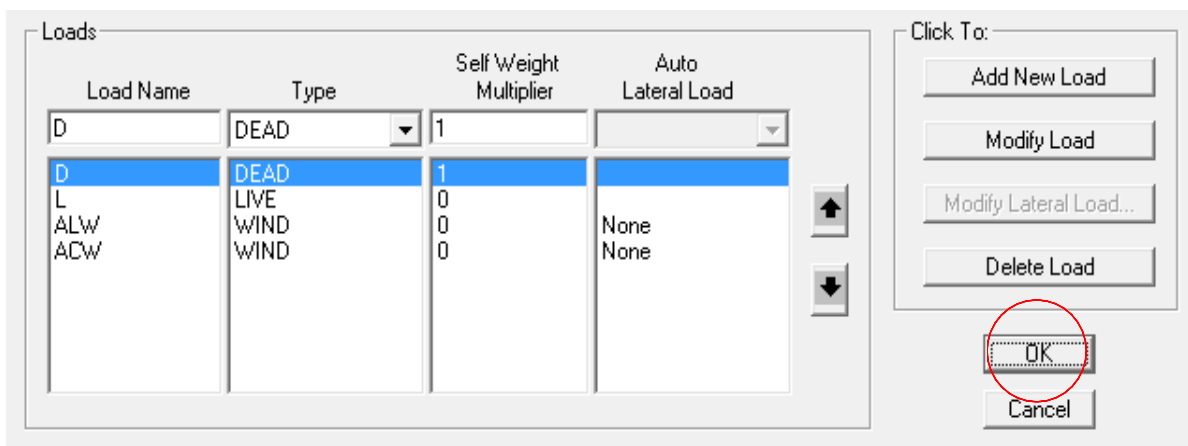
CORTE TRANSVERSAL EN EL MIRADOR



3.3 Cargas a considerar en el análisis de la estructura

Para un diseño apropiado y seguro, la chimenea debe ser analizada considerando las siguientes cargas:

- Peso propio de la estructura (carga muerta - D)
- Cargas de uso de la estructura (cargas vivas - L)
- Carga de sismo, utilizando el método de análisis modal espectral (SPX)
- Carga de viento longitudinal (ALW)
- Carga de viento transversal, analizada en el 1er y 2do modo de vibración (ACW)



Combinaciones de carga:

Las combinaciones de carga a considerar en el presente estudio serán las especificadas en el ítem 5.3.1 de la Norma ACI 307-98, de acuerdo a lo siguiente:

Considerando cargas de Sismo:

COMB1: 1.4 D

COMB2: 1.1 D + 1.3 (1.1 SPX) = 1.1 D + 1.43 SPX

COMB3: 0.9 D + 1.3 (1.1 SPX) = 0.9 D + 1.43 SPX

Debido a que la presente estructura está sometida a cargas vivas en la parte superior de la estructura (mirador), se adicionará la siguiente combinación:

COMB4: 1.4 D + 1.7 L



Considerando cargas de Viento:

COMB1: 1.4 D

COMB2: 1.1 D + 1.3 ALW

COMB3: 1.1 D + 1.2 (ALW + ACW)

COMB4: 0.9 D + 1.3 ALW

COMB5: 0.9 D + 1.2 (ALW + ACW)

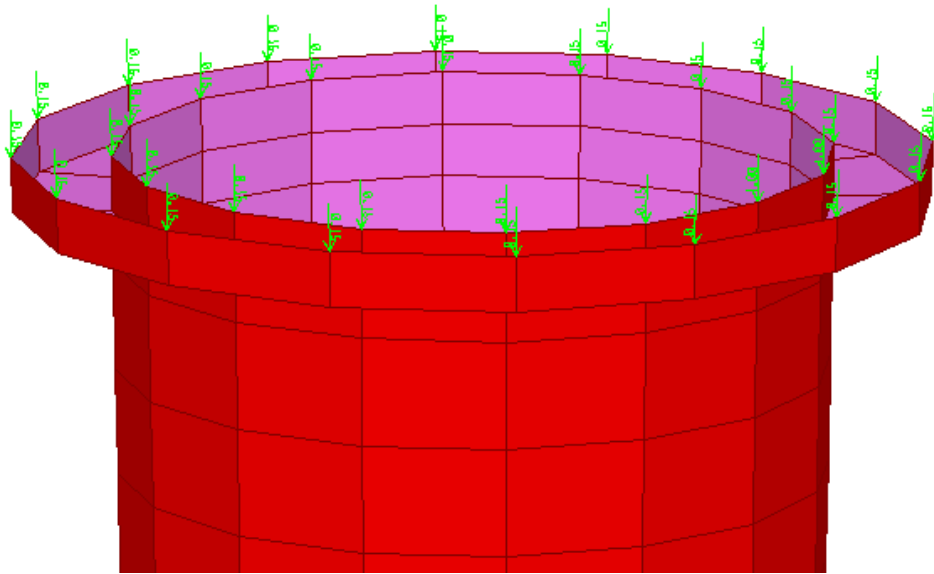
Debido a que la presente estructura está sometida a cargas vivas en la parte superior de la estructura (mirador), se adicionará la siguiente combinación:

COMB6: 1.4 D + 1.7 L

Cabe señalar que de acuerdo a las normas vigentes y tomando en cuenta lo establecido en el capítulo 9 del RNE, ítem 9.2.4, no será necesario considerar acciones de sismo y de viento simultáneamente, por lo solo que se considerará el mayor estado de carga que resulte del análisis. Así mismo no se han considerado las cargas debido a la temperatura ya que las diferencias de temperaturas en dicha estructura no son considerables, por lo que los esfuerzos obtenidos son menores en comparación con los demás estados de carga (27).

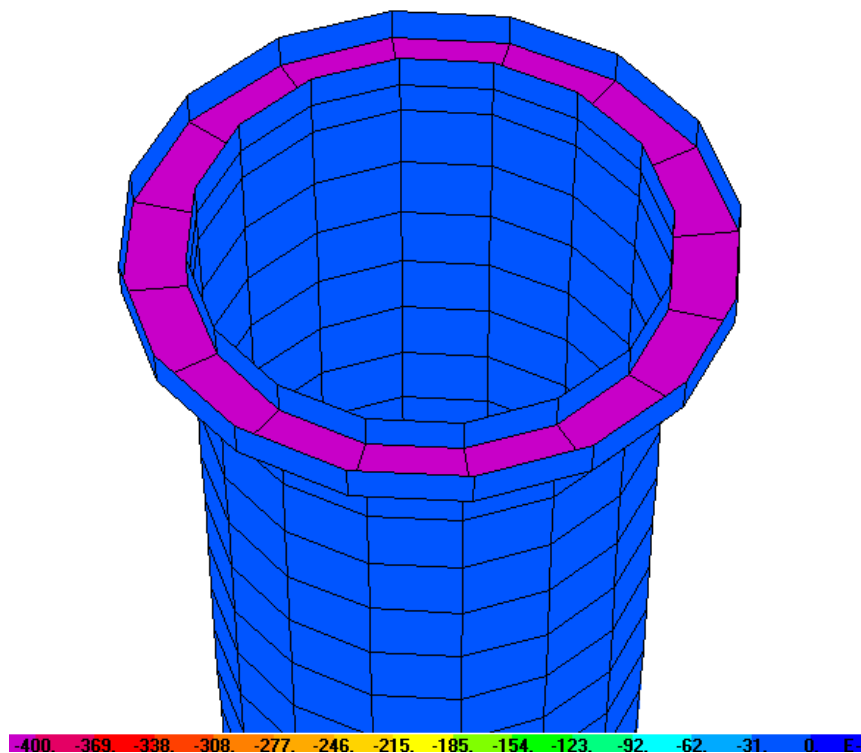
3.4 Análisis por cargas de uso

Las cargas de uso o de servicio a considerar en el modelo matemático están representadas por el peso propio de la estructura y las cargas vivas; en el presente caso se tiene un peso propio de la estructura de 9,898.90 ton, esta carga es obtenida por el programa SAP2000 únicamente consignando el número 1 en la casilla self weight multiplier del estado de carga DEAD. Se debe tener en cuenta que para el diseño de la cimentación se aumentará el peso de la cajuela de los aerogeneradores, así como el peso propio de de los aerogeneradores. Otras cargas muertas a considerar en la estructura será el peso de la cobertura traslucida en el mirador, considerada como una carga puntual de 0.15 ton aplicada en cada nudo de ambas caras de los muros superiores, también se debe adicionar el peso del ascensor que para nuestro caso se considera un peso total de 2.00 ton es decir 1.00 ton en cada nudo, estas cargas se asignan en el estado de carga DEAD, tal como se muestra a continuación:



CARGA MUERTA (DEAD)

Respecto a la carga viva a considerar en el mirador turístico y por tratarse de un pasadizo, se considerará una sobrecarga de 400 kg/m², en el estado de carga LIVE, aplicada en el elemento Shell de 0.20m de espesor de la losa del mirador.



CARGA VIVA (LIVE)



Como se puede apreciar, el color fucsia de la escala, nos indica que se ha aplicado una carga de $-400E-03 \text{ ton/m}^2$ en la losa del mirador.

3.5 Análisis por cargas de Sismo

Para el presente caso se tienen los siguientes parámetros sísmicos:

Z= 0.30	Zona N° 02 – Depto. Loreto / Provincia de Loreto / Nauta
U= 1.50	Edificación Importante
S= 1.20	Suelo intermedio, tipo S2; $T_p = 0.6 \text{ seg.}$
C= 2.5 (T_p / T); $C \leq 2.5$;	Factor de amplificación sísmica
R= 3	Según los códigos EC8-3, UBC 1997, IBC 2003

Para el análisis sísmico se utilizará el programa SAP 2000 y luego se verificarán los resultados de manera analítica. Primero se definirá el espectro teórico de la norma técnica E-030. Esta función se define utilizando el comando Define / Function / Response Spectrum / Add new function, donde se introducirán los datos que se obtienen del espectro de diseño de la norma técnica E-030, los que por facilidad se calcularán mediante una hoja de cálculo elaborada en Excel.

El espectro a utilizar será el de la Norma Técnica de edificación E-030 “Diseño Sismo Resistente”, donde:

Espectro de pseudo aceleraciones:
$$S_{a,i} = \frac{ZUSC_i}{R} g$$

Donde: $C_i = 2.5 (T_p/T_i) \leq 2.5$, es el factor de amplificación sísmica, siendo T_p el periodo fundamental del suelo y T_i el periodo de la estructura para el i ésimo modo de vibración.

Respuestas modales de manera analítica:

$$(M_i)_n = E I (\ddot{\Phi}_i)_n (FPM)_n \frac{(S_a)_n}{\omega_n^2}$$

$$(V_i)_n = E I (\ddot{\Phi}_i)_n (FPM)_n \frac{(S_a)_n}{\omega_n^2}$$



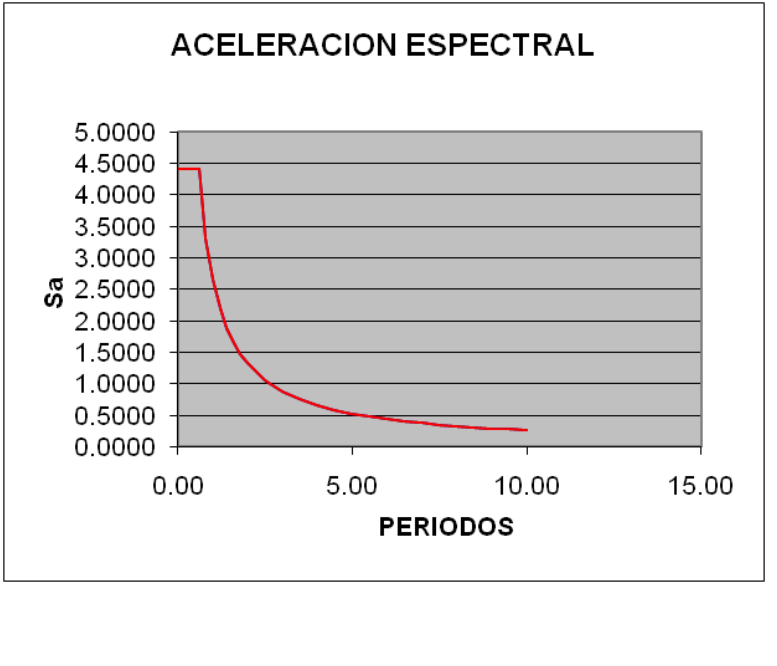
ACELERACION ESPECTRAL

Z =	0.3
U =	1.5
S =	1.2
T_p =	0.6
C =	2.5 * (T _p / T)
R =	3

FACTOR DE ZONA
 FACTOR DE USO
 FACTOR DE SUELO
 PERIODO DEL SUELO
 AMPLIFICACION SISMICA
 REDUCCION SISMICA

T	S _a
0.00	4.4145
0.60	4.4145
0.80	3.3109
1.00	2.6487
1.20	2.2073
1.40	1.8919
1.60	1.6554
1.80	1.4715
2.00	1.3244
2.50	1.0595
3.00	0.8829
3.50	0.7568
4.00	0.6622
4.50	0.5886
5.00	0.5297
5.50	0.4816
6.00	0.4415
6.50	0.4075
7.00	0.3784
7.50	0.3532
8.00	0.3311
8.50	0.3116
9.00	0.2943
9.50	0.2788
10.00	0.2649

$$S_a = \frac{ZUCS}{R} \text{ g}$$



Estos datos se introducirán en el programa SAP 2000, de acuerdo a lo siguiente:



Response Spectrum Function Definition

Function Name: Function Damping Ratio:

Define Function

Period	Acceleration
0.	4.4145
0.	4.4145
0.6	4.4145
0.8	3.3109
1.	2.6487
1.2	2.2073
1.4	1.8919
1.6	1.6554
1.8	1.4715
2.	1.3244

Add
Modify
Delete

Function Graph

Display Graph

Seguidamente se define el análisis espectral en el programa SAP2000, para lo cual se escoge el tipo de análisis en el casillero ubicado en la parte superior izquierda de la siguiente ventana (Response Spectrum), definiendo en la misma ventana el nombre del



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

estado de carga (SPX) y la función previamente establecida (E.030), así como la dirección a considerar en el análisis (U1), tal como se muestra a continuación:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	E-030	1
Accel	U1	E-030	1

Se procede a definir las masas del modelo estructural, para lo cual se utilizará el comando Define / Mass Source, y se introduce el valor de 1 para la carga muerta y 0.50 para la carga viva (D + 0.5 L), esto por tratarse de una estructura de categoría tipo A. Se debe tener en cuenta que en la definición del material concreto $f'_c=210$ kg/cm², se colocará el valor de cero para la masa.

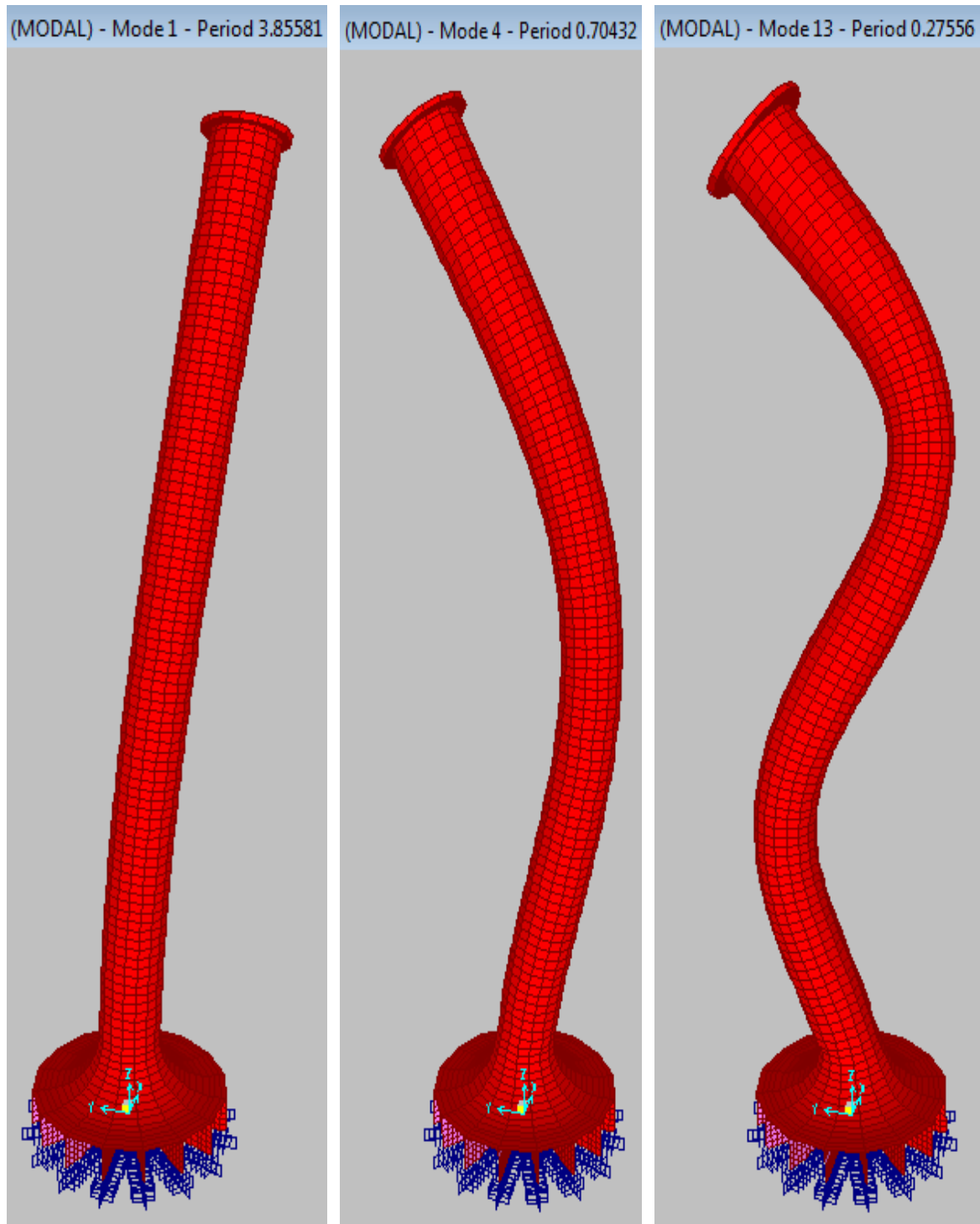
Así mismo y por contar con modos superiores que contribuyen a la respuesta, se considerarán 30 modos de vibración en el análisis modal.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Como la estructura es una estructura axisimétrica, solo se llevara a cabo el análisis en la dirección X, (U1), por lo que una vez definida la función (E-030) y el estado de carga sísmica (SPX), se procederá a correr el programa.

A continuación se muestra las frecuencias y periodos de la estructura obtenidos por el programa, graficando las 3 formas de modo más significativo:



PERIODOS Y FORMAS DE MODO OBTENIDOS POR EL SAP 2000



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

OutputCase Text	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	Frequency Cyc/sec	CircFreq rad/sec	Eigenvalue rad ² /sec ²
MODAL	Mode	1	3.855809	0.25935	1.6295	2.6554
MODAL	Mode	2	3.855803	0.25935	1.6295	2.6554
MODAL	Mode	3	0.739984	1.3514	8.491	72.097
MODAL	Mode	4	0.70432	1.4198	8.9209	79.583
MODAL	Mode	5	0.704308	1.4198	8.9211	79.586
MODAL	Mode	6	0.444901	2.2477	14.123	199.45
MODAL	Mode	7	0.4449	2.2477	14.123	199.45
MODAL	Mode	8	0.376564	2.6556	16.686	278.41
MODAL	Mode	9	0.376563	2.6556	16.686	278.41
MODAL	Mode	10	0.304237	3.2869	20.652	426.52
MODAL	Mode	11	0.304235	3.2869	20.652	426.52
MODAL	Mode	12	0.292307	3.4211	21.495	462.04
MODAL	Mode	13	0.275559	3.629	22.802	519.91
MODAL	Mode	14	0.275546	3.6292	22.803	519.96
MODAL	Mode	15	0.239628	4.1731	26.221	687.52
MODAL	Mode	16	0.229487	4.3575	27.379	749.62
MODAL	Mode	17	0.229478	4.3577	27.38	749.68
MODAL	Mode	18	0.174372	5.7349	36.033	1298.4
MODAL	Mode	19	0.174344	5.7358	36.039	1298.8
MODAL	Mode	20	0.172976	5.7811	36.324	1319.4
MODAL	Mode	21	0.172976	5.7812	36.324	1319.4
MODAL	Mode	22	0.157321	6.3564	39.939	1595.1
MODAL	Mode	23	0.157321	6.3564	39.939	1595.1
MODAL	Mode	24	0.15432	6.4801	40.715	1657.7
MODAL	Mode	25	0.154306	6.4806	40.719	1658
MODAL	Mode	26	0.145971	6.8507	43.044	1852.8
MODAL	Mode	27	0.14597	6.8507	43.044	1852.8
MODAL	Mode	28	0.138007	7.246	45.528	2072.8
MODAL	Mode	29	0.137946	7.2492	45.548	2074.6
MODAL	Mode	30	0.137418	7.277	45.723	2090.6

Control de Distorsiones:

El máximo desplazamiento lateral se presenta en la parte superior de la estructura, siendo este valor igual a $X = 0.4158\text{m}$, es decir $X = 41.58\text{cm}$

Según los criterios de desplazamiento máximo permitido por el ACI 307-98, se tiene que:

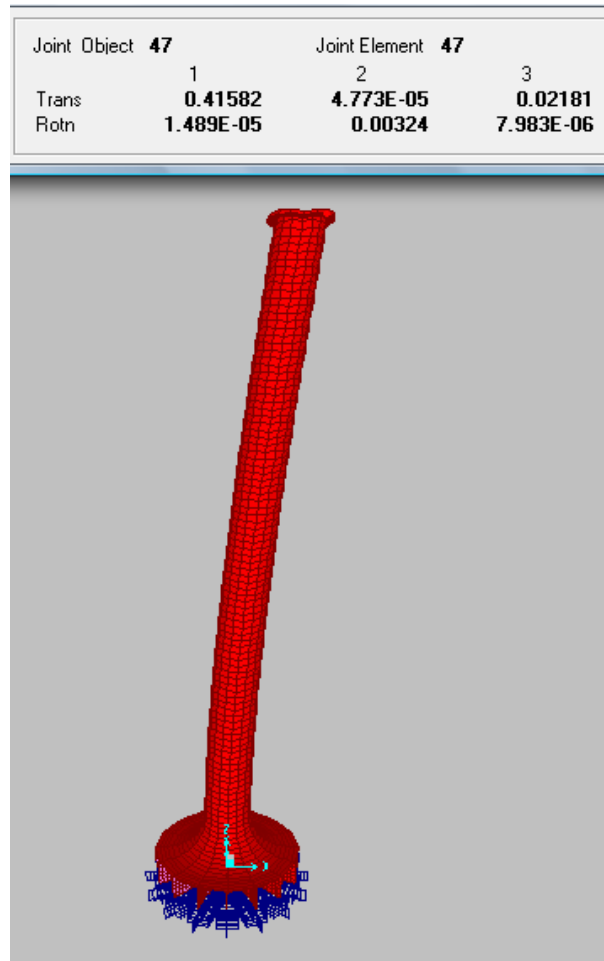
$$X_{\text{máx.}} = 3.33 h,$$

Donde h es la altura de la chimenea en (m) e X (mm).

Para $h=199.85\text{m.}$, resulta: $X_{\text{máx.}} = 665.5\text{mm.} = 66.55\text{cm.} \geq X = 41.58\text{cm}$ ¡**CONFORME!**



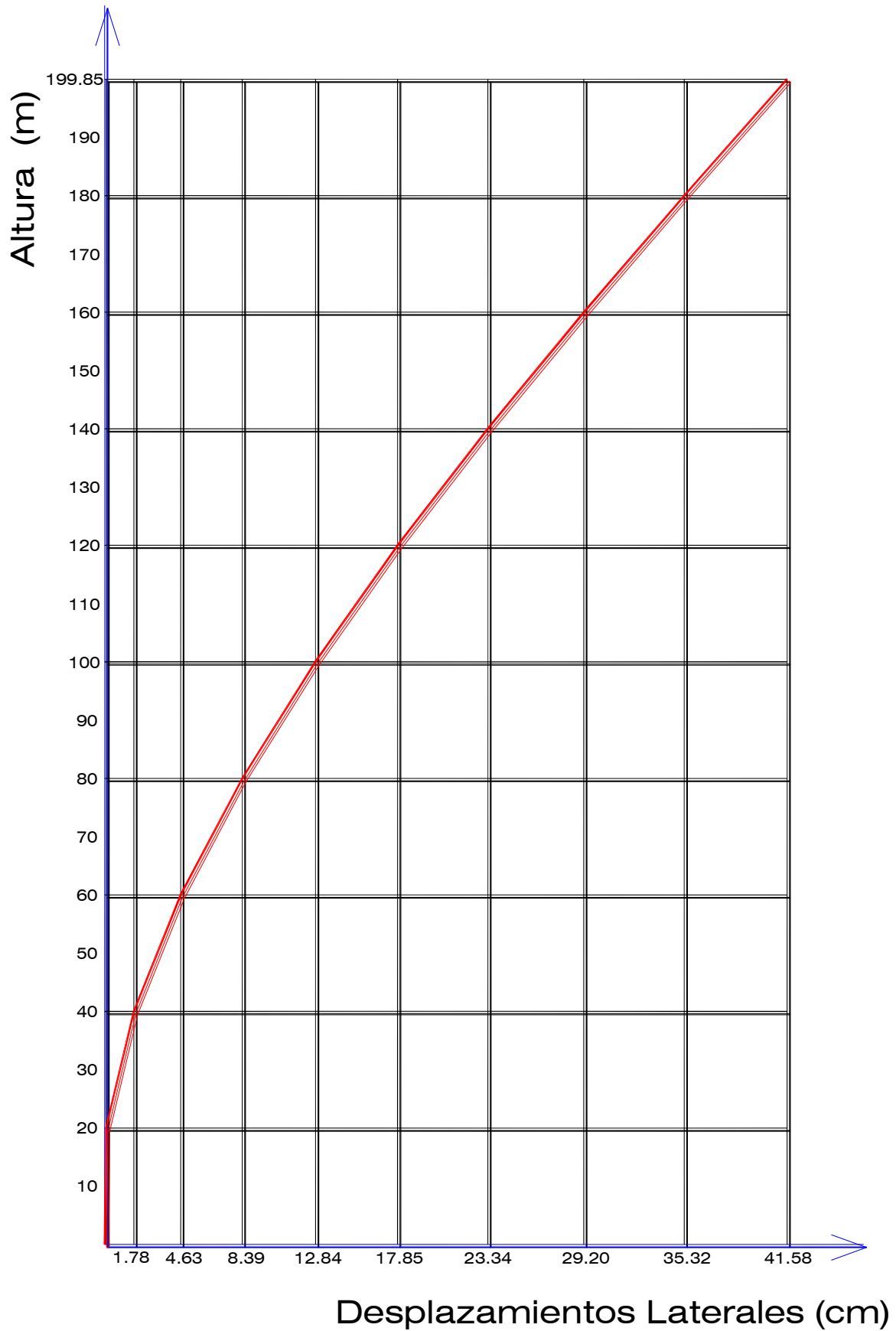
TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



Es preciso señalar que también se han tomado en cuenta las distorsiones máximas permisibles establecidas en la Norma de Diseño Sismo Resistente (E-030) del Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, en la cual se indica que para estructuras de concreto armado, se debe cumplir que: $(\Delta_i / h_{ei}) * 0.75 * R \leq 0.007$,

De acuerdo al siguiente grafico de desplazamientos, la presente estructura cumple en cada tramo evaluado, con las distorsiones máximas permisibles para estructuras de concreto armado (E-030), siendo el caso que la máxima distorsión encontrada se ubica en el tramo superior de la estructura, y es igual a:

$$[(0.4158 - 0.3532) / (199.85 - 180)] * 0.75 * 3 = 0.007 = 0.007, \quad \text{¡CONFORME!}$$





Cortante y Momento en la base debido al sismo:

Utilizando el comando: Display / Show Tables / Analysis Results / Structure Output / Base Reactions, se obtiene la fuerza cortante y el momento en la base de la torre:

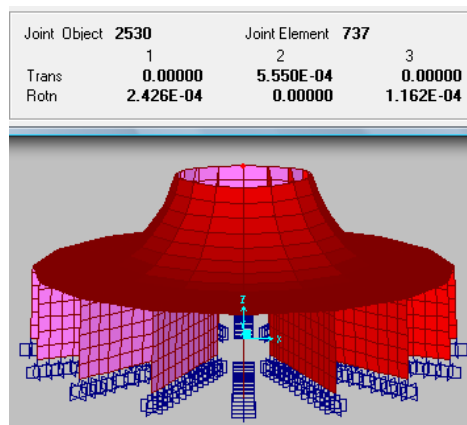
Units: As Noted				Base Reactions					
	OutputCase Text	CaseType Text	StepType Text	GlobalFX Ton	GlobalFY Ton	GlobalFZ Ton	GlobalMX Ton-m	GlobalMY Ton-m	GlobalMZ Ton-m
▶	SFX	LinRespSpec	Max	683.5889	0.0623	0.1527	2.00882	49815.73155	35.48976

Cortante Estático: $V = (ZUSC / R) P = (0.3 \times 1.5 \times 1.2 \times 0.389 / 3) 9,898.90 = 693.12 \text{ ton}$

Se verifica que: $C = 0.389 < 2.5$, $C/R = 0.129 > 0.125$ y $V \text{ dinámico} > 0.80 V \text{ estático}$

Verificación de los resultados analíticamente:

A continuación se desarrollará analíticamente el problema, esto se llevará a cabo mediante un modelo matemático equivalente, utilizando el programa en Excel mencionado anteriormente. Debido a que la estructura presenta una gran rigidez en la parte inferior, se verificará la altura en cual los desplazamientos de la estructura sean muy pequeños, esto ocurre a los 17.60m de altura, justo donde empieza la chimenea, por lo que se modelará la estructura como una chimenea de 182.25m de altura; así mismo, como la sección de las paredes de la chimenea es variable (de 0.25 m. a 0.40m.) se tomará el promedio de espesores, es decir $e=0.325\text{m}$ como espesor único de las paredes, de tal manera de poder conseguir el modelo equivalente de chimenea circular de sección constante, la cual si se puede analizar analíticamente.

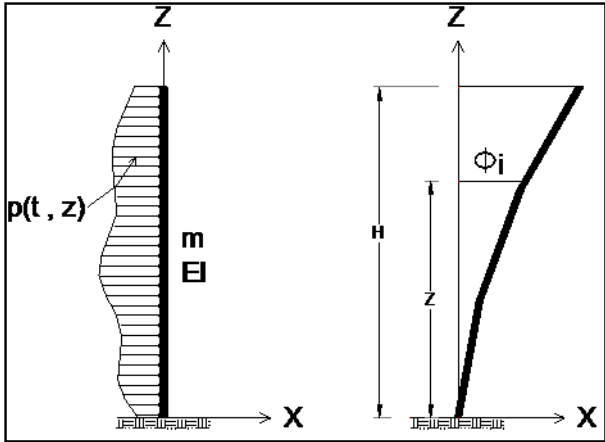


DESPLAZAMIENTOS A 17.60m DE ALTURA



CHIMENEAS DE SECCION CONSTANTE

$f'_c =$	210.00	kg/cm²
$E =$	2,173,707	ton/m²
$H =$	182.25	m
$R =$	7.46	m
$r =$	7.14	m
$I =$	397.39	m⁴
$m =$	3.65	ton-seg²/m²
RAIZ (EI/m) =	15,390.22	



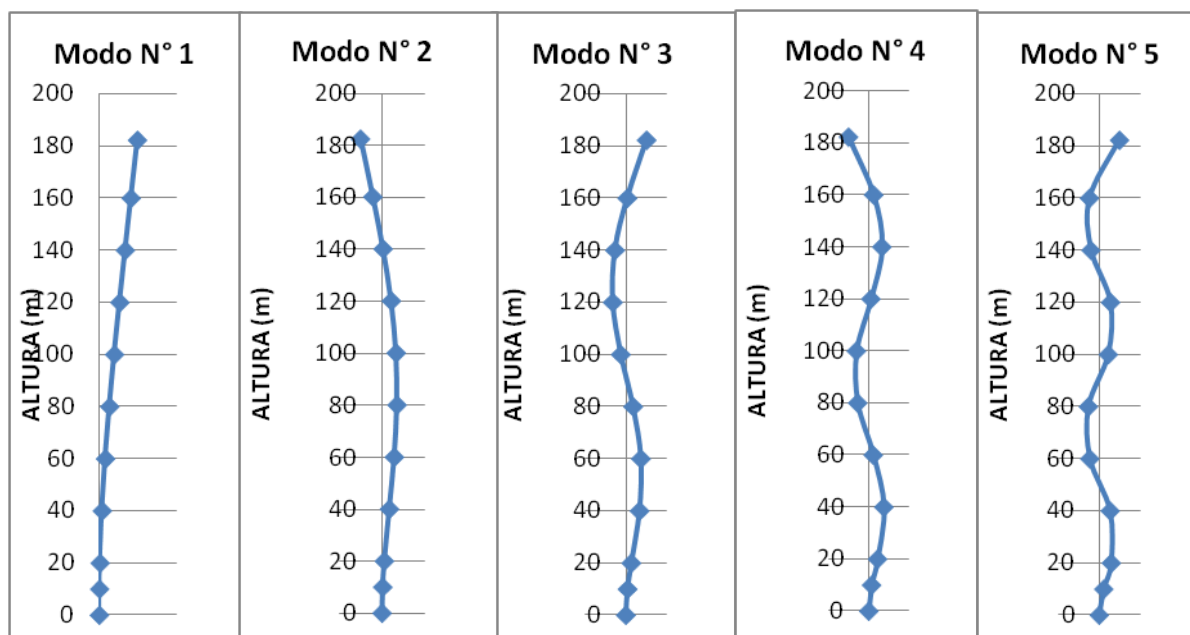
$\Phi_n(x) = \beta_n * [(A/B)_n * (\text{SENH}(a_n Z) - \text{SEN}(a_n Z)) + \text{COSH}(a_n Z) - \text{COS}(a_n Z)]$

n	1	2	3	4	5
Ψ_n	1.875	4.712	7.854	10.996	14.137
a_n	0.010	0.026	0.043	0.060	0.078
ω_n	1.630	10.289	28.582	56.020	92.605
T	3.855	0.611	0.220	0.112	0.068
$(A/B)_n$	-0.734	-1.018	-0.999	-1.000	-1.000
β_n	0.500	0.491	0.501	0.500	0.500

Z (m)	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5
182.25	1.000	-1.000	1.000	-1.000	1.000
160	0.832	-0.428	0.070	0.243	-0.482
140	0.682	0.050	-0.527	0.655	-0.409
120	0.536	0.431	-0.633	0.109	0.559
100	0.397	0.658	-0.243	-0.610	0.450
80	0.271	0.700	0.349	-0.551	-0.536
60	0.162	0.574	0.729	0.227	-0.465
40	0.076	0.342	0.661	0.751	0.541
20	0.020	0.108	0.266	0.439	0.596
10	0.005	0.030	0.080	0.145	0.223
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



T =	3.855	0.611	0.22	0.112	0.068	Seg
f =	0.259	1.638	4.55	8.92	14.74	Hertz

Como se puede observar el periodo fundamental obtenido por ambos métodos son idénticos, siendo el caso que para la evaluación de momentos y cortantes de manera analítica, solo se consideraran los cinco primeros modos de vibración por ser los más significativos.

PARAMETROS SISMICOS			
Z =	0.30	Ci =	2.5 (Tp / Ti)
U =	1.50	R =	3.00
S =	1.20	Tp =	0.60

n	1	2	3	4	5
FPMi	1.470	0.532	0.602	0.136	0.474
Ci	0.39	2.46	2.50	2.50	2.50
Sai	0.69	4.34	4.41	4.41	4.41

$$\Phi_n(x) = \beta_n * a_n^2 [(A/B)_n * (\text{SENH}(a_n Z) + \text{SEN}(a_n Z)) + \text{COSH}(a_n Z) + \text{COS}(a_n Z)]$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Z (m)	$\ddot{\Phi}_1$	$\ddot{\Phi}_2$	$\ddot{\Phi}_3$	$\ddot{\Phi}_4$	$\ddot{\Phi}_5$
180.2	0.0000000	-0.0000003	0.0000072	-0.0000267	0.0000720
160	0.0000026	-0.0000825	0.0005841	-0.0018360	0.0039729
140	0.0000089	-0.0002417	0.0012829	-0.0026681	0.0026873
120	0.0000183	-0.0003935	0.0013132	-0.0004801	-0.0033132
100	0.0000301	-0.0004704	0.0005292	0.0022053	-0.0026968
80	0.0000437	-0.0004325	-0.0005657	0.0020264	0.0032398
60	0.0000585	-0.0002719	-0.0012049	-0.0007303	0.0028574
40	0.0000740	-0.0000103	-0.0008918	-0.0024071	-0.0029878
20	0.0000899	0.0003124	0.0002934	-0.0005081	-0.0023120
10	0.0000979	0.0004837	0.0010609	0.0014615	0.0014263
0	0.0001058	0.0006564	0.0018590	0.0036400	0.0060171

$$(M_i)_n = E I (\ddot{\Phi}_i)_n FPM_n \frac{S a_n}{W_n^2}$$

MOMENTOS FLECTORES (ton-m)						
Z (m)	M1	M2	M3	M4	M5	Mz (ton-m)
180.2	7.77	-5.39	20.13	-4.40	15.19	40.08
160	860.51	-1,554.30	1,641.79	-302.79	837.42	3,887.27
140	2,936.28	-4,552.21	3,605.88	-440.02	566.44	9,323.84
120	6,016.56	-7,409.71	3,691.07	-79.17	-698.36	14,076.30
100	9,886.80	-8,858.89	1,487.51	363.70	-568.44	17,270.29
80	14,343.49	-8,144.93	-1,589.94	334.19	682.90	20,842.02
60	19,200.98	-5,120.72	-3,386.60	-120.44	602.30	24,299.49
40	24,299.50	-194.07	-2,506.63	-396.99	-629.77	26,233.76
20	29,513.72	5,883.69	824.62	-83.79	-487.33	33,451.49
10	32,136.73	9,108.09	2,982.00	241.03	300.65	39,153.03
0	34,761.94	12,361.08	5,225.15	600.32	1268.32	45,752.84

...

$$\Phi_n(x) = \beta_n * a_n^3 [(A/B)_n * (\text{COSH}(a_n Z) + \text{COS}(a_n Z)) + \text{SENH}(a_n Z) - \text{SEN}(a_n Z)]$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Z (m)
	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5
180.2	0.0000000	0.0000006	-0.0000068	0.0000255	-0.0000683
160	-0.0000002	0.0000068	-0.0000405	0.0001031	-0.0001530
140	-0.0000004	0.0000084	-0.0000225	-0.0000384	0.0002716
120	-0.0000005	0.0000062	0.0000207	-0.0001557	0.0002065
100	-0.0000006	0.0000012	0.0000532	-0.0000803	-0.0002546
80	-0.0000007	-0.0000050	0.0000494	0.0000955	-0.0002150
60	-0.0000008	-0.0000108	0.0000100	0.0001450	0.0002443
40	-0.0000008	-0.0000150	-0.0000405	-0.0000010	0.0002137
20	-0.0000008	-0.0000169	-0.0000733	-0.0001746	-0.0002873
10	-0.0000008	-0.0000172	-0.0000791	-0.0002128	-0.0004375
0	-0.0000008	-0.0000173	-0.0000801	-0.0002196	-0.0004667

$$(V_i)_n = E I (\ddot{\Phi}_i)_n FPM_n \frac{S a_n}{W_n^2}$$

FUERZAS CORTANTES (ton)						
Z (m)	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V _z (ton)
180.2	-7.52	10.95	-19.17	4.20	-14.40	41.99
160	-75.02	127.69	-113.77	17.01	-32.24	278.00
140	-130.72	158.66	-63.22	-6.33	57.25	319.41
120	-175.52	116.36	58.15	-25.67	43.54	321.73
100	-209.81	22.18	149.42	-13.24	-53.66	356.34
80	-234.31	-94.76	138.98	15.74	-45.31	410.75
60	-250.10	-204.08	28.24	23.92	51.50	443.41
40	-258.70	-282.03	-113.96	-0.16	45.04	550.87
20	-262.04	-319.12	-206.13	-28.79	-60.56	671.50
10	-262.47	-324.66	-222.32	-35.09	-92.21	709.96
0	-262.54	-325.52	-225.00	-36.22	-98.38	716.99

Los resultados obtenidos por ambos métodos son muy aproximados, observando que el momento en la base del modelo equivalente es un poco menor al obtenido en el modelo de elementos finitos del SAP2000, esto debido a la diferencia de alturas en ambos modelos, pero en general permite asegurar que los resultados son confiables.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

RESULTADOS OBTENIDOS	MODELO EQUIVALENTE	SAP 2000
PERIODO FUNDAMENTAL (seg)	3.855	3.856
CORTANTE EN LA BASE (ton)	716.99	683.59
MOMENTO EN LA BASE (ton-m)	45,752.84	49,815.73

Efectos de segundo orden (P- Delta)

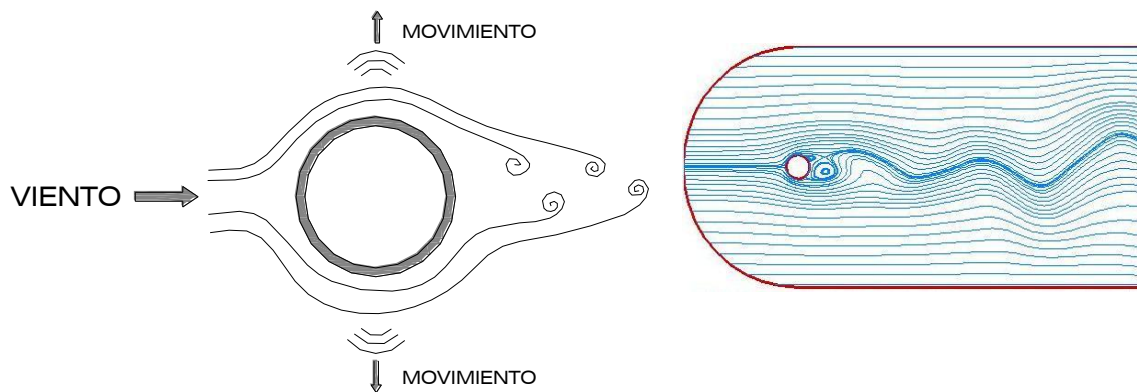
Los efectos de segundo orden son considerados solo cuando se produzca un incremento de más de 10% en las fuerzas internas, en el presente caso se tiene una estructura con una rigidez lateral ($KL = 683.59 / 0.4158 = 1,644.04 \text{ ton/m}$) mucho mayor a la relación del peso total de la estructura con la altura ($9,898.90 / 200 = 49.50 \text{ ton/m}$), por lo que los efectos de segundo orden son insignificantes. Esto se puede verificar fácilmente en el SAP 2000, creando un nuevo caso de análisis (P – Delta), en este caso estático no lineal, para lo cual se debe definir previamente un nuevo estado de carga (Lateral) en el modelo matemático, considerando una carga estática lateral, luego se procede a verificar los efectos de segundo orden (P – Delta) para la combinación de carga (D + Lateral). Se puede observar del análisis de los resultados entre (Lateral VS. P- Delta), que los resultados se incrementan muy ligeramente en el orden del 2%, por lo que los efectos de segundo orden no deben ser considerados en el presente modelo matemático.

3.6 Análisis por cargas de viento (23, 27, 28)

El efecto del viento en estructuras altas tipo chimenea, se dividen en dos componentes, conocidos como:

- Carga de viento longitudinal;
- Carga de viento transversal.

La carga de viento longitudinal, es causado por el componente de fricción del viento contra la chimenea, mientras que la carga transversal son causados por el correspondiente componente de levante, este último es acompañado por la ráfaga que golpea causando una reacción dinámica en la dirección del flujo, la carga transversal del viento es asociado con el fenómeno del “Vórtice de Shedding” que causa una oscilación de la chimenea en la dirección perpendicular a la dirección del flujo del viento.



Carga de viento longitudinal:

El efecto de la carga de viento longitudinal es debido a la acción directa del embate, cuando el viento actúa en la cara de una estructura. Con el fin de la valoración de estas cargas, la chimenea se modela como voladizo fijo en la tierra. El viento entonces se modela para actuar en la cara expuesta de la chimenea que causa momentos predominantes en la chimenea. Las complicaciones adicionales se presentan del hecho de que el viento no sopla generalmente a una velocidad fija. El viento sopla generalmente como ráfagas. Esto requiere que las cargas correspondientes, y por lo tanto la respuesta estén tomadas como dinámicas. La evaluación verdadera de las cargas del viento longitudinal implica modelar la chimenea como cuerpo que tiene flujo de viento turbulento. Sin embargo, el rigor matemático implicado en tal análisis no es aceptable por los ingenieros en la práctica, por lo tanto la mayoría de los códigos utilizan un procedimiento estático equivalente, conocido como el método del factor de la ráfaga (gust factor). Este método es muy popular y se especifica actualmente en la mayoría de códigos técnicos de edificación. Este proceso implica la determinación de la presión de viento que actúa en la chimenea debido a la referida cara de la chimenea, una carga de viento estática. Esto entonces se amplifica usando el factor de la ráfaga para tomar el cuidado de los efectos dinámicos.

Este estudio implica la evaluación de las cargas del viento longitudinal usando los métodos especificados en un número de códigos como:

- CICIND (Comité Internacional de la industria de Chimeneas)
- ACI 307-98 (Instituto Americano del concreto)
- IS 4998 (parte 1): 1992 (Código de la India sobre chimeneas de concreto armado)

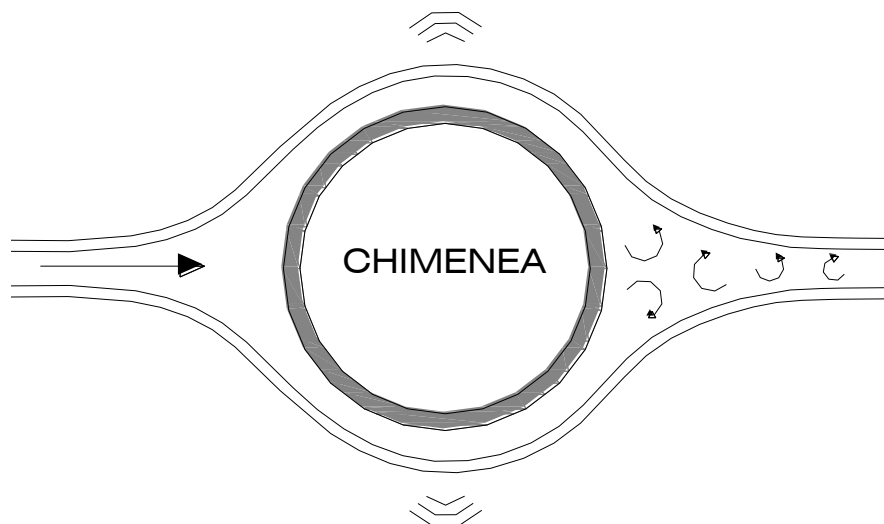


Carga de viento transversal:

Las recomendaciones para considerar las cargas del viento transversal se han incluido en los códigos recientemente. A pesar de la considerable investigación el problema de predecir la respuesta del viento transversal tiene que ser completamente resuelto. Por lo tanto el código de CICIND no considera los vientos transversales. Para este estudio los códigos usados por lo tanto son IS 4998 (la parte 1): 1992 y el ACI 307-98.

Un cuerpo alto como la chimenea es esencialmente un cuerpo no fuselado es decir un cuerpo que tiene el frente ancho, en comparación con las líneas aerodinámicas. El cuerpo aerodinámico hace que el flujo del viento vaya suavemente más allá de él y por lo tanto no se expone a ningunas fuerzas adicionales. Mientras que el cuerpo no fuselado causa que el viento se separe del cuerpo. Este flujo separado causa altas regiones negativas en la región de estela detrás de la chimenea. La región de la estela es una región altamente turbulenta que da lugar a los remolinos de alta velocidad llamados los vórtices. Estos vórtices discretos se vierten alternativamente y dan lugar a las fuerzas de elevación que actúan en la dirección perpendicular de viento.

Estas fuerzas de elevación hacen que la chimenea oscile en la dirección perpendicular a la dirección del flujo del viento.





TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Vórtice de Shedding:

El fenómeno de los vórtices que se genera en la región de la estela, se llaman vórtice de Shedding. Este es el fenómeno que da lugar a las fuerzas transversales del viento.

Este fenómeno fue divulgado por Strouhal, que demostró que el vórtice de Shedding de un cilindro circular en un flujo laminar es descriptible en términos al número no dimensional Sn llamado el número de Strouhal.

El fenómeno del vórtice de Shedding y por ende las cargas de viento transversal, dependen de diversos factores incluyendo la velocidad del viento, de la forma cónica, etc. que son especificados por los códigos. La valoración de las cargas del viento transversal también implica la valoración de la las formas de modo de la chimenea en varios modos de vibración.

Para el presente proyecto se utilizará el código ACI 307-98 “DESIGN AND CONSTRUCTION OF REINFORCED CONCRETE CHIMNEYS”, el cual se adjunta en los anexos.

Para una mejor ilustración de los cálculos en la determinación de las fuerzas del viento longitudinal y transversal, se ha desarrollado una hoja de cálculo que permite automáticamente obtener los resultados de acuerdo al ACI 307-98.

Determinación de las fuerzas de viento:

A continuación se desarrollará la metodología establecida en la Norma de Diseño y Construcción de Chimeneas de Concreto (ACI-307-98), para determinar las fuerzas de viento, los que serán comparados con la fuerza de viento establecida en el Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú (RNE – 2009).

A efectos de facilitar los cálculos, se ha desarrollado una hoja de cálculo en Excel para poder determinar las fuerzas de viento, los que serán graficados y comparados (La metodología completa del ACI 307-98 se encuentra en los anexos). Una vez definida las cargas de viento se procederá a introducir los datos en nuestro modelo matemático de elementos finitos desarrollado en el programa SAP 2000.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

CALCULO DE LA VELOCIDAD Y FUERZA DEL VIENTO EN LA ALTURA

ACI 307-98

H. chimenea	200.00	m.		$V_z = 0.2784 V_r (Z/10)^{0.154} (0.65)$
D chimenea	14.93	m.		
V. viento =	100.00	km/h		$P_z = 0.67 (V_z)^2$
d(z) =	14.93	m.		
d(h) =	14.85	m.		$G_w' = 0.30 + (19.227 (T_1 V(10))^{0.47} / (3.2808h+16)^{0.86})$
Cdr(z) =	0.65	Z <	177.73	h-1.5 d(h)
Cdr(z) =	1.00	Z ≥	177.73	h-1.5 d(h)
Mwb =	106,153,720	N-m		$\hat{W}(z) = Cdr(z) d(z) P(z) / g$
T1 =	3.82	seg.		
Gw' =	1.46			$W'(z) = (3 Z G_w' M_w(b) / (h)^3) / g$

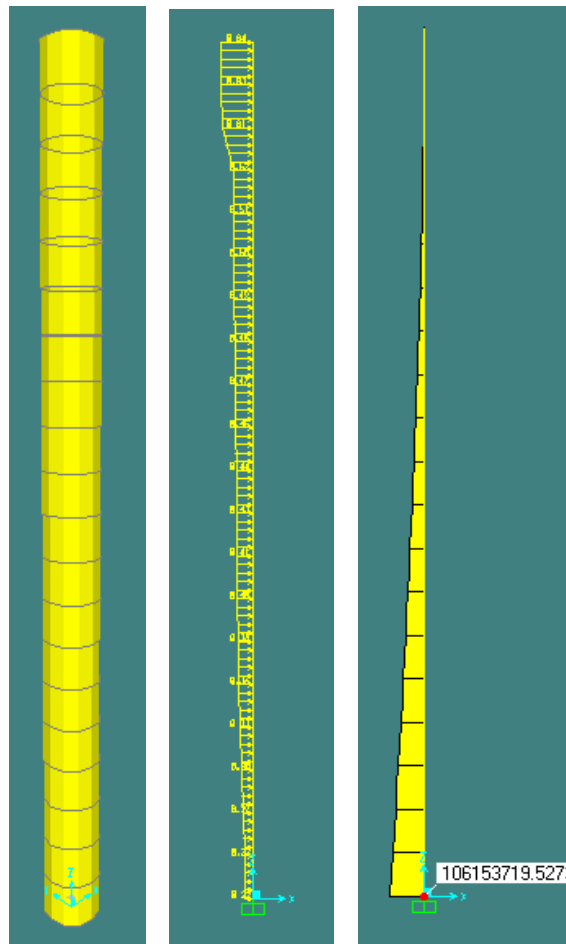
Z (m)	Vz (m/s)	P(z) (Pa)	Ŵ(z) (Kgf/m)	W'(z) (kgf/m)	W (z) (kgf/m)	W (z) (kgf/m ²)
10	18.10	219.40	217.04	59.40	276.44	18.52
20	20.13	271.62	268.70	118.79	387.49	25.95
30	21.43	307.75	304.44	178.19	482.63	32.33
40	22.40	336.26	332.64	237.59	570.23	38.19
50	23.19	360.18	356.31	296.98	653.29	43.76
60	23.85	380.99	376.89	356.38	733.27	49.11
70	24.42	399.51	395.22	415.78	810.99	54.32
80	24.93	416.29	411.81	475.17	886.98	59.41
90	25.38	431.66	427.02	534.57	961.59	64.41
100	25.80	445.90	441.11	593.96	1,035.07	69.33
110	26.18	459.19	454.25	653.36	1,107.61	74.19
120	26.53	471.66	466.59	712.76	1,179.34	78.99
130	26.86	483.43	478.23	772.15	1,250.39	83.75
140	27.17	494.59	489.27	831.55	1,320.82	88.47
150	27.46	505.21	499.78	890.95	1,390.73	93.15
160	27.73	515.36	509.82	950.34	1,460.16	97.80
170	27.99	525.07	519.42	1,009.74	1,529.16	102.42
180	28.24	534.40	813.31	1,069.14	1,882.44	126.08
190	28.48	543.37	826.96	1,128.53	1,955.50	130.98
200	28.70	552.02	840.13	1,187.93	2,028.06	135.84



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Donde M_{wb} es el momento en la base de la chimenea debido a la carga $\hat{W}(z)$. Para determinar este valor, se ha utilizado la ayuda del programa SAP 2000, utilizando en esta oportunidad elementos tipo frame, para modelar la estructura y de esa manera determinar el valor de $M_{wb} = 106,153,720$ N-m.

Se debe tener en cuenta que este procedimiento es aproximado ya que se ha asumido una sección constante de la chimenea $d(h)$, resultante del promedio de diámetros superior e inferior de la chimenea, cabe señalar que este modelo de sección constante es más conservador que nuestro modelo matemático, que tiene un diámetro mucho mayor en la base, por lo que los resultados de los momentos obtenidos con el modelo tipo frame son mayores, pero para la determinación de las fuerzas de viento resulta razonable asumir este valor.

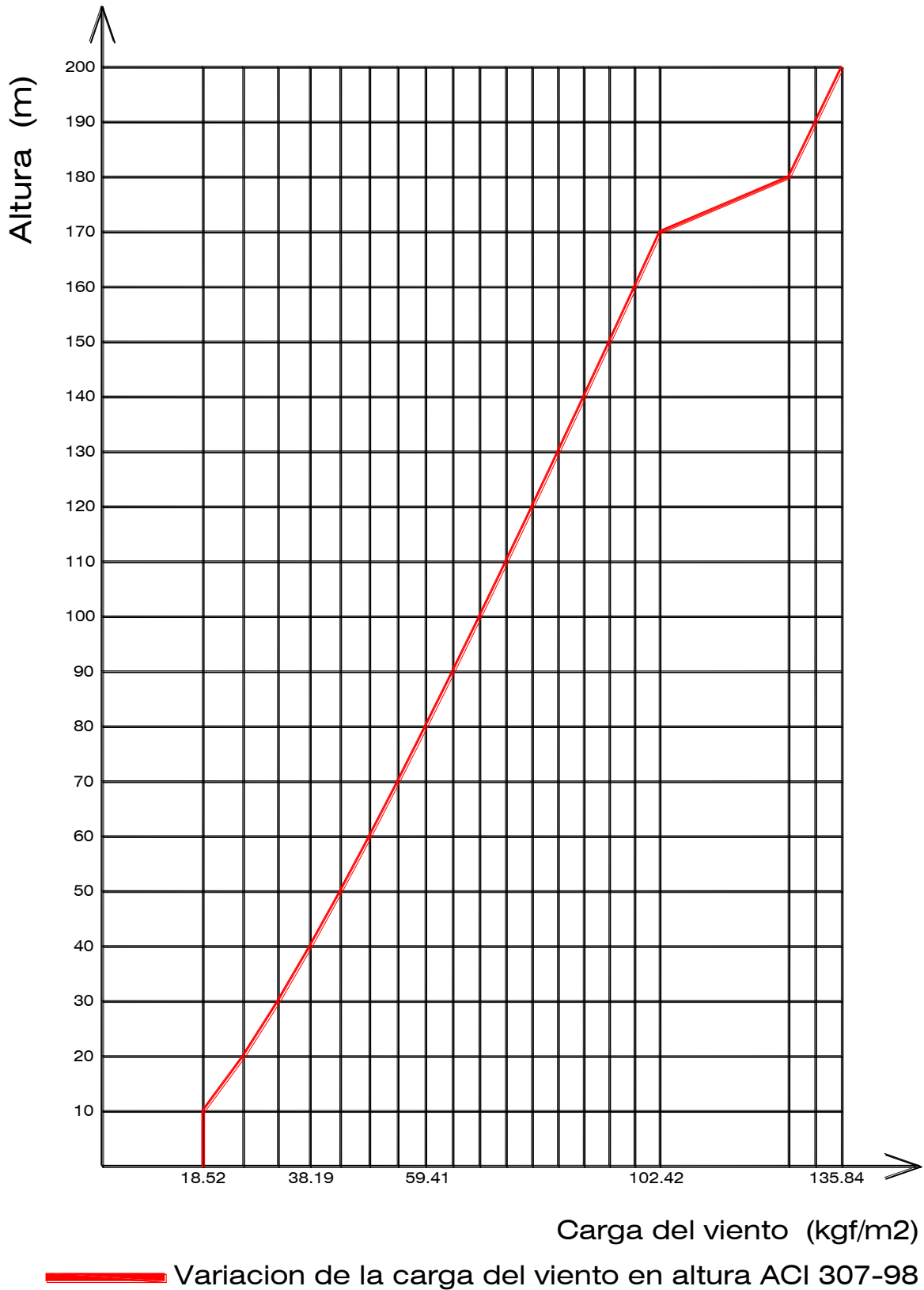


M3-3 N, m, C

Momento en la Base: $M_{wb} = 106,153,720$ N-m



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas





CALCULO DE LA VELOCIDAD Y FUERZA DEL VIENTO EN LA ALTURA

Reglamento Nacional de Edificaciones RNE-2009 (NTE-020)

H. chimenea = 200.00 m
 D chimenea = 14.93 m
 V. viento = 100.00 km/h
 C = 0.70

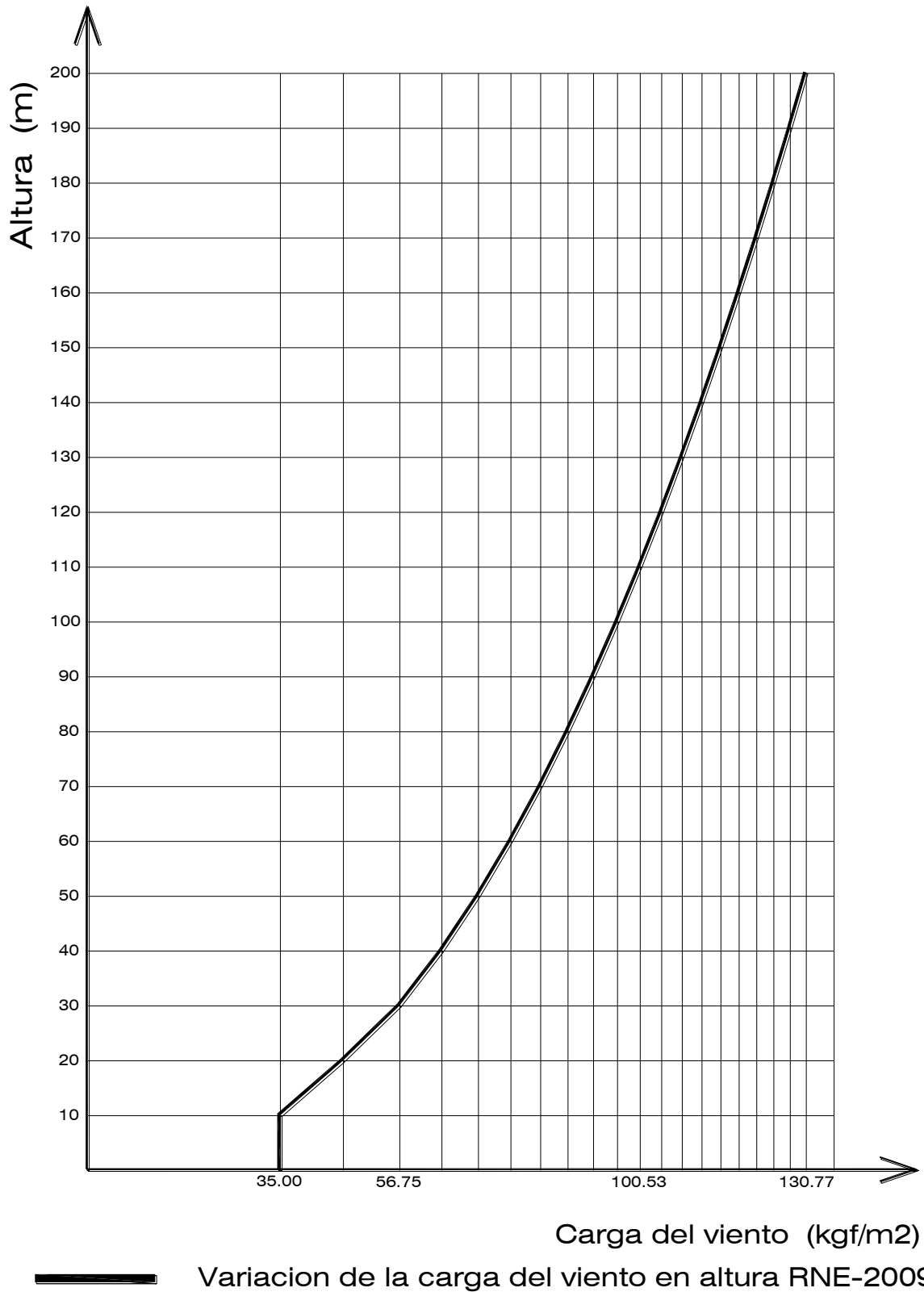
$$V_h = V (H/10)^{0.22}$$

$$P_h = 0.005 C V_h^2$$

h (m)	V _h (Km/h)	P _h (Kgf/m ²)	W (ton/m ²)
10	100.00	35.00	0.035
20	116.47	47.48	0.047
30	127.34	56.75	0.057
40	135.66	64.41	0.064
50	142.49	71.06	0.071
60	148.32	76.99	0.077
70	153.43	82.40	0.082
80	158.01	87.38	0.087
90	162.16	92.03	0.092
100	165.96	96.40	0.096
110	169.48	100.53	0.101
120	172.75	104.45	0.104
130	175.82	108.19	0.108
140	178.71	111.78	0.112
150	181.44	115.23	0.115
160	184.04	118.54	0.119
170	186.51	121.75	0.122
180	188.87	124.85	0.125
190	191.13	127.86	0.128
200	193.30	130.77	0.131

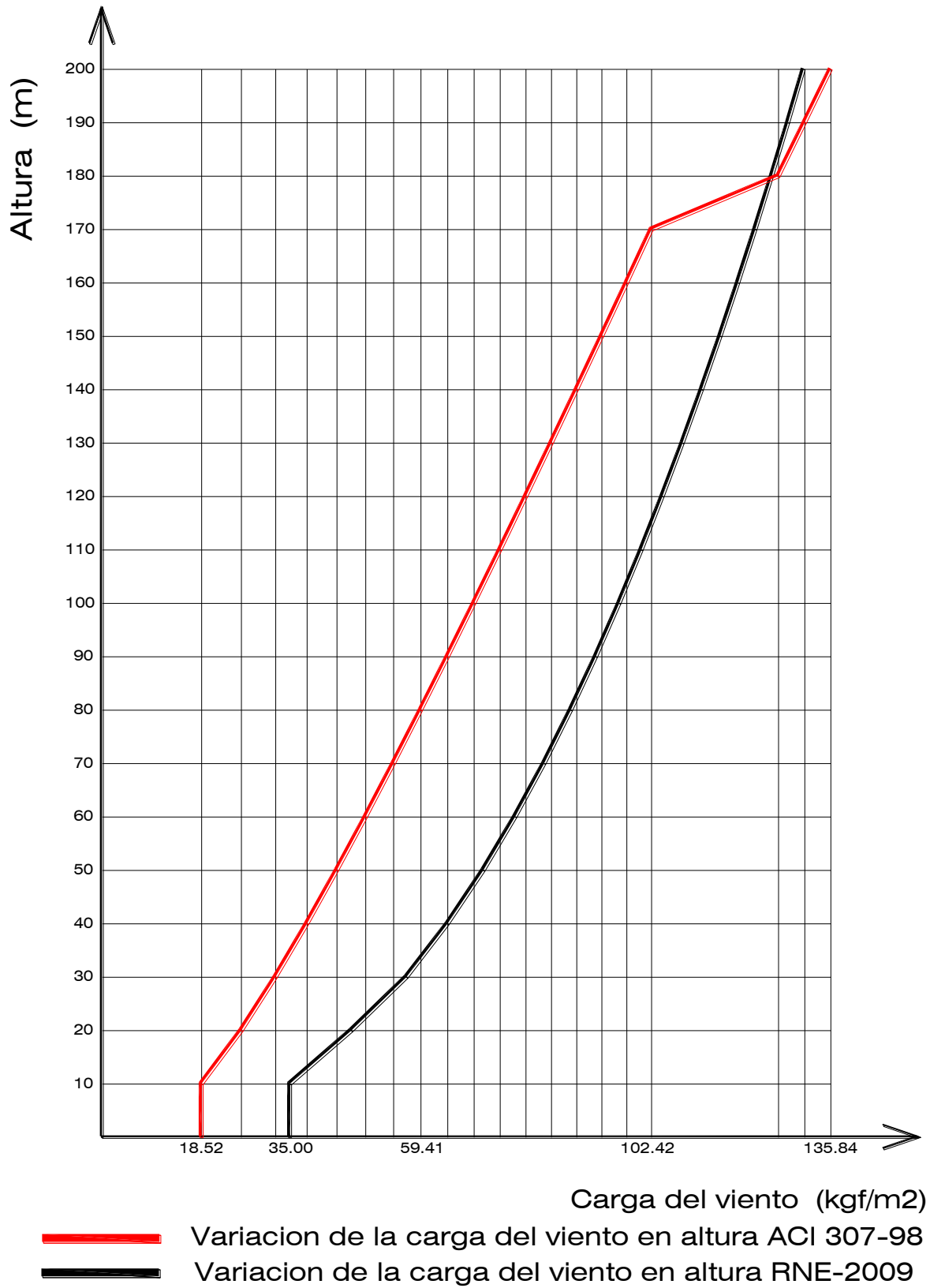


TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas





TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

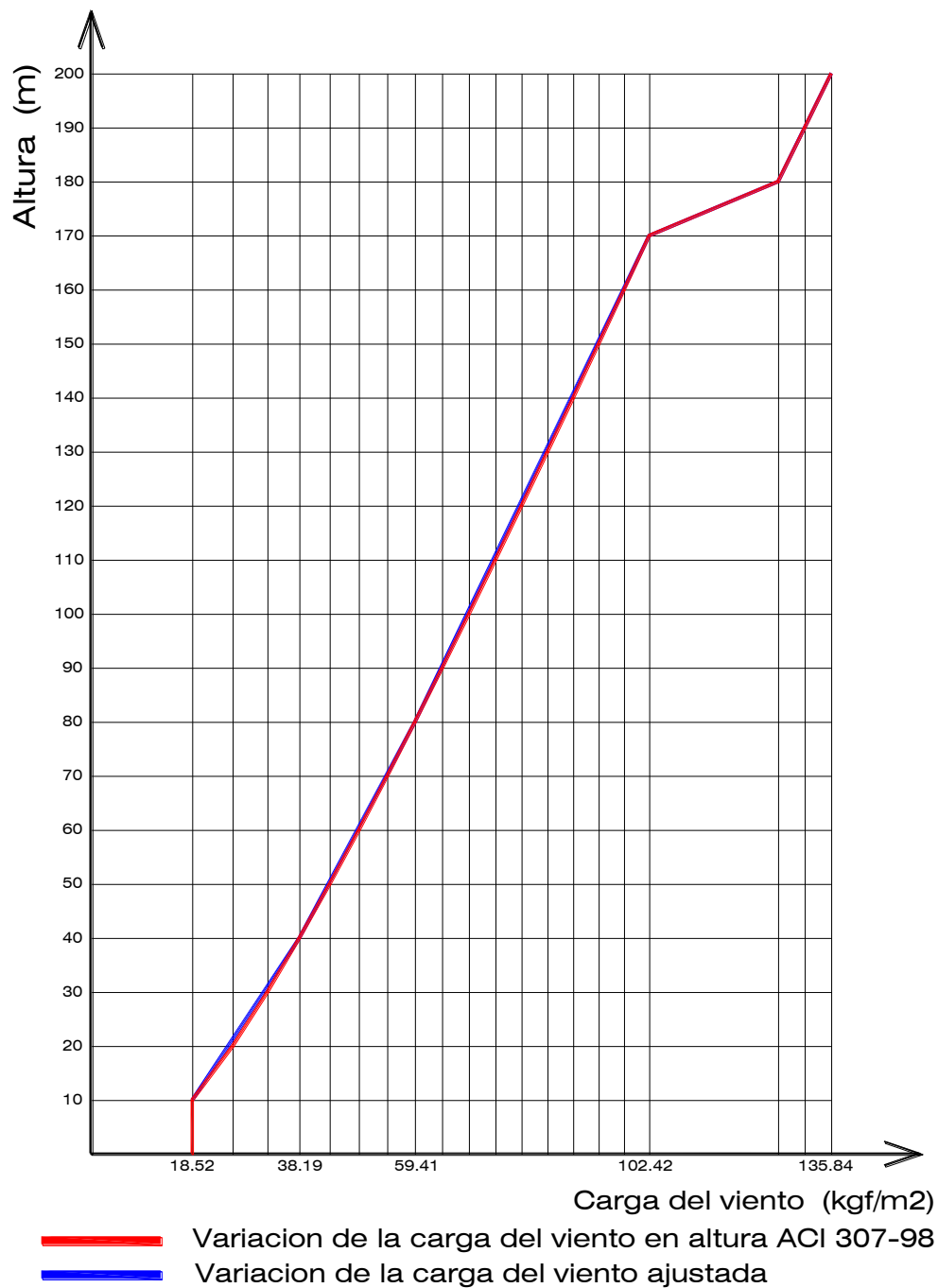


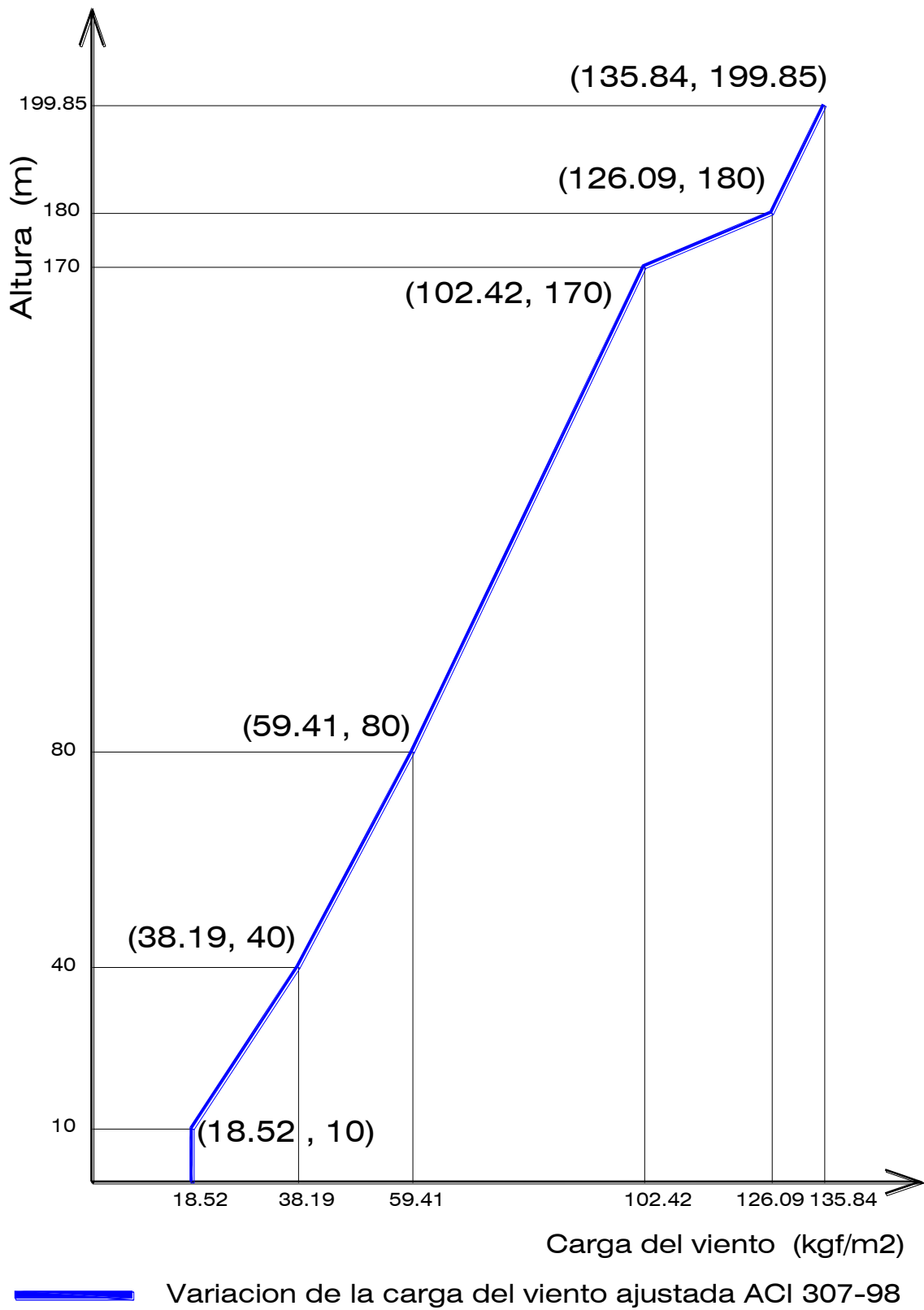


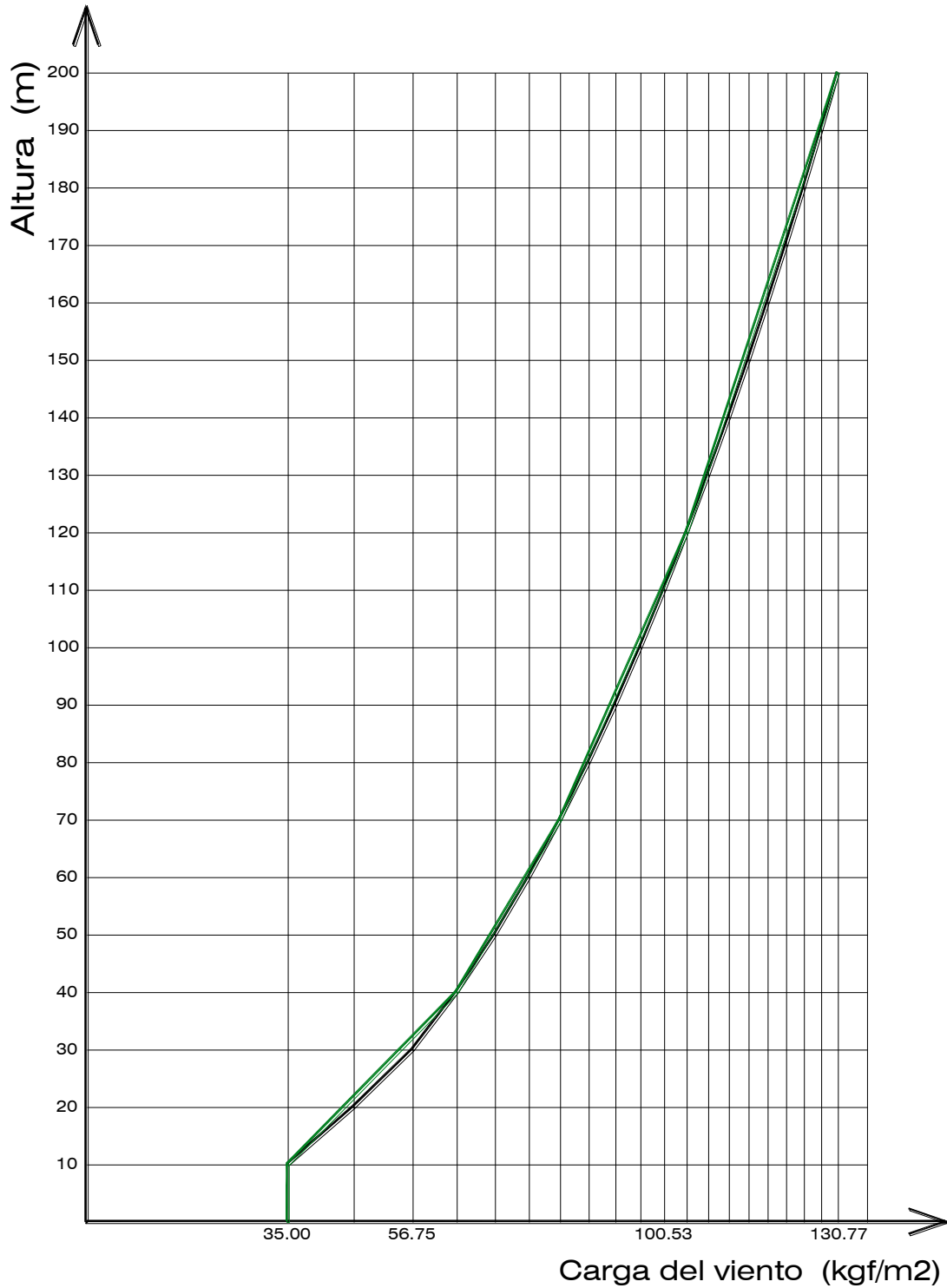
TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



Como se observa de las curvas de comparación, se puede concluir que las cargas de viento obtenidas mediante el procedimiento establecido en el Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú (RNE-2009), son ligeramente mayores a las obtenidas mediante el procedimiento establecido en la Norma del ACI 307-98.

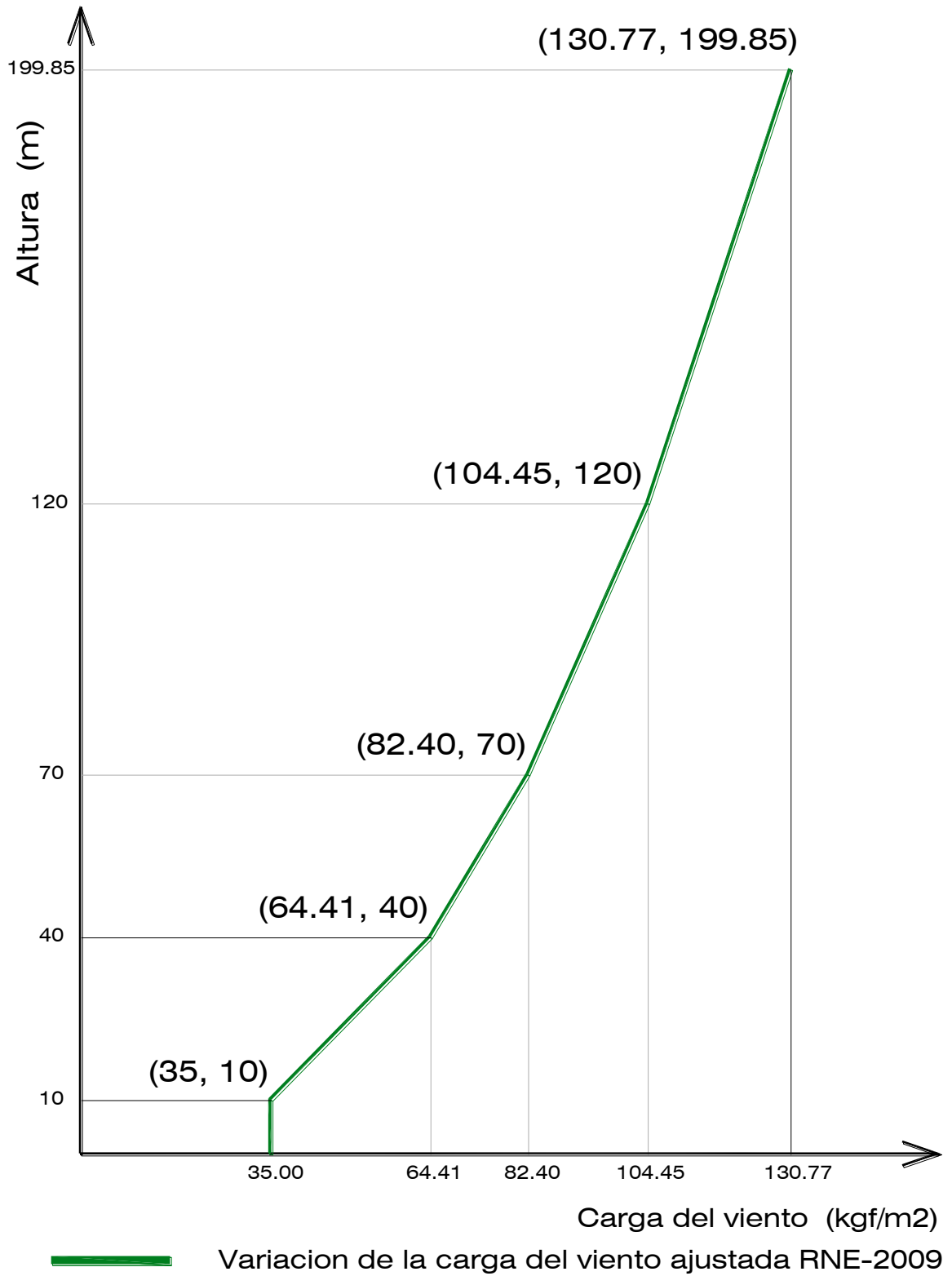
Para facilitar la introducción de datos en el modelo matemático del SAP 2000, se realizará un ajuste de las curvas, de acuerdo a lo siguiente:







-  Variacion de la carga del viento en altura RNE-2009
-  Variacion de la carga del viento ajustada





TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

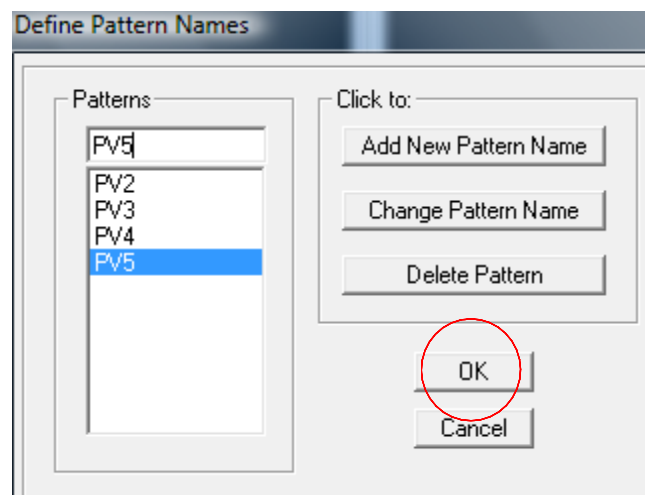
A continuación se introducirán los datos de los gráficos a nuestro modelo matemático de elementos finitos del SAP 2000, se trabajara con la fuerza de viento del Reglamento Nacional de Edificaciones RNE-2009, debido a que presenta mayores valores que los del ACI 307-98.

Para este procedimiento será de mucha ayuda la utilización del comando View / Set Limits, el cual permite visualizar el modelo matemático por tramos previamente seleccionados.

De acuerdo al último grafico se tiene 5 tramos que son:

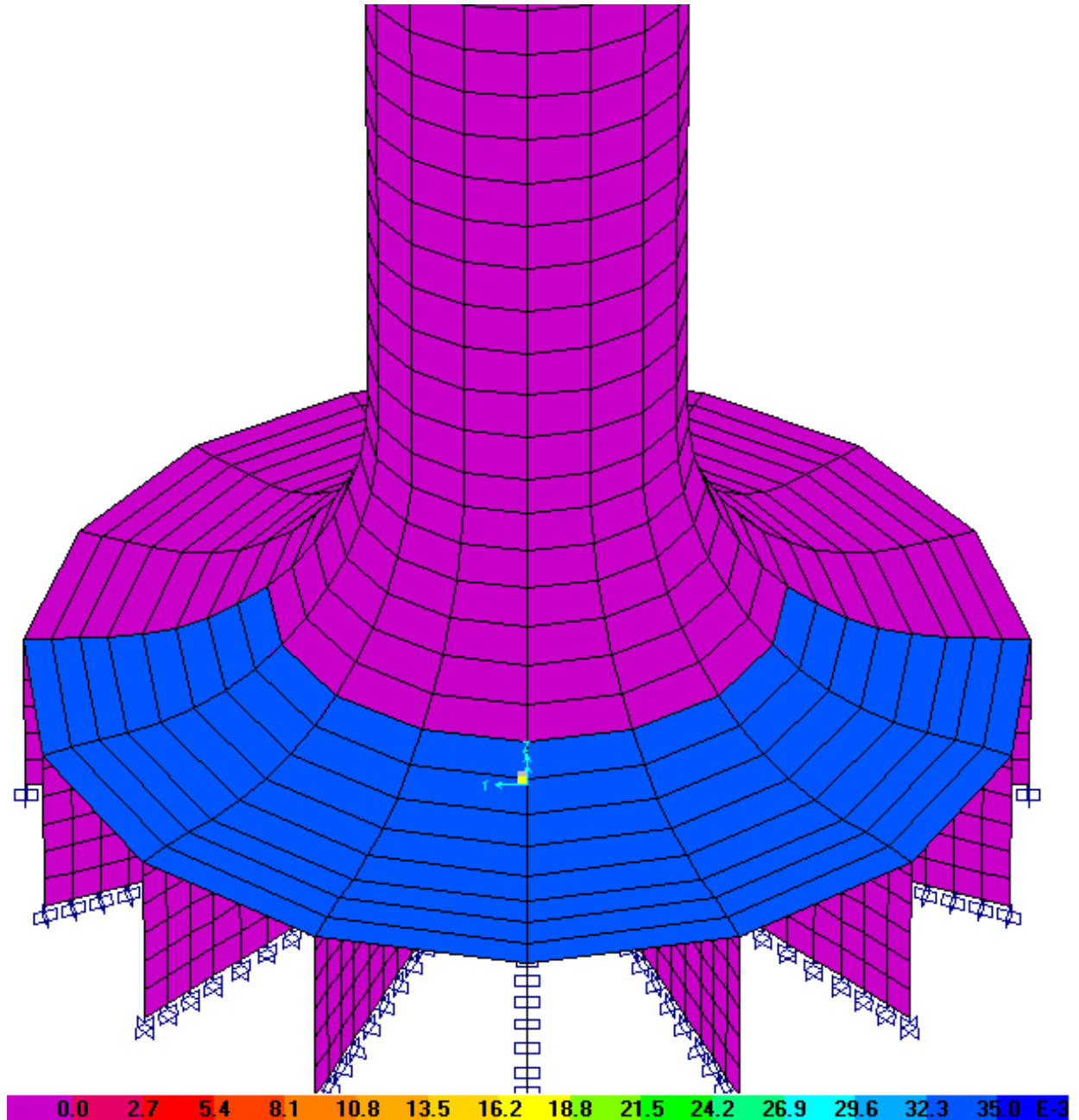
1er tramo: de 0m hasta 10m de altura,	$P_v = 35 \text{ kgf/m}^2$
2do tramo: de 10m hasta 40m de altura,	$P_v (35, 64.41) \text{ kgf/m}^2$
3er tramo: de 40m hasta 70m de altura,	$P_v (64.41, 82.40) \text{ kgf/m}^2$
4to tramo: de 70m hasta 120m de altura,	$P_v (82.40, 104.45) \text{ kgf/m}^2$
5to tramo: de 120m hasta 199.85m de altura,	$P_v (104.45, 130.77) \text{ kgf/m}^2$

Para introducir estos valores de cargas de viento en la altura se utilizará el comando Define / Joint Patterns, introduciendo los nombres de los tramos del Pv2 al Pv5, ya que el primer tramo Pv1 es constante.



Como las coordenadas de los elementos Shell del modelo matemático no coinciden exactamente con las alturas del grafico de fuerzas de viento, se escogerán las que estén más cercanas a ellas, esto no distorsiona los resultados ya que la diferencia es mínima.

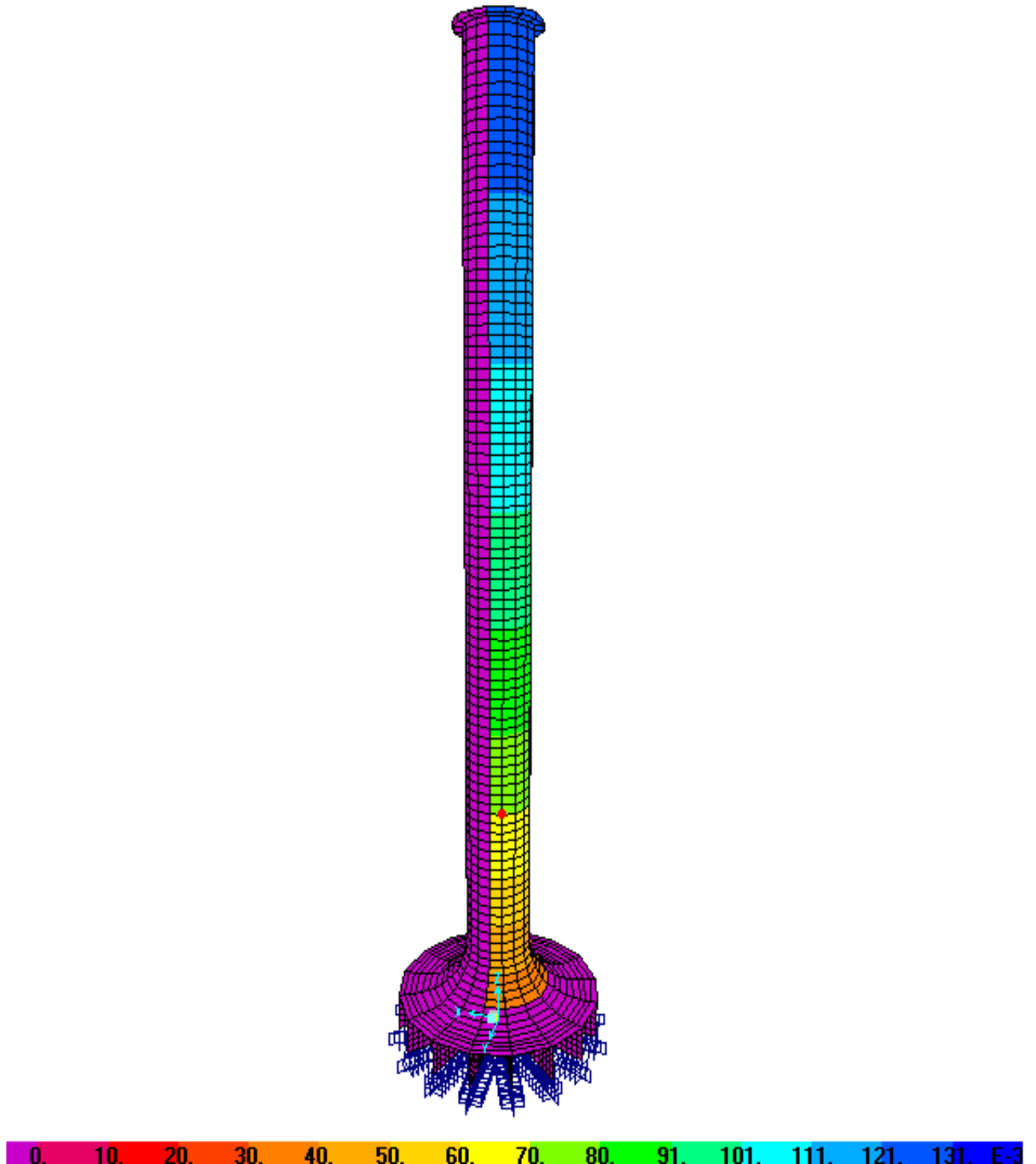
Visualización de las cargas aplicadas al modelo matemático:



Carga Pv₁ – Constante – de 0.00m a 10.00m



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

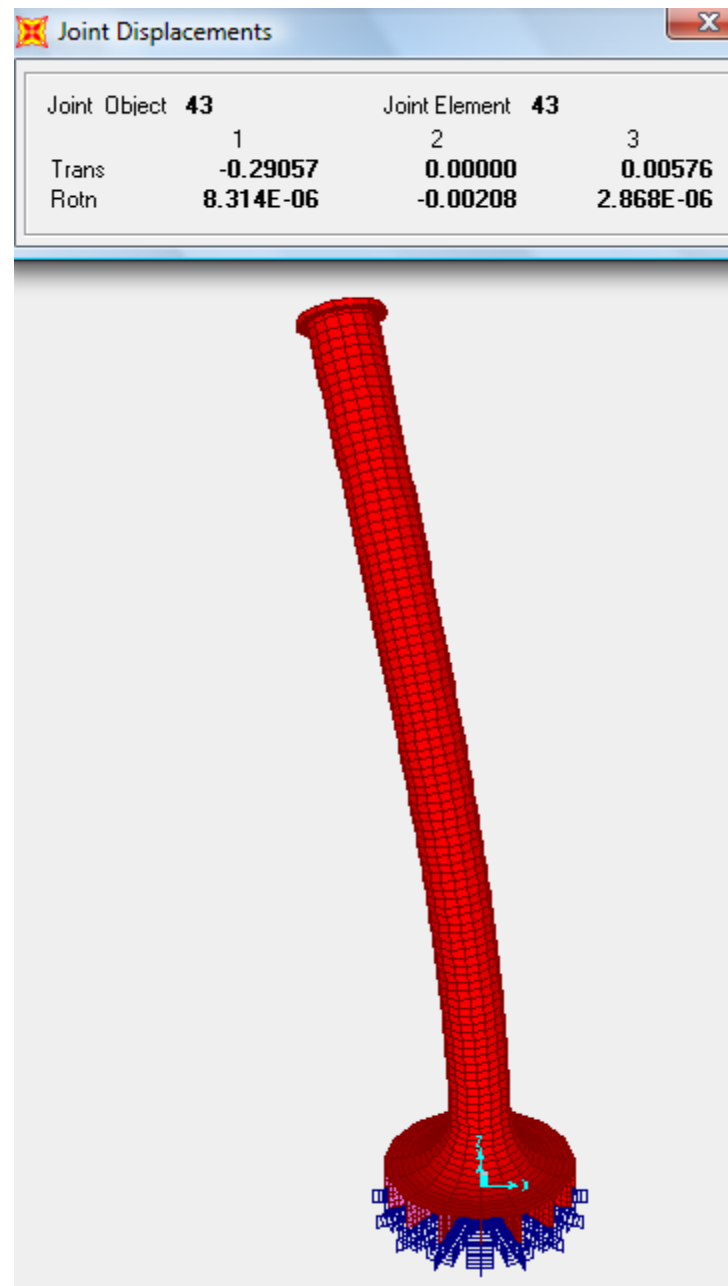


Cargas Pv2, Pv3, Pv4, Pv5

(10.00m a 199.85m)

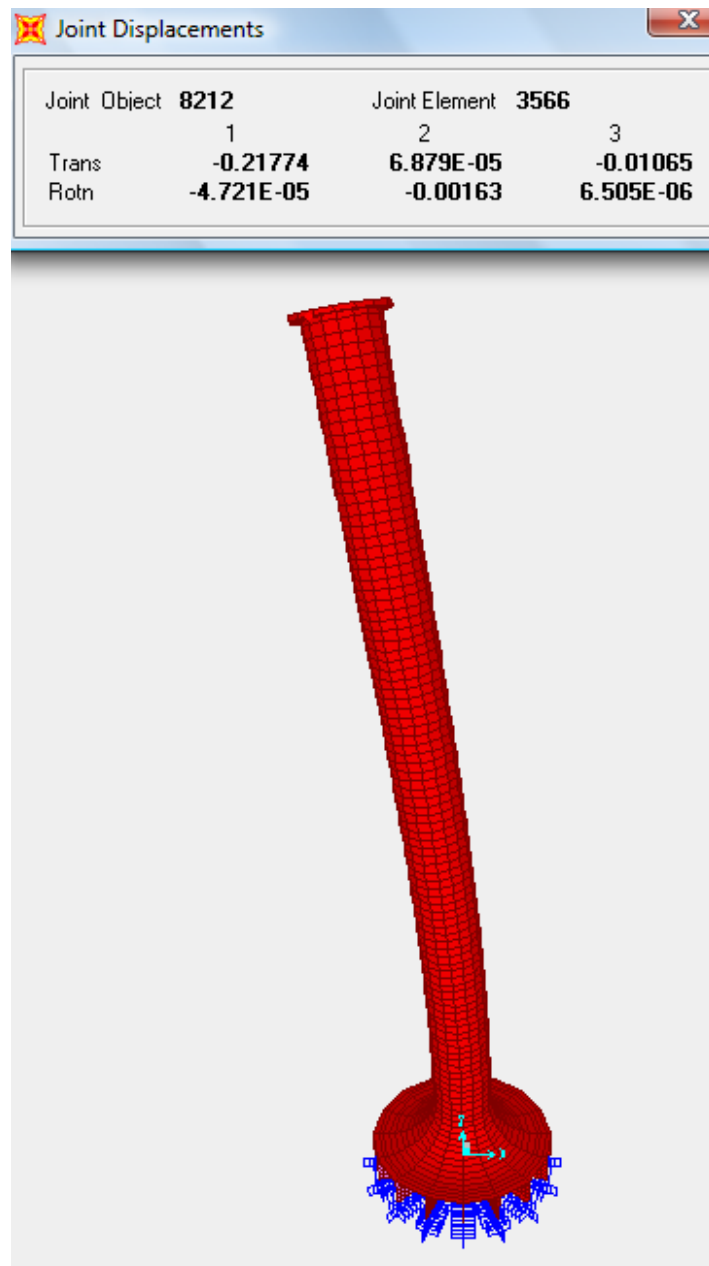


TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



DEZPLAZAMIENTO MAXIMO - RNE – 2009

A efectos de poder comparar los resultados, se ha desarrollado el mismo procedimiento para la carga de viento establecida en la Norma del ACI 307-98, obteniendo un desplazamiento máximo en la parte superior de la estructura de 21.77 cm, menor al que se obtuvo utilizando el Reglamento Nacional de Edificaciones RNE 2009.



DEZPLAZAMIENTO MAXIMO - ACI 307-98

Cortante y Momento en la base debido al viento:

Utilizando el comando: Display / Show Tables / Analysis Results / Structure Output / Base Reactions, se obtiene la fuerza cortante y el momento en la base de la torre:



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Units: As Noted		Base Reactions						
OutputCase Text	CaseType Text	GlobalFX Ton	GlobalFY Ton	GlobalFZ Ton	GlobalMX Ton-m	GlobalMY Ton-m	GlobalMZ Ton-m	
▶ ALW	LinStatic	238.7018	000000002537	1.3312	000000003709	31005.42565	000000001221	

Comparación de Respuestas para los estados de carga de Sismo y Viento:

RESPUESTAS MAXIMAS	SISMO	VIENTO
DESPLAZAMIENTO MAXIMO (m)	0.42	0.29
CORTANTE EN LA BASE (ton)	683.59	238.70
MOMENTO EN LA BASE (ton-m)	49,815.73	31,005.43

Como se observa en la tabla comparativa, el estado de carga más importante en el análisis de la presente estructura es el sismo, por lo que se considerará dicho estado de carga para efectos del diseño.

3.7 Estabilidad de la estructura

A continuación se procederá a evaluar la estabilidad de la estructura debido al volteo, para lo cual se requiere el peso de la estructura (carga muerta – D):

Units: As Noted		Base Reactions						
OutputCase Text	CaseType Text	GlobalFX Ton	GlobalFY Ton	GlobalFZ Ton	GlobalMX Ton-m	GlobalMY Ton-m	GlobalMZ Ton-m	
▶ D	LinStatic	000000009413	000000000213	9898.8983	11.93767	2.37455	000000002221	

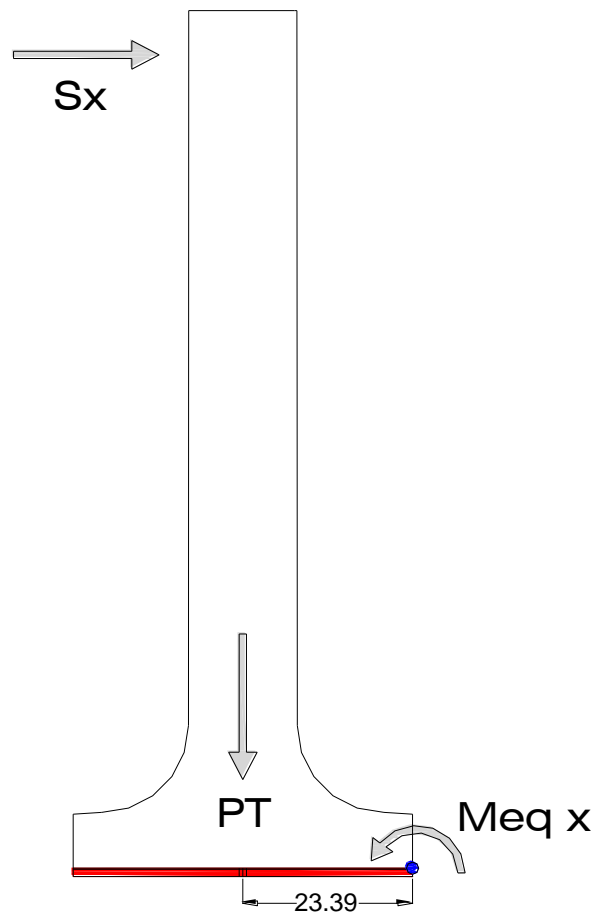
Como se observa, se tiene un peso total de la torre de $PT = 9,898.90$ ton, y un brazo de $23.39m$, así mismo el momento de volteo debido al sismo es de $M_v = 48,815.73$ ton-m.

El paso a seguir sería calcular el momento equilibrante (M_{eq}) o momento resistente, que estaría dado por el peso total de la estructura multiplicado por el brazo. Si se toma momentos respecto al punto azul se tiene:

$$M_{eq} \times = PT \times Brazo = 9,898.90 \times 23.39 = 231,535.27 \text{ ton-m}$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



La distancia de 23.39 m corresponde al centro de masa de la estructura, se tiene que tener en cuenta que al tratarse de una estructura axisimetrica, esta distancia coincide con el centroide en plata de la estructura, para otros casos diferentes se tiene de calcular dicho centro.

De esta manera el factor de seguridad para el volteo de la estructura será:

$$FSV = M_{eq} / M_v$$

$$FSV = 231,535.27 / 48,815.73 = 4.74 > 1.5 \quad \text{OK!!}$$

Como se puede apreciar la estructura es estable al volteo, mas aun si no se ha considerado el peso adicional de la platea de cimentación, con lo que el factor de seguridad se incrementaría.



3.7.1 Verificación de la velocidad de vibración (30, 31, 32, 33):

La torre solar no solo tendrá un uso energético sino también como mirador turístico, es por tal motivo que es necesario evaluar la velocidad de la vibración en el mirador, de tal manera que las personas que hagan uso de dicho atractivo turístico, no sientan problemas ni malestar en su salud, tal como lo establecen las normas ISO 2631, IRAM 4078, BRITISH 7385, SN 640312.

Aunque los criterios de aceptación se toman de manera independiente de la frecuencia, los valores más convenientes como indicadores varían en función del rango de frecuencia; mientras que el límite para las vibraciones lo marca la velocidad para frecuencias bajas, para frecuencias altas, se debe atender a las aceleraciones pico. A pesar de esto, la mayoría de los criterios se basan en valores de velocidades.

Según la British 7385, Parte 2, se esperan posibles daños cosméticos en las edificaciones a partir de los 15 mm /s como limite pesimista de la velocidad pico de vibración.

La norma Suiza SN 640312a da valores similares y según lo publicado en la Rilem 1963, pag. 19, sobre figura de daño en edificios de mampostería, artículo de R. Ciesielski, se tienen también valores análogos.

Ítem	Tipo de estructura	Pautas para valores de la velocidad, v_i , en mm/s			
		Vibraciones en la cimentación a una frecuencia de			Vibraciones en el plano horizontal en el nivel más alto, en todas las frecuencias
		1 Hz a 10 Hz	10 Hz a 50 Hz	50 Hz a 100 Hz (*)	
1	Edificios usados para propósitos comerciales, edificios industriales y edificios de similar diseño	20	20 a 40	40 a 50	40
2	Edificios de viviendas y edificios de similar diseño y/o ocupación	5	5 a 15	15 a 20	15
3	Estructuras que, debido a su particular sensibilidad a las vibraciones, no pueden ser clasificados como el Ítem 1 o 2	3	3 a 8	8 a 10	8

(*) Para frecuencias superiores a 100 Hz, los valores dados en esta columna serán los mínimos.



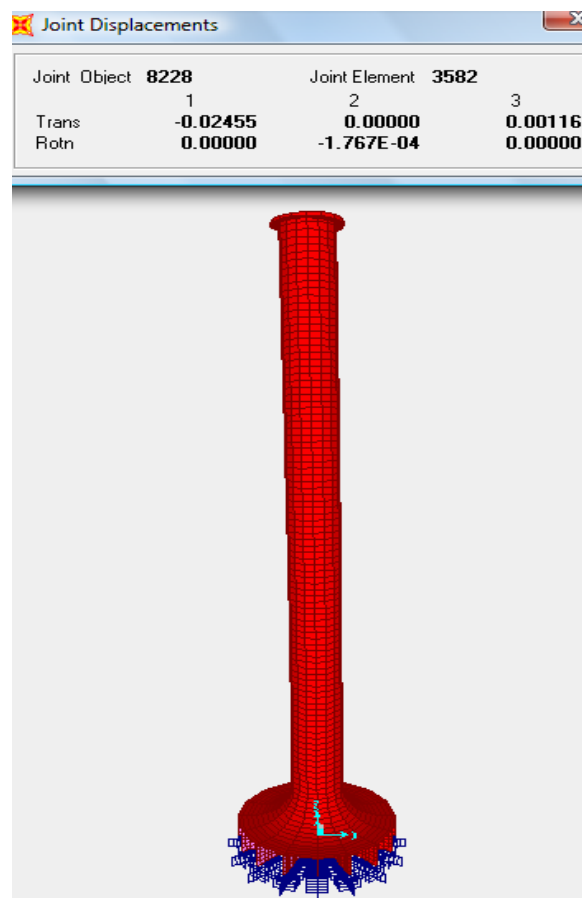
TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Para el presente caso y tomando en cuenta que la exposición a las vibraciones será por un corto periodo no mayor a 1 hora y tratándose de una estructura de uso industrial con bajas frecuencias en el rango de 0.26 Hz hasta 7.28 Hz, la velocidad de vibración pesimista a fin de que no ocasione malestar a los visitantes puede estimarse de acuerdo a la tabla sobre pautas de velocidades igual a 40mm/s, dicha velocidad se calcula como la frecuencia natural del sistema multiplicada por el desplazamiento, cabe señalar que en el presente caso, el desplazamiento será la incógnita, la cual permitirá calcular la velocidad máxima del viento para que se pueda usar el mirador sin ningún inconveniente ni malestar para los visitantes.

Esto es: $v_i = \omega \times \delta = 1.6295 \text{ rad/s} \times \delta = 0.040\text{m/s}$ ($\omega \rightarrow$ para el periodo fundamental)

$\Rightarrow \delta = 0.0245\text{m} = 2.45\text{cm}$

Este desplazamiento máximo ocurre cuando la velocidad del viento medido hasta los 10m de altura es igual a 8.45 km/h.





TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Clima en Iquitos durante Agosto 2009

Datos climáticos históricos de Iquitos registrados durante el mes de Agosto del año 2009, con medias mensuales y datos ampliados para un día.

Los datos fueron reportados por la estación meteorológica: **843770 (SPQT)**

Latitud: **-3.75** | Longitud: **-73.25** | Altitud: **125**

Datos Registrados

En la siguiente tabla no se han incluido todos los datos, para ampliar la información de un día y ver todos los datos, pinche sobre él.

	T	TM	Tm	SLP	H	PP	VV	V	VM	Vg	RA	SN	TS	FG
1	26.5	35	22.9	1012.1	83	-	10.1	4.6	14.8	-	0			0
2	26.6	35.4	22	1011.4	80	0	8.9	1.3	13	-				0
3	26.2	33	22	1011.9	86	-	9.8	4.1	20.6	-	0			0
4	24.7	29	21.4	-	92	-	7.9	5.6	13	-	0			0
5	25.8	32	21	1011.8	85	12.9	8.2	2.4	9.4	-				0
6	26.9	33.4	21.9	1011.2	81	0	9.7	2.4	29.4	48.2				0
7	26.4	32	21	-	81	0	9.3	5.7	13	33.5				0
8	25.4	32.7	22	-	85	0	10.3	3.5	13	-				0
9	26.2	32	21	1013.5	82	0	9	3.7	11.1	-				0
10	26.4	33	21.8	1013.5	81	7.11	9.8	3.9	18.3	-	0			0
11	24.9	34.5	21.7	1014	88	1.02	9.5	4.3	13	-	0			0
12	25.2	31	21	1014	82	0	10.8	3.7	7.6	-				0
13	26.8	33	21.2	1012.4	78	0	8.9	2	7.6	-				0
14	27.8	34.5	21.9	1011.8	75	0	8.9	1.7	7.6	-				0
15	28.1	35.5	22	1010.3	75	0	10.1	2.8	7.6	-				0

Interpretación

Ten en cuenta, que las medias y totales mensuales son en base a los datos disponibles, cuando en las medias aparece algún resultado en rojo, significa que no se dispone de información del mes completo, en este caso, la media o total es de los días de los que existen datos.

- T** Temperatura media
- TM** Temperatura máxima
- Tm** Temperatura mínima
- SLP** Presión atmosférica a nivel del mar (mb)
- H** Humedad relativa media (%)
- PP** Precipitación total de lluvia y/o nieve derretida (mm.)
- VV** Visibilidad media (km)
- V** Velocidad media del viento (km/h)
- VM** Velocidad máxima sostenida del viento (km/h)
- Vg** Velocidad de ráfagas máximas de viento (km/h)
- RA** Indica si hubo lluvia o llovizna (En la media mensual, total días que llovió)
- SN** Indica si nevó (En la media mensual, total de días que nevó)
- TS** Indica si hubo tormenta (En la media mensual, total de días con tormenta)
- FG** Indica si hubo niebla (En la media mensual, total de días con niebla)



Uso del Mirador

Para poder utilizar el mirador como atractivo turístico, se debe de contar con velocidades del viento en la zona del mirador inferiores a 8.45 km/h, contando con avisos preventivos e indicando la velocidad máxima permisible del viento, a fin de poder visitar el mirador sin ocasionar malestar en la salud de los visitantes. Así mismo es necesario contar in situ con medidores de velocidad de viento (anemómetros).

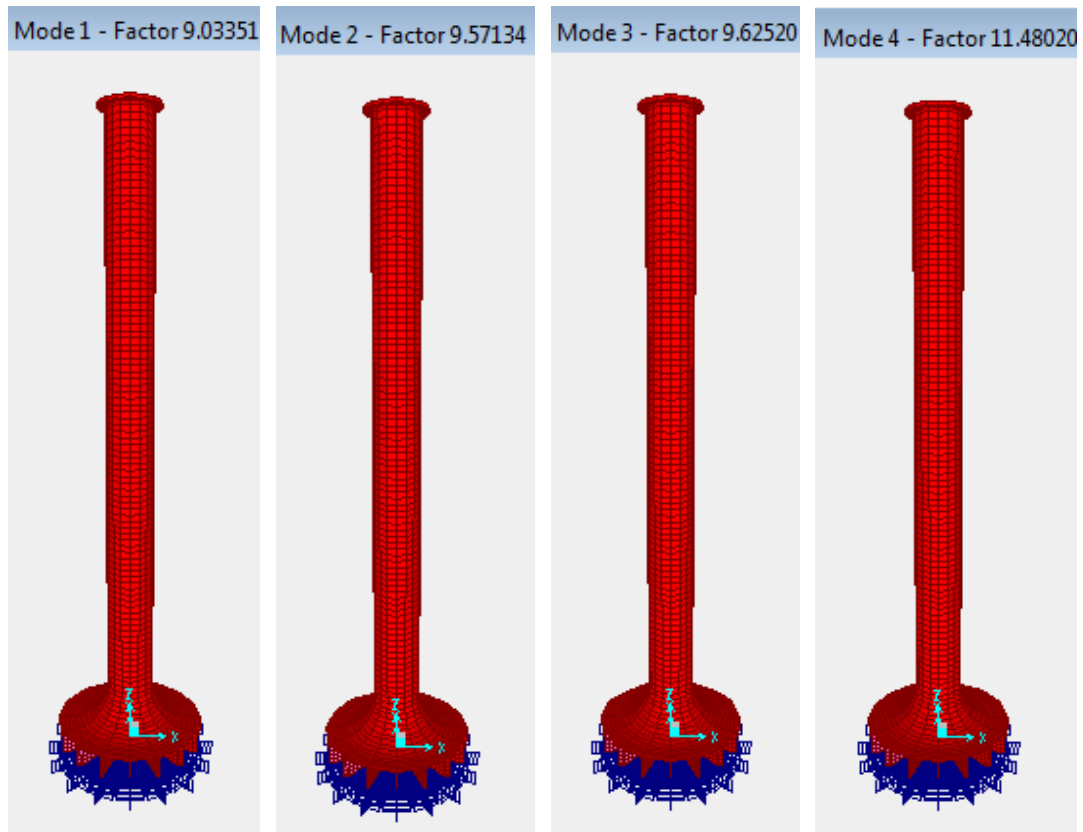
Se debe tener en cuenta que la velocidad media del viento en Iquitos es inferior a 8.45 km/h, tal como se consigna en la información proporcionada por el SENAMHI en el mes de Agosto del 2009, mes en la cual ocurren casi todos los años las máximas velocidades del viento, por lo que el uso del mirador solo debe restringirse cuando la velocidad del viento supere el máximo permitido.

3.8 Análisis por pandeo (Buckling)

En este punto se realizará el análisis por pandeo de la estructura. El programa SAP 2000 también proporciona dicho análisis (Buckling), para lo cual se define primero un nuevo caso de análisis, luego se escogen los estados de carga para el análisis por pandeo, considerando para dicho análisis los cinco primeros modos de vibración.

The screenshot shows the 'Analysis Case' dialog box in SAP 2000. The 'Analysis Case Name' is 'PANDEO' and the 'Analysis Case Type' is 'Buckling'. Under 'Stiffness to Use', 'Zero Initial Conditions - Unstressed State' is selected. The 'Loads Applied' table lists several load cases, with 'UX' selected. The 'Other Parameters' section shows 'Number of Buckling Modes' set to 5 and 'Eigenvalue Convergence Tolerance' set to 1.000E-09. The 'OK' button is circled in red.

Load Type	Load Name	Scale Factor
Accel	UX	1
Load	ALW	1
Load	D	1
Load	L	1
Accel	UX	1



Como se puede observar el pandeo no afecta la estructura, ya que se cuenta con factores mayores a 9, siendo el caso que para que una estructura sea estable al pandeo se debe contar con factores mayores o iguales a 3.

3.9 Análisis y diseño estructural de la cimentación

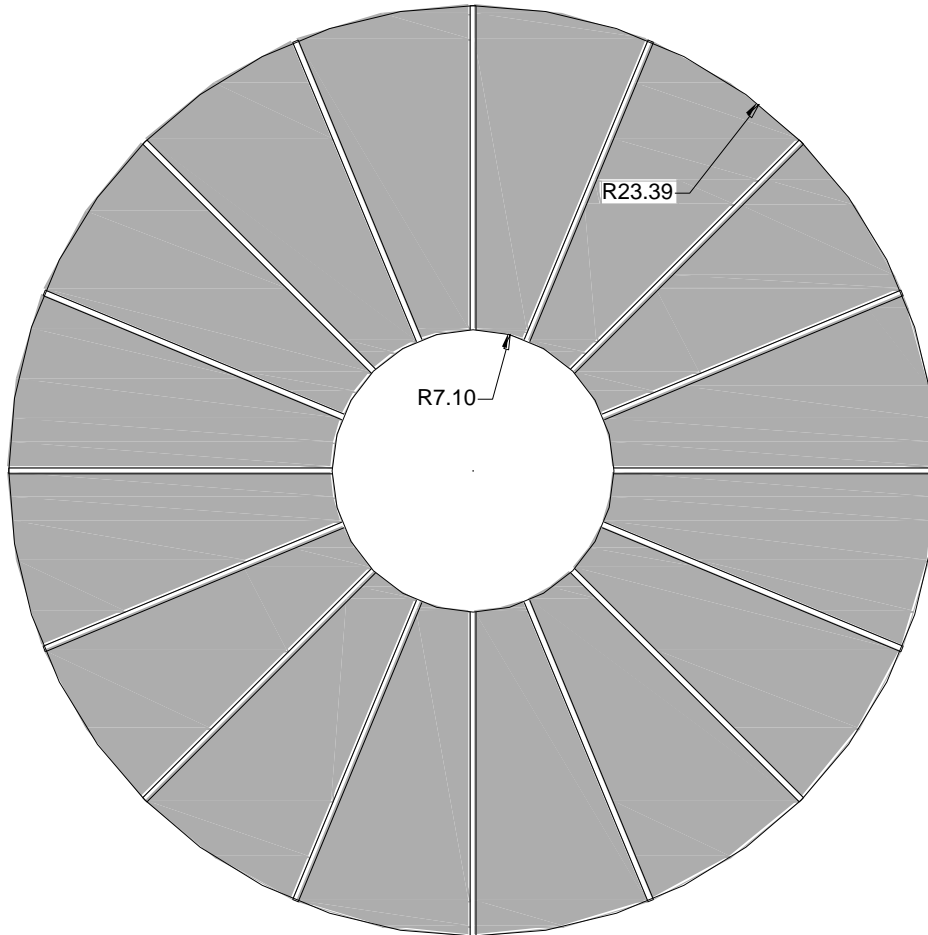
3.9.1 Platea de cimentación

Para el presente análisis se realizará un modelo matemático de una platea de cimentación con elementos tipo Shell, el área de dicha platea está delimitada por la longitud de las placas de apoyo, es decir desde los 7.10m de radio interior hasta los 23.39m de radio exterior, haciendo un total de 1,560.37m² de área total de platea de cimentación.

Debido a que el suelo en la zona de estudio es un suelo flexible en su mayoría, con capacidades portantes alrededor de 1.00 kg/cm² donde predomina la acilla, se tomará en cuenta el efecto de la interacción suelo estructura para la elaboración del presente



modelo matemático, ya que los desplazamientos pueden sufrir modificaciones considerables.



PLATEA DE CIMENTACION

INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA PARA DISEÑO SÍSMICO (34, 35, 36)

La respuesta de una estructura bajo la acción de los movimientos sísmicos, se ve afectada por las interacciones de tres sistemas vinculados: la estructura, los cimientos, y el medio geológico subyacente que rodea la cimentación. El análisis de la Interacción sísmica suelo estructura (ISE) evalúa la respuesta colectiva de estos sistemas a un determinado movimiento de campo libre. El término "campo libre" se refiere al movimiento que ocurriría en la superficie del terreno si no existiera la estructura y que representa la condición para la obtención del espectro de diseño. Esta hipótesis es correcta para estructuras flexibles cimentados sobre roca firme, pero no es apropiada



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

tratándose de estructuras muy rígidas cimentadas sobre terrenos relativamente flexibles, más aun si se trata de estructuras elevadas.

El efecto (ISE) está ausente de la condición teórica de la cimentación rígida y condiciones del suelo. En consecuencia, los efectos de la (ISE) reflejan las diferencias entre la respuesta de la estructura cuando se considera en la base el movimiento de campo libre y el movimiento modificado tomando en cuenta la flexibilidad del suelo, es decir la respuesta real de la estructura. Tomando en cuenta estos aspectos, los tres sistemas del efecto (ISE) pueden afectar significativamente la respuesta de las estructuras:

Rigidez de la cimentación y amortiguamiento. La inercia desarrollada en la vibración de una estructura da lugar a la fuerza contante en la base, momentos de volteo, y la excitación de torsión, estas cargas a su vez causan los desplazamientos y la rotación de la cimentación en relación con el campo libre y en consecuencia modifican el movimiento en la base. Además, los movimientos relativos de la cimentación en relación al campo libre da lugar a la disipación de energía a través de la radiación de amortiguamiento (es decir, el amortiguamiento es asociado con la propagación de ondas en el suelo lejos de la cimentación, que actúa como fuente de onda) y el amortiguamiento de histéresis del suelo, esta disipación de energía puede afectar significativamente el amortiguamiento total del sistema suelo-cimentación-estructura. Dado que estos efectos tienen su origen en la inercia estructural, se conoce como efectos de la interacción inercial.

2. Las variaciones del movimiento en el campo libre y nivel de cimentación. Las diferencias entre los movimientos de la cimentación y el campo libre resultan de dos procesos. La primera es conocida como la interacción cinemática y resulta de la presencia de elementos de rigidez en la cimentación o en el suelo, que ocasionan el movimiento de la cimentación para desviarse del movimiento de campo libre como resultado de un promedio de la losa de base, la dispersión de la onda, y los efectos de empotramiento. El segundo proceso está relacionado con la estructura y la inercia de la cimentación y consiste en los desplazamientos y rotaciones relativas de la cimentación en el campo libre, descritos anteriormente.

3. Deformaciones de la cimentación. Las deformaciones por flexión, axiales y por corte de los elementos de la cimentación, se producen como consecuencia de las cargas aplicadas por la superestructura y el suelo de apoyo. Tales deformaciones representan la demanda sísmica para la cual los elementos de la cimentación deben ser diseñados.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Estas deformaciones pueden afectar de forma significativa todo el comportamiento del sistema, especialmente con respecto al amortiguamiento.

Los procedimientos vigentes que se utilizan para la evaluación de la interacción suelo estructura (ISE) consideran únicamente la interacción inercial descrita en el primer punto y su uso es opcional y raramente usado en la práctica. Según la mayoría de la bibliografía actual sobre la (ISE), existen muchas razones para no tomar en cuenta este efecto, el primero y más importante es que la fuerza cortante en la base siempre se reduce, por lo que este efecto es ignorado a medida de ser conservadores en el diseño.

En segundo lugar, muchos ingenieros de diseño que han intentado aplicar el método en proyectos, han realizado muchos esfuerzos en el diseño de edificios altos, pensando que tomando en cuenta el efecto (ISE) podrían proporcionar ahorro en los costos del proyecto, desafortunadamente, los efectos de inercia de la interacción son insignificantes para estructuras altas y flexibles, y por lo tanto los diseñadores no obtuvieron ninguna ventaja para sus esfuerzos, por lo que descontinuaron el uso de este procedimiento. El uso de los procedimientos para considerar el efecto (ISE) rinde realmente ventaja en la mayoría de estructuras de periodo corto ($T < 1$ seg.), estructuras rígidas con sistemas de cimentación rígida e interconectada (es decir, plateas de cimentación o zapatas conectadas) cimentados en el suelo.

MODELOS PARA EL ANALIS DINAMICO:

Estudios analíticos de los efectos de la interacción suelo estructura requieren de modelos convenientes, que represente adecuadamente la rigidez del suelo, el material y el amortiguamiento, que permita su dependencia con las deformaciones y una variación espacial del comportamiento real. Varios modelos de suelos usados en tales análisis pueden ser agrupados en las siguientes cinco categorías de acuerdo con el grado de complejidad:

- (a) Elementos discretos (masas concentradas) con resortes estáticos y amortiguamiento viscoso.
- (b) Analogía de la viga de corte, como medio continuo o como masas concentradas, con resortes distribuidos verticalmente a través del perfil del suelo.
- (c) Semi espacio elástico o visco elástico.
- (d) Elementos finitos.
- (e) Modelos híbridos de elementos finitos y propiedades del semi espacio.



APROXIMACIONES POSIBLES AL PROBLEMA DE INTERACCION SUELO ESTRUCTURA:

Existen dos métodos aproximados para estudiar el efecto de la interacción suelo estructura:

- (a) Modificar el diseño dado para el movimiento de campo libre y luego evaluar la respuesta de la estructura dada al movimiento modificado de la cimentación.

- (b) Modificar las propiedades dinámicas de la cimentación de la estructura y luego evaluar la respuesta de la estructura al movimiento prescrito de campo libre.

Si estos métodos son implementados correctamente, ambas aproximaciones rinden resultados satisfactorios, sin embargo, la segunda aproximación es fácil de implementar, por lo tanto es especificado en la mayoría de los códigos de diseño.

PROCEDIMIENTO DE LA FUERZA LATERAL EQUIVALENTE:

Existen varios métodos para tomar en cuenta el efecto de la (ISE), siendo el más divulgado el “procedimiento de la fuerza lateral equivalente”, este método es muy práctico, ya que en vez de analizar la estructura para un movimiento en la base apropiadamente modificado, se considera el movimiento de campo libre actuando sobre un modelo de la estructura con característica dinámicas distintas. Debe considerarse un alargamiento de los periodos naturales del sistema (particularmente el modo fundamental) y un cambio en las características del amortiguamiento (por lo general un incremento del amortiguamiento efectivo debido a la radiación y a la histéresis en las relaciones esfuerzo deformación para el suelo). Adicionalmente deben corregirse los desplazamientos laterales para considerar las rotaciones en la base de la estructura.

Para estructuras de gran rigidez cercana a la base, como es nuestro caso, dicho procedimiento sirve únicamente para el cálculo del nuevo periodo fundamental de la estructura ya que como reiteramos no existen reducciones de la fuerza cortante en la base.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

En estructuras cimentadas sobre suelo blando, como es el presente caso, los movimientos de la cimentación son generalmente diferentes al movimiento de campo libre. El movimiento proporcionado a nivel de cimentación incluye componentes de movimiento rotacional y traslaciones de la cimentación. Los movimientos rotacionales de la cimentación pueden ocasionar significativos efectos en el comportamiento de estructuras altas.

Para efectos del modelaje se procederá a calcular el periodo y amortiguamiento efectivo del sistema considerando el efecto de la interacción suelo estructura, para lo cual se ha desarrollado una hoja de cálculo en Excel para abreviar los cálculos:

INTERACCION SUELO ESTRUCTURA PARA EL DISEÑO SISMICO

Tipo de Suelo: Arcilla

Tipo de cimentación: Platea anular de cimentación

$$V' = V - \Delta V$$

Reducción del cortante en la base

$$\Delta V = [C_s - C_s' (0.05/\beta)^{0.4}] \times \hat{W} \leq 0.3V$$

$$T' = T \times [1 + (K' / K_y) \times (1 + K_y \times h^2 / K_\theta)]^{1/2}$$

T =	3.855	seg	Periodo fundamental
Es =	600.00	ton/m ²	Modulo de Elasticidad
μ =	0.40		Modulo de Poisson
G =	214.29	ton/m ²	Modulo de corte
Rae =	23.39	m	Radio exterior
Rai =	7.10	m	Radio Interior
Rme =	235,077.34	m ⁴	Momento de Inercia exterior
Rmi =	1,995.83	m ⁴	Momento de Inercia interior
d =	0.80	m	Profundidad de cimentación

$$K_y = 8 \times G \times R_a [1 + (2/3) \times (d/R_a)] / (2-\mu)$$

$$K_{ye} = 25,632.14 \text{ ton/m}$$

$$K_{yi} = 8,178.57 \text{ ton/m}$$

$$K_y = 17,453.57 \text{ ton/m} \quad \text{Rigidez horizontal}$$

$$K_\theta = 8 \times G \times R_m^3 [1 + 2 \times (d/R_m)] / 3(1-\mu)$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

$$K_{\theta e} = 1.2372E+19 \text{ ton/m}$$

$$K_{\theta i} = 7.5775E+12 \text{ ton/m}$$

$K_{\theta} = 1.2372E+19 \text{ ton/m}$	Rigidez rotacional
---	--------------------

$w = 9,898.90$	ton	Peso de la estructura
$\hat{W} = 8,983.55$	ton	Peso efectivo
$h' = 155.34$	m	Altura efectiva
$K' = 2,432.71$	ton/m	Rigidez de la estructura
$T' = 4.033$	seg	Periodo efectivo platea circular

$T' = 4.115 \text{ seg}$	Periodo efectivo anillo circular
--	----------------------------------

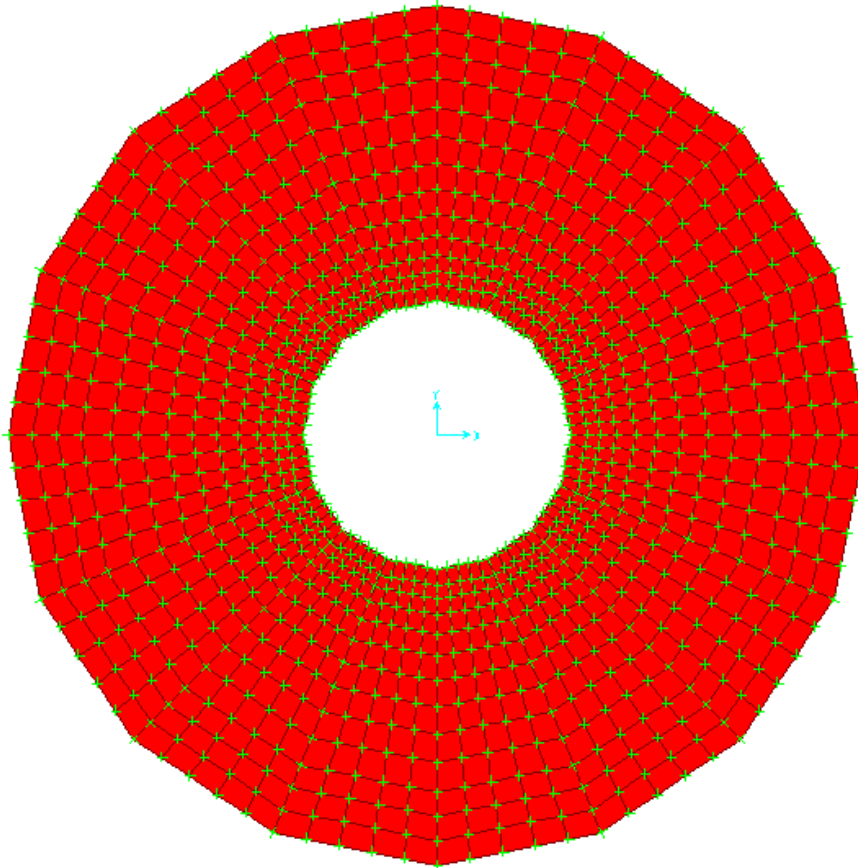
$\beta' = \beta_0 + 0.05 / (T'/T)^3$
--

$V_0 = 683.59$	ton	Cortante en la base empotrada
$M_0 = 49,815.73$	ton-m	Momento en la base empotrada
$L_0 = 46.780$	m	
$h'/L_0 = 3.3206$	$r = R_m$	
$h'/R_m = 0.0007$		
$T'/T = 1.0674$		
$\beta_0 = 0.0200$		
$\beta' = 0.0611$		

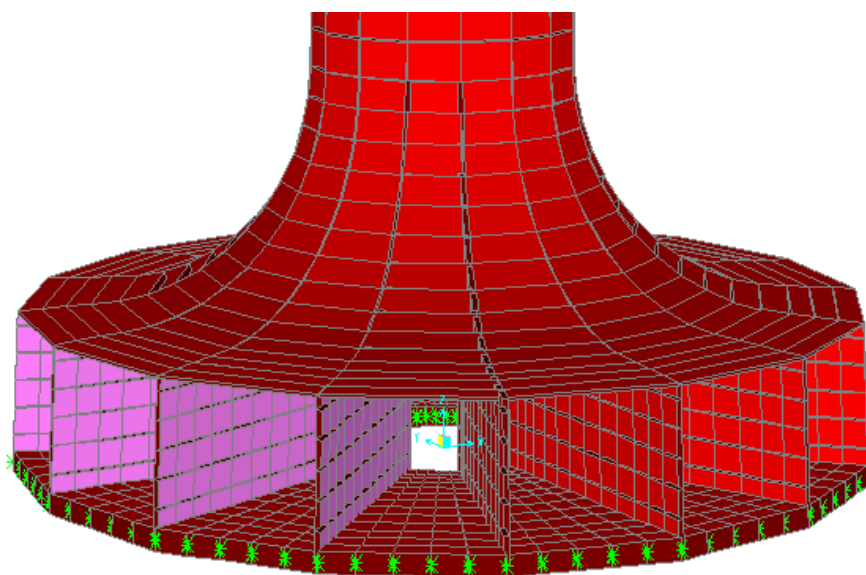
$\beta' = 0.0611$	Amortiguamiento efectivo
-------------------------------------	--------------------------

Como se observa de los cálculos utilizando las formulas establecidas en el ASCE 7, el periodo efectivo así como el amortiguamiento efectivo del sistema se incrementan cuando se toma en cuenta el efecto de la interacción suelo estructura, estos datos así como el coeficiente de balasto que para suelos con una capacidad portante de 1.00kg/cm^2 es igual a $K = 2,200 \text{ ton/m}^3$, se introducirán al modelo matemático elaborado en el SAP2000.

MODELO MATEMATICO DE LA PLATEA DE CIMENTACION



VISTA EN PLANTA DE LA PLATEA DE CIMENTACION



VISTA TRIDIMENSIONAL DEL MODELO MATEMATICO



**TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE**

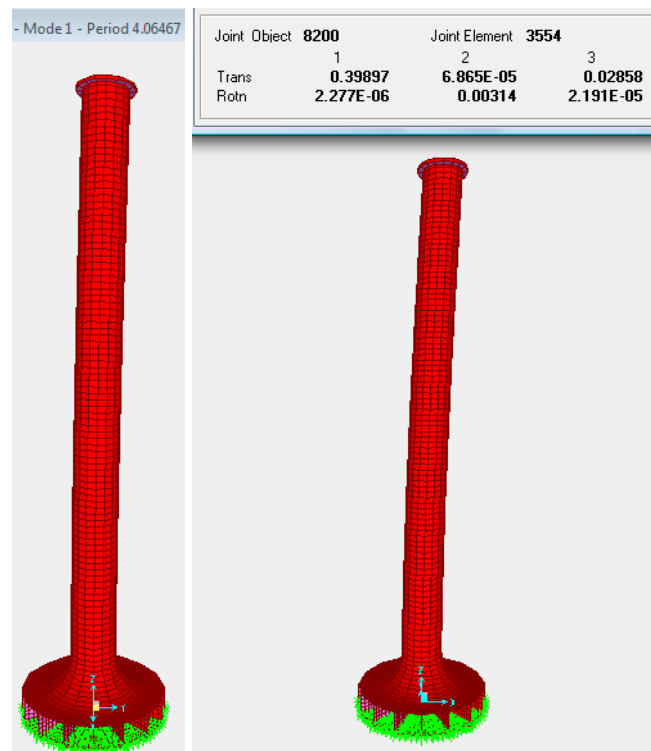
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

El modelo matemático consiste en una platea de cimentación de espesor 0.80m., (Df min. = 0.40m según el Art. 18 de la Norma E-050 – Suelos y Cimentaciones). Se ha utilizando elementos tipo Shell thick a efectos de considerar las deformaciones por corte, esto debido al espesor del elemento. Se ha restringido los desplazamientos laterales de la platea en ambas direcciones (x e y), de tal manera de considerar solo los desplazamientos verticales (z). Luego, utilizando el comando Assign / Area / Area Spring, se introduce los datos de los resortes en la base, consignando la dirección perpendicular al elemento (dirección 3), la cara inferior del elemento (Cara inferior 6) y el tipo lineal del resorte con un valor del coeficiente de balasto igual a 2,200 ton/m³.

Se debe tener en cuenta que el incremento del amortiguamiento se realizará solo en los tres primeros modos de vibración (los dos primeros son los mismos), así mismo se tendrá que reducir el espectro de diseño según la siguiente relación:

$$(\beta_0 / \beta')^{0.4} = (0.05 / 0.0611)^{0.4} = 0.9229.$$

Realizando estas modificaciones al modelo, se obtiene los siguientes resultados:



Units: As Noted

Base Reactions

	OutputCase Text	CaseType Text	StepType Text	GlobalFX Ton	GlobalFY Ton	GlobalFZ Ton	GlobalMX Ton-m	GlobalMY Ton-m	GlobalMZ Ton-m
▶	SFX	LinRespSpec	Max	1012.8226	0.379	0.1637	3.81602	45041.72446	35.08806

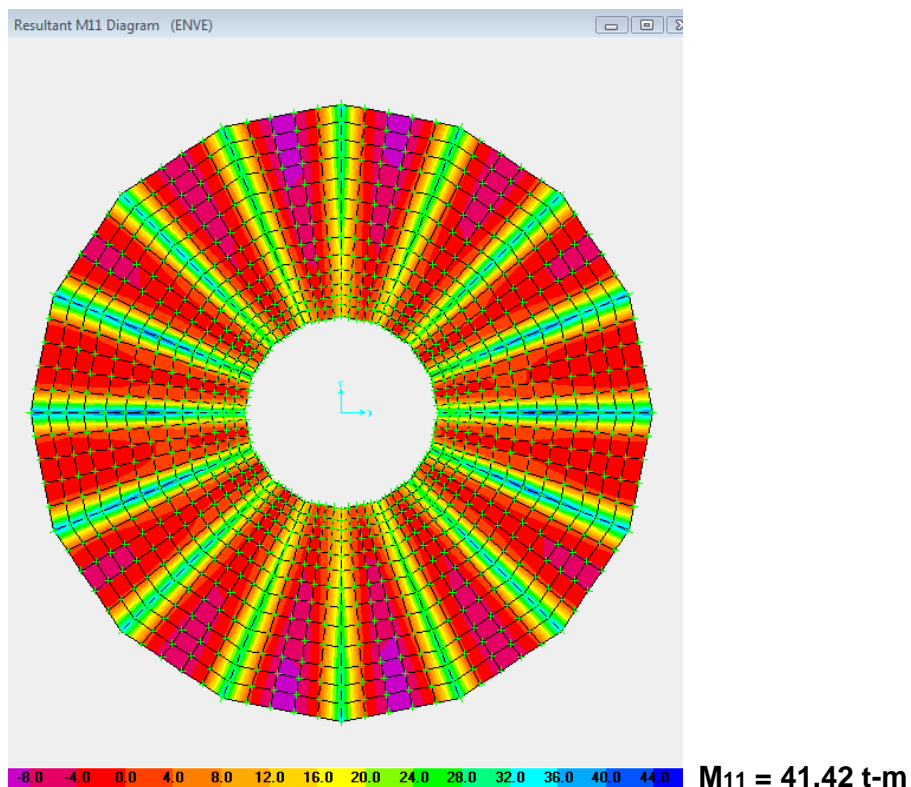


Como se puede apreciar, el periodo fundamental es muy similar al calculado mediante las formulas simplificadas del ASCE 7, así mismo se observa que contrariamente a la teoría sobre interacción suelo estructura, el cortante en la base resulta se incrementa y el momento en la base disminuye. Respecto al desplazamiento máximo en la parte superior se observa que disminuye muy ligeramente.

NUEVO APORTE RESPECTO A LA INTERACCION SUELO ESTRUCTURA:

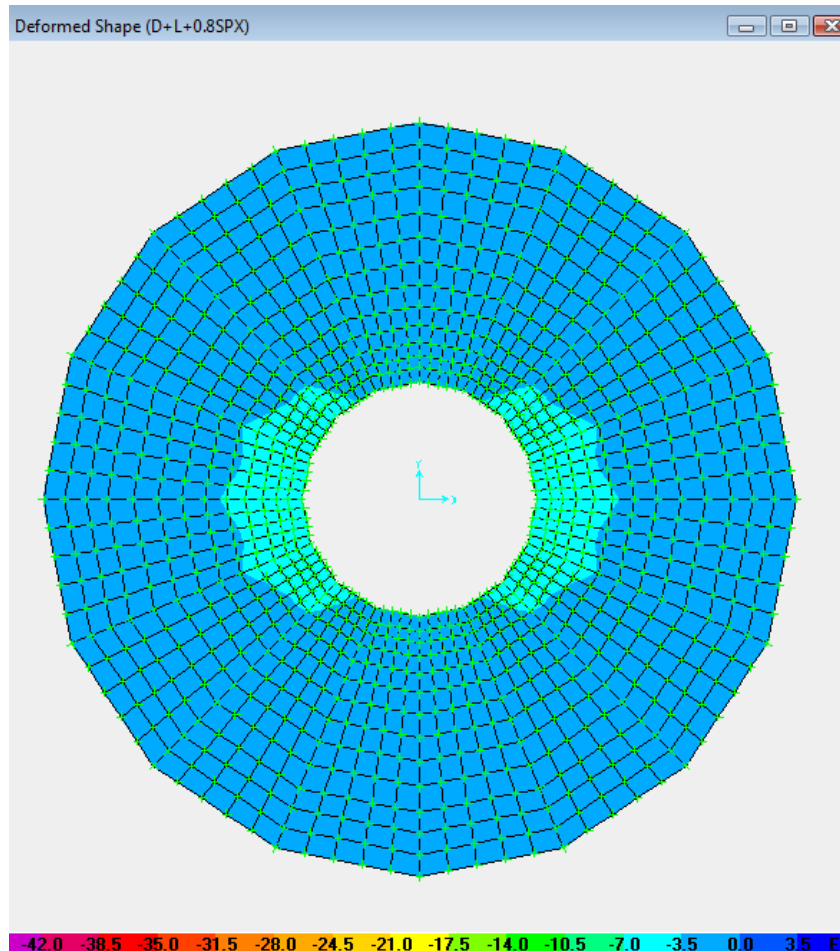
A pesar de que toda la bibliografía disponible, respecto al efecto de la interacción suelo estructura (ISE), indica que la fuerza cortante en la base siempre debe reducirse, esto no sucede en algunos, ya que para estructuras que tiene gran rigidez en la zona cercana a la base (como en el caso de la presente estructura - torre solar) o en los primeros niveles en el caso de edificios, se verifica que tomando en consideración el efecto de la interacción suelo estructura en suelos flexibles, la fuerza cortante en la base aumenta a medida que se incrementa la rigidez en la parte inferior de la estructura.

RESULTADOS DEL ANALISIS ESTRUCTURAL DE LA CIMENTACION:



Verificación de presiones en el terreno:

De acuerdo con lo establecido en el ítem 15.2.5 de la norma E-060 – Concreto Armado, para determinar los esfuerzos en el suelo, las acciones sísmicas podrán reducirse al 80% de los valores provenientes del análisis:



$$\delta_v = 0.00487\text{m}$$

Se observa que el máximo desplazamiento vertical en la platea de cimentación es de $\delta_v = 0.00487\text{m}$, este valor multiplicado por el coeficiente de balasto proporciona el esfuerzo en el terreno, es decir $\sigma = 0.00487 \times 2200 = 10.71 \text{ ton/m}^2 > \sigma_t = 10 \text{ ton/m}^2$, ¡**No conforme!**

Las presiones transmitidas al terreno son ligeramente superiores a la capacidad portante del terreno, por lo que es necesario utilizar pilotes a fin de poder reducir dichas presiones.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Units: As Noted Joint Displacements

	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	StepType Text	U1 m	U2 m	U3 m	R1 Radians	R2 Radians
	271	D+L+0.8SPX	Combination	Max	0.001758	0.000385	-0.001237	0.000017	0.000194
	271	D+L+0.8SPX	Combination	Min	-0.001676	-0.000469	-0.002234	-0.000046	-0.000223
	272	D+L+0.8SPX	Combination	Max	0.001478	0.000291	-0.001084	0.000016	0.000182
	272	D+L+0.8SPX	Combination	Min	-0.001371	-0.000337	-0.002386	-0.000031	-0.00022
	273	D+L+0.8SPX	Combination	Max	0	0	0.000056	0.00000119	0.000125
	273	D+L+0.8SPX	Combination	Min	0	0	-0.004611	-0.000001498	-0.000216
	274	D+L+0.8SPX	Combination	Max	0	0	-0.00101	0.0000002378	0.000113
	274	D+L+0.8SPX	Combination	Min	0	0	-0.002144	-0.0000002221	-0.000178
	275	D+L+0.8SPX	Combination	Max	0	0	-0.000955	0.0000003672	0.000199
	275	D+L+0.8SPX	Combination	Min	0	0	-0.002185	-0.0000002883	-0.000097
	276	D+L+0.8SPX	Combination	Max	0.000726	0.000028	-0.000851	0.000001447	0.000678
	276	D+L+0.8SPX	Combination	Min	-0.001541	-0.000029	-0.007259	-0.000001799	-0.00049
	277	D+L+0.8SPX	Combination	Max	0.001167	0.000027	-0.000859	0.000001899	0.00034
	277	D+L+0.8SPX	Combination	Min	-0.00205	-0.000028	-0.006869	-0.000002161	-0.00039
	278	D+L+0.8SPX	Combination	Max	0.001544	0.000026	-0.000739	0.000001992	0.000135
	278	D+L+0.8SPX	Combination	Min	-0.002292	-0.000028	-0.006606	-0.000002187	-0.000201
	279	D+L+0.8SPX	Combination	Max	0.001704	0.000027	-0.000577	0.000002923	-0.00001
	279	D+L+0.8SPX	Combination	Min	-0.002317	-0.000028	-0.00639	-0.000003079	-0.000089
	280	D+L+0.8SPX	Combination	Max	0.001711	0.000028	-0.000438	0.000004552	0.000021
	280	D+L+0.8SPX	Combination	Min	-0.002211	-0.000029	-0.006198	-0.000004624	-0.000109

Los pilotes a utilizar serán pilotes hincados de tubos de acero, y la capacidad de carga estará definida por el estudio de mecánica de suelos y de acuerdo al Ítem 26.2 de la norma E-050. El espaciamiento mínimo de los pilotes estará definido mediante la tabla N° 9 del Ítem 26.4 de la misma norma, es decir para longitudes entre $10 \leq L < 20$; $e = 4b$ (donde b = diámetro o mayor dimensión del pilote).

3.9.2 Cimentación profunda (Pilotes) para suelos cohesivos (37), (38)

A) Análisis y diseño de pilotes para cargas estáticas verticales

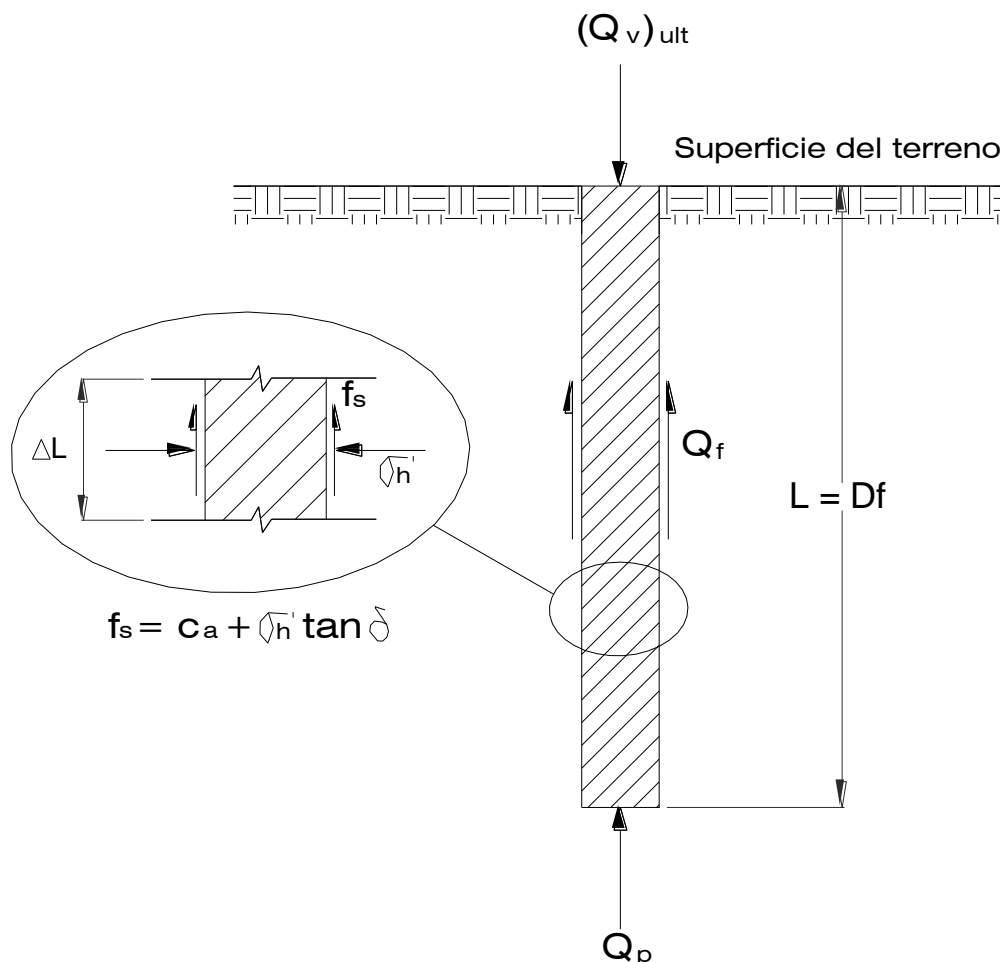
Los pilotes son usados generalmente en grupos, sin embargo, la capacidad de carga o carga de diseño es siempre determinada para un solo pilote. La carga de diseño puede determinarse para ambas consideraciones, de falla por corte o por asentamiento y es el menor de los siguientes valores:

1. Capacidad de carga obtenida dividiendo la carga ultima de falla entre el factor de seguridad y
2. Carga correspondiente al asentamiento permisible del pilote.

En la mayoría de las situaciones, el comportamiento de un solo pilote es diferente que el de un grupo de pilotes, sin embargo, el procedimiento desarrollado para determinar la capacidad de carga de un grupo de pilotes es obtenido del análisis para de un solo pilote.

En este capítulo se desarrollará el método usado en la práctica para calcular las cargas últimas y asentamientos de un grupo de pilotes en suelos cohesivos. Este método será diferente para pilotes sujetos bajo cargas de compresión axial, y pilotes con carga opuesta que tienden a sacarlo del lugar (pullout). Pilotes bajo cargas laterales serán desarrollados en el siguiente ítem.

Pilotes sujetos a carga de compresión axial



La figura de arriba muestra un pilote sujeto a carga vertical. Esta carga está dividida en la carga en la punta del pilote (Q_p) y la carga de fricción sobre su perímetro (Q_f). Si $(Q_v)_{ult}$ es la carga de compresión axial ultima aplicada en parte superior del pilote, esta resulta



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

de la suma de la carga en la punta y la carga de fricción alrededor del pilote, representada de la siguiente manera:

$$(Q_v)_{ult} = Q_p + Q_f \dots (1)$$

Donde $(Q_v)_{ult}$ es la capacidad ultima de carga del pilote, esta expresión puede ser ampliada de la siguiente manera:

$$Q_p = A_p [C N_c + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma + \gamma D_f N_q] \dots (2)$$

Donde:

Q_p = Capacidad de carga en el extremo o punta del pilote,

A_p = Área en el extremo del pilote,

C = Cohesión del estrato de suelo,

γ = Peso unitario del suelo,

N_c , N_γ y N_q = Parámetros de capacidad de carga, que dependen del ángulo de fricción del suelo,

B = Diámetro o ancho del pilote,

D_f = Profundidad del pilote medida desde la superficie del terreno

$$Q_f = p \sum_{L=0}^{L=L} f_s \Delta L \dots (3)$$

Donde:

Q_f = Capacidad de carga por fricción en el perímetro del pilote,

p = Perímetro del pilote,

f_s = Coeficiente de fricción sobre una determinada longitud ΔL ,

L = Longitud total del pilote

Para suelos cohesivos se tiene que el ángulo de fricción es igual a cero $\Phi=0$, así también se tiene que para la condición no drenada en suelos cohesivos $S_u = C_u = C$ y los factores de capacidad de carga $N_\gamma = 0$ y $N_q = 1$, por lo que la ecuación (2) toma la siguiente forma:

$$Q_p = A_p [C_u N_c + \gamma D_f N_q] \dots (4)$$



Si se realiza el ajuste debido al peso del pilote, la ecuación (4) puede aproximarse a la siguiente expresión:

$$Q_p = A_p [C_u N_c + \gamma D_f N_q] - \gamma D_f A_p \dots (5)$$

Desde que $N_q = 1$ para $\Phi = 0$, resulta:

$$Q_p = A_p C_u N_c \dots (6)$$

Capacidad del pilote por fricción (Q_f)

Para suelos cohesivos, aplicando el concepto de $\Phi = 0$, el coeficiente de fricción puede escribirse de la siguiente forma:

$$f_s = C + \sigma_h \tan \delta$$

Donde:

$$C = C_a = \text{adhesión entre el suelo y el pilote, } \delta = 2/3 \quad \Phi = 0, \\ f_s = C_a$$

Luego la ecuación (3) se convierte en:

$$Q_f = p \sum_{L=0}^{L=L_e} C_a \Delta L \dots (7)$$

Por lo tanto la capacidad de carga última del pilote en suelos cohesivos puede ser expresada de la siguiente forma:

$$(Q_v)_{ult} = A_p C_u N_c + p \sum_{L=0}^{L=L_e} C_a \Delta L \dots (8)$$

Donde:

A_p = Área en el extremo del pilote,

C_u = Esfuerzo cortante mínimo para la condición no drenada del suelo cohesivo

($C = C_u = S_u = q_u / 2$), valores aproximados en la tabla (1)

N_c = Factor de capacidad de carga, obtenido de la tabla (2) y (3)

p = Perímetro del pilote

L_e = Longitud efectiva del pilote, obtenido de la tabla (4)

C_a = Adhesión suelo pilote, obtenida del grafico (a)



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Se puede observar que el peso unitario del suelo no aparece en la última expresión, por lo que la posición del nivel freático no tiene efecto sobre la capacidad de carga del pilote en suelos cohesivos.

TABLA (1)
Valores estimados de $S_u = C_u$ (Terzaghi y Peck, 1967)

SPT Valores de N	Consistencia Estimada	Rango Estimado de $S_u = C_u$	
		kPa	Kips/pie ²
< 2	Muy blanda	< 12	< 0.25
2 – 4	Blanda	12 - 15	0.25 - 0.50
4 – 8	Firme	25 - 50	0.50 - 1.00
8 – 15	Rígida	50- 100	1.00 - 2.00
15 – 30	Muy rígida	100- 200	2.00 - 4.00
> 30	Dura	> 200	> 4.00

TABLA (2)
Valores de N_c para varias relaciones de profundidad con el diámetro (D_f / B)*

D_f / B	N_c
0	6.2
1	7.8
2	8.5
≥ 4	9

(*) Estos valores han sido obtenidos del gráfico presentado en el manual de diseño de cimentaciones y estructuras de tierra NAVFAC, DM 7.2, 1982



TABLA (3)

Valores de N_c para varios diámetros del pilote (B)*

Diámetro del pilote	N_c
Menor que 0.5m (\approx 1.5 pies)	9
Entre 0.5 a 1 m (\approx 1.5 a 3 pies)	7
Mayor que 1 m (\approx 3 pies)	6

(*) Manual de diseño canadiense de ingeniería de cimentaciones, 1985

TABLA (4)

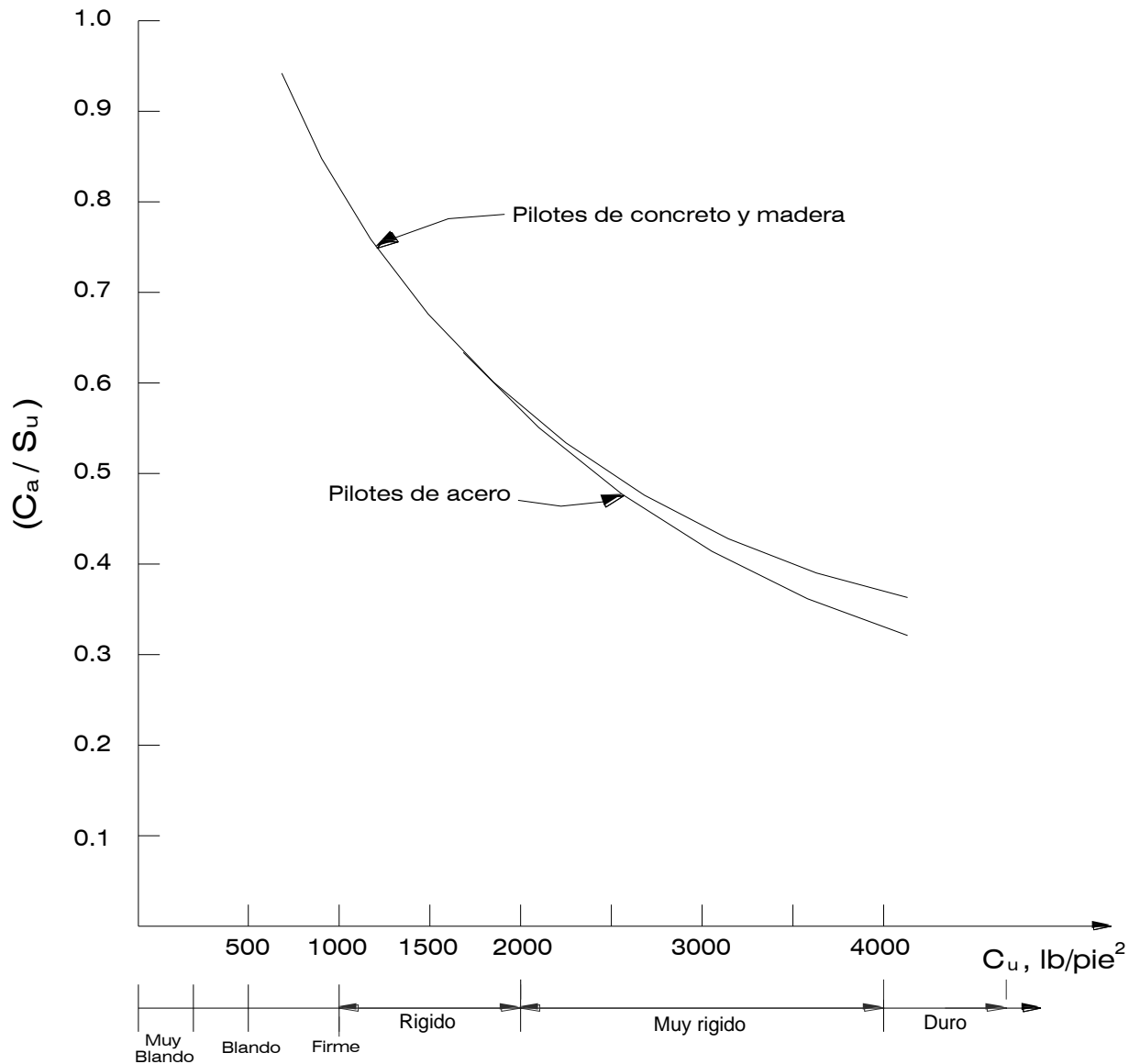
Longitud efectiva del pilote (L_e) en pilotes hincado y perforados*

Tipo de pilote	L_e
Pilotes hincados	L - (profundidad de variación estacional)
Pilotes perforados	L - (profundidad de variación estacional + 2 x diámetro del pilote)

(*) Basada en la experiencia documentada por Tomlinson (1977) y Sharma (1984)

La longitud efectiva del pilote, es la longitud que contribuye con la capacidad ficcional del pilote. Esta puede ser diferente a la longitud total (L) debido a que para la mayoría de pilotes, la parte superior no está muy cerca al contacto con el suelo, debido a factores causados por el hombre, las maquinarias y por las variaciones estacionales.

Esta longitud debería ser evaluada para una específica localización geográfica del área de trabajo. Para la mayoría de las situaciones, esta longitud puede variar entre 1m (3 pies) a 1.5m (5 pies).



Grafico(a): Variación de (C_a / S_u) con C_u para diferentes materiales de pilotes hincados (Desarrollado por Tomlinson, 1963).

Capacidad de carga de grupo de pilotes en suelos cohesivos

Si $(Q_v)_{ult}$ es la capacidad última de un solo pilote y $(Q_{vg})_{ult}$ es la capacidad última de un grupo de pilotes en suelos cohesivos luego, en general, se cumple que:

$$(Q_{vg})_{ult} \neq n (Q_v)_{ult}$$

Donde n es el número de pilotes del grupo.



No hay en la actualidad una teoría racional aceptable para el cálculo de la capacidad de carga de un grupo de pilotes, sin embargo para la mayoría de los casos prácticos, la carga última del grupo de pilotes $(Q_{vg})_{ult}$, puede ser estimada del menor de los siguientes valores:

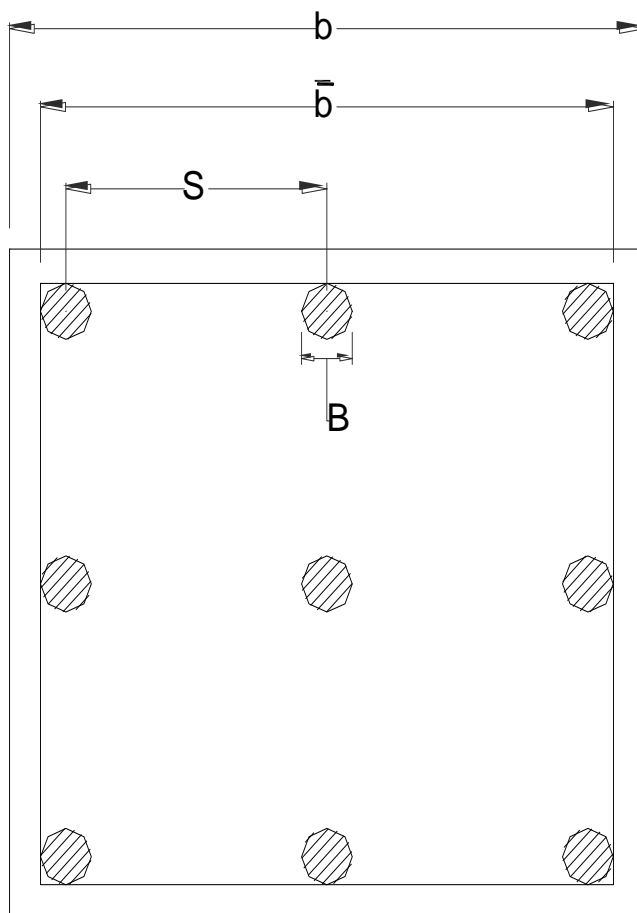
Acción de Grupo:

$$(Q_{vg})_{ult} = C_u N_c (\bar{b}^2) + 4C_u (\bar{b}) L_e \dots \dots (9)$$

Acción individual:

$$(Q_{vg})_{ult} = n (Q_v)_{ult}$$

Figura (a): Capacidad de carga de grupo de pilotes en suelos cohesivos

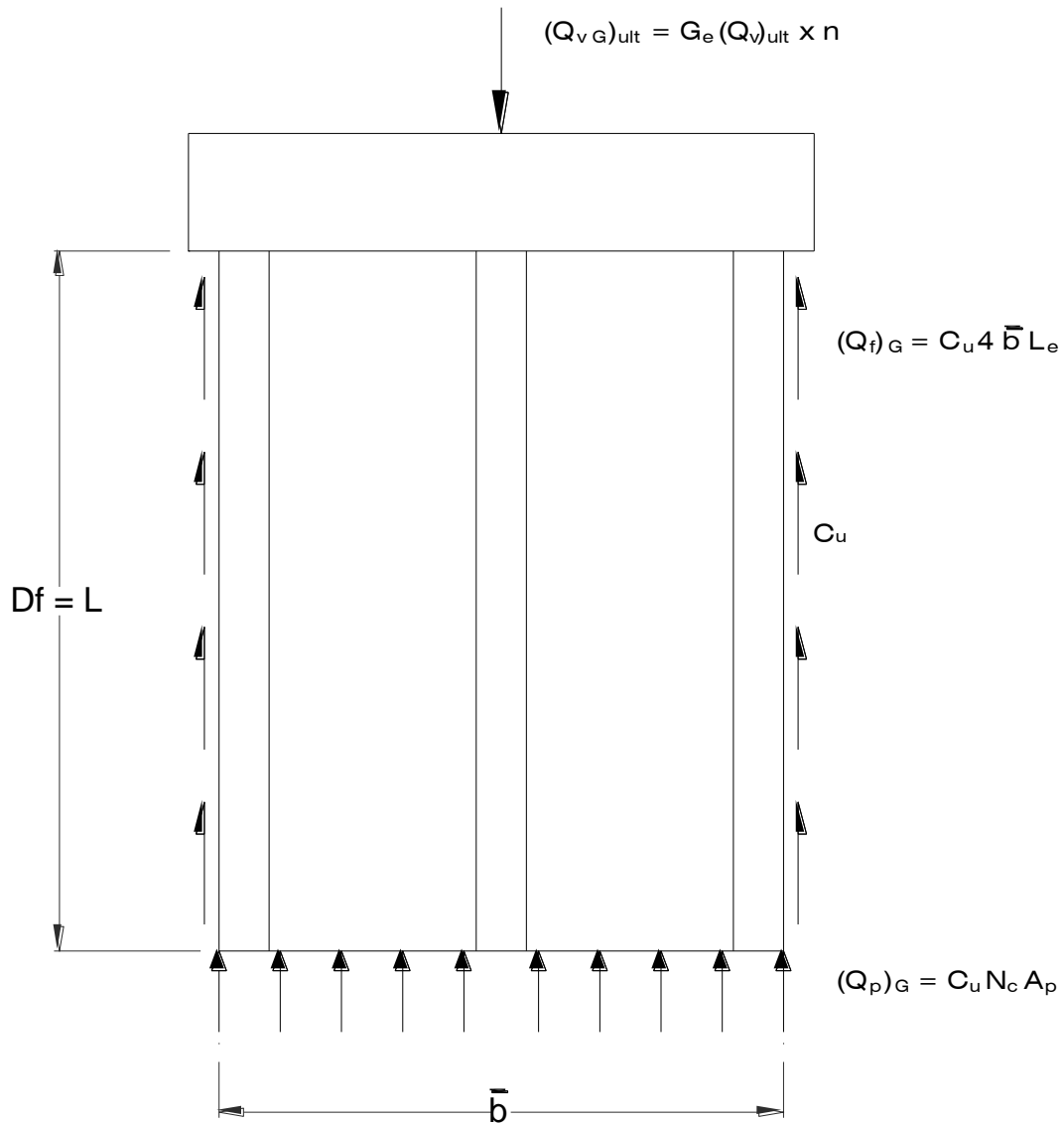


n = numero de pilotes
Le = L - profundidad de variacion estacional

Vista en planta de grupo de pilotes



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



Vista de la sección o elevación del grupo de pilotes

Si los pilotes están espaciados muy cerca uno del otro, la carga en la acción de grupo es menor que en la acción individual. La relación de la capacidad última del grupo de pilotes a la capacidad individual, está definida como la eficiencia del grupo de pilotes (G_e), así tenemos:

$$G_e = (Q_{vg})_{ult} / [n (Q_v)_{ult}]$$

$$(Q_{vg})_{ult} = G_e n (Q_v)_{ult} \dots\dots (10)$$

Los valores de la eficiencia de grupo (G_e) dependen de los parámetros del suelo, tamaño y forma del grupo, longitud y espaciamiento de los pilotes. Para efectos prácticos de



diseño para estimar la capacidad de un grupo de pilotes en suelos cohesivos, se presenta la tabla (5). Para determinar $(Q_{vg})_{ult}$, se tomará el menor valor obtenido de las ecuaciones (9) y (10).

TABLA (5)
Eficiencia de grupo de pilotes para diferentes espaciamientos*

Espaciamiento De pilotes	3B	4B	5B	6B	8B
Eficiencia de grupo (G_e)	0.7	0.75	0.85	0.90	1.0

(*) Estos valores están basados en datos experimentales obtenidos por Whitaker (1957) y presentado en gráficos en el manual de diseño de cimentaciones y estructuras de tierras, DM-7.2 (1982)

Asentamientos de pilotes en suelos cohesivos

El asentamiento de pilotes en suelos cohesivos resulta de la suma de los siguientes dos componentes:

- a. Asentamiento de corto termino ocurrido cuando la carga es aplicada
- b. Asentamiento debido a la consolidación de largo término, ocurrido gradualmente cuando el exceso de la presión de poro generado por la carga se disipa

Generalmente, el asentamiento de corto término resulta de la compresión elástica del suelo cohesivo. Esta componente de asentamiento constituye una porción significativa del asentamiento total para suelos cohesivos parcialmente saturados y sobre saturados consolidados.

a. Asentamiento de corto termino

- (i) **Método Semi-empírico.-** Para propósitos de diseño, el asentamiento de un pilote puede expresarse mediante las siguientes tres componentes:

$$S_t = S_s + S_p + S_{ps} \dots (11)$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Donde:

S_t = Asentamiento total de un pilote individualmente

S_s = Asentamiento debido a la deformación axial del eje del pilote

S_p = Asentamiento del pilote en la base

S_{ps} = Asentamiento del pilote causado por la carga transmitida a lo largo del eje del pilote

Estos tres componentes son calculados separadamente para luego sumarse:

$$S_s = (Q_{pa} + \alpha_s Q_{fa}) L / (A_p E_p) \dots \dots \dots (12)$$

Donde:

Q_{pa} = Carga actual transmitida en la base del pilote en el rango de esfuerzos de servicio

Q_{fa} = Carga actual de fricción a lo largo del pilote en el rango de esfuerzos de servicio

L = Longitud del pilote

A_p = Área transversal del pilote

E_p = Modulo de elasticidad del pilote

α_s = Numero que depende de la distribución de la fricción a lo largo del eje del pilote

Vesic (1977) recomienda que $\alpha_s = 0.5$ para una distribución uniforme o parabólica de la fricción a lo largo del pilote y para una distribución triangular $\alpha_s = 0.67$. Sin embargo para efectos prácticos, cualquiera de los valores de α_s , proveerá valores razonables en la estimación del asentamiento.

TABLA (6)
Valores típicos del coeficiente C_p (Vesic, 1977)

Tipo de suelo	Pilotes hincados	Pilotes excavados
Arena (densa o suelta)	0.02 – 0.04	0.09 – 0.18
Arcilla (rígida o suave)	0.02 – 0.03	0.03 – 0.06
Limo (denso o suelto)	0.03 – 0.05	0.09 – 0.12

Las siguientes relaciones han sido establecidas basadas en análisis teórico y correcciones empíricas entre las propiedades del suelo y la capacidad ultima de resistencia (q_p) para un número de construcciones reportado por Vesic (1977).

$$S_p = C_p Q_{pa} / (B q_p) \dots \dots (13)$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

$$S_{ps} = C_s Q_{fa} / (D_f q_p) \dots (14)$$

Donde:

C_p = Coeficiente empírico (Tabla 6)

$C_s = 0.93 + 0.16 * (D_f / B)^{1/2} * C_p$

Q_{pa} = Carga neta por punta, bajo condiciones de servicio o permisible

Q_{fa} = Carga del pilote por fricción bajo condiciones de servicio o permisibles

Q_p = Capacidad de carga ultima del suelo en la punta (fuerza/área)

B = Perímetro del pilote

$D_f = L$ = Longitud del pilote embebido.

En estas estimaciones, se ha asumido que los estratos de soporte bajo el extremo del pilote se extiende al menos 10 veces el diámetro del pilote debajo de su base, también, el suelo debajo debe tener una rigidez similar o mayor.

(ii) **Método Empírico.**- Los asentamientos o desplazamientos del pilote para cargas de servicio pueden ser estimados con las siguientes relaciones (Vesic, 1970).

$$S_t = B/100 + (Q_{va} L) / (A_p E_p) \dots (15)$$

Donde:

S_t = Asentamiento en la cabeza del pilote

B = Diámetro del pilote

Q_{va} = Carga aplicada al pilote

A_p = Área de la sección transversal del pilote

L = Longitud del pilote

E_p = Modulo de elasticidad del material del pilote

El asentamiento es luego el mayor valor obtenido de (i) y (ii) de los métodos descritos anteriormente.

El asentamiento del grupo de pilotes está determinado por la siguiente expresión:

$$S_G = S_t * (\bar{b} / B)^{1/2} \dots (16)$$



b. Asentamiento de largo término (consolidación)

La estimación del asentamiento del grupo de pilotes en suelos cohesivos es muy compleja, la figura (c) muestra un método simple para estimar el asentamiento de un grupo de pilotes en suelos cohesivos.

Este método aproximado está basado en las siguientes suposiciones:

1. El presión admisible del suelo = $q_{total} = (Q_{vG})_{total} / (\bar{b} \times \bar{l})$, donde \bar{b} y \bar{l} son las dimensiones de la base del grupo de pilotes en la punta.
2. La presión total q_{total} es transferida a los $(2/3) \times L$, profundidad medida desde la superficie del terreno. El asentamiento del suelo debajo de esta profundidad se asume que es muy pequeña, por lo se desprecia.
3. Luego el asentamiento estimado como si la base de dimensiones $\bar{b} \times \bar{l}$ con presión q_{total} está ubicada a $2/3 L$.
4. Una vez aplicada la presión q_{total} en la parte superior del estrato de arcilla de espesor $(H-2/3L)$, luego el asentamiento por consolidación, ΔH , puede ser calculada de la siguiente relación:

$$\Delta H = [C_c / (1+e_0)] [H - 2/3L] \times \log_{10} [(\sigma'_v + \Delta\sigma'_v) / \sigma'_v] \dots \dots \dots (16)$$

Donde:

ΔH = Asentamiento por consolidación.

σ'_v = Presión efectiva (vertical), sobre presión en el medio del estrato $(H-2/3L)$, determinado como se muestra en la figura (c).

$\Delta\sigma'_v$ = Incremento de presión de la carga del pilote en el medio del estrato $(H-2/3L)$.

C_c = Coeficiente de consolidación.

e_0 = Relación de vacio inicial del suelo.

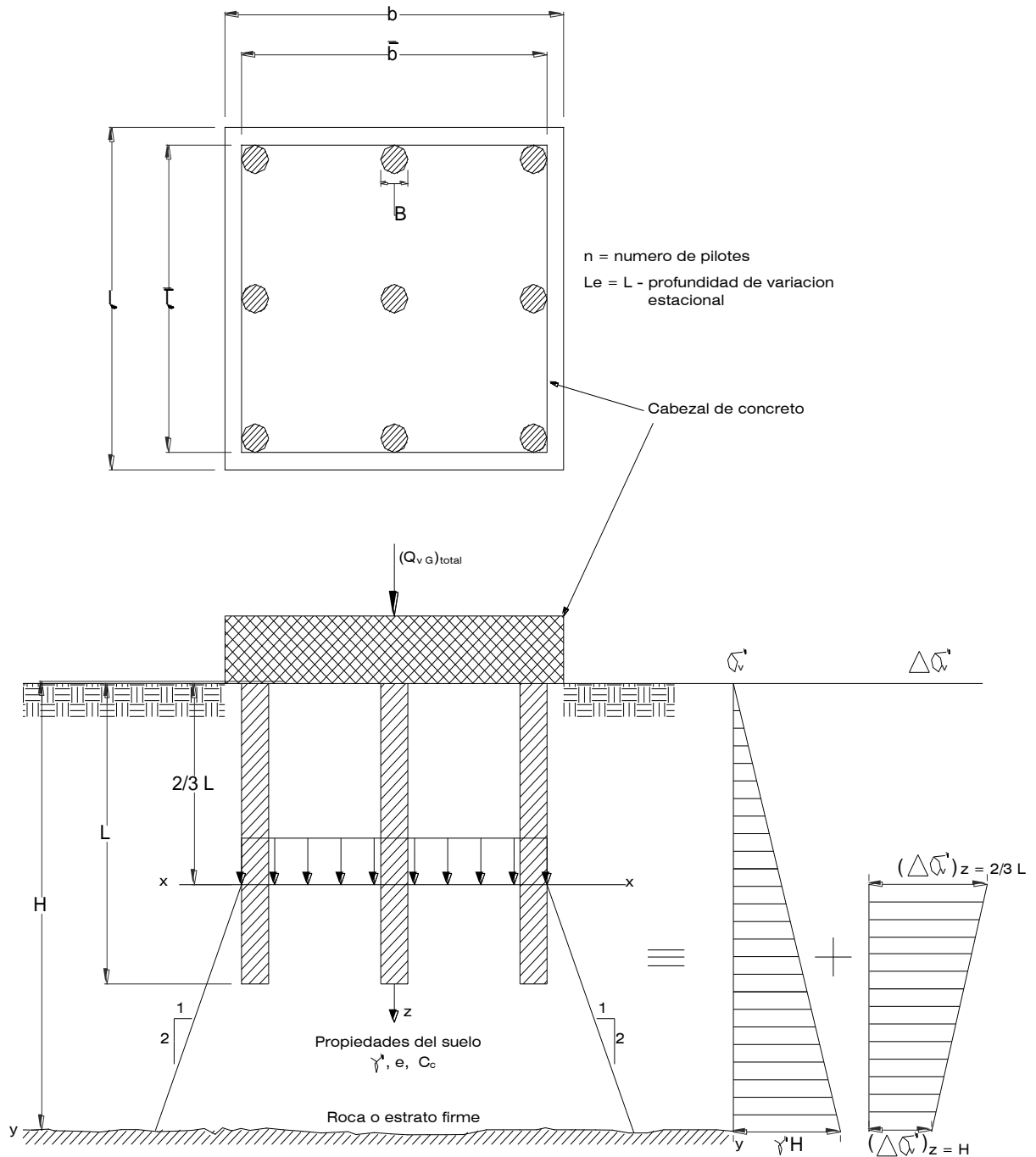


Figura (b): Distribución de esfuerzos para la estimación de asentamientos para fricción de pilotes en arcillas – Vista en planta y corte transversal.

La figura (b) muestra un grupo de pilotes con $b \times l$ de tamaño del cabezal del grupo.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Si se asume que la carga (Q_{vG}) total es transferido a $2/3 L$ de la profundidad debajo de la superficie del terreno, el incremento del esfuerzo en esta profundidad (nivel xx) será:

$$(\Delta\sigma'_v)_{z=2/3L} = (Q_{vG})_{total} / (\bar{b} \times \bar{l}) \dots\dots (17)$$

Para la distribución de esfuerzo debajo dl nivel (xx), se asume que la presión (o esfuerzo) es distribuido en una pendiente $2V:1H$, tal como se muestra en la figura (b). Basada en esta suposición, el incremento de esfuerzos en el plano (yy) a una profundidad $z = H$ puede obtenerse de la siguiente forma:

$$(\Delta\sigma'_v)_{z=H} = (Q_{vG})_{total} / (\bar{b} + H - 2L/3) (\bar{l} + H - 2L/3) \dots\dots (18)$$

El incremento de esfuerzos en un nivel intermedio entre (xx) e (yy) puede luego ser determinado por interpolación.

La ecuación (16) es usada cuando las arcillas están normalmente consolidadas. Para arcillas sobre consolidadas, el cálculo del asentamiento requiere que el asentamiento se divida en dos componentes como sigue:

$$H = \Delta H_1 + \Delta H_2 \dots\dots (19)$$

Donde:

ΔH_1 = Asentamiento debido a la carga aplicada en la zona de re compresión

ΔH_2 = Asentamiento debido a la carga aplicada en la zona la curva virgen

Así, ΔH_1 y ΔH_2 pueden estimarse de las siguientes formulas:

$$\Delta H_1 = [C_r / (1+e_0)] [H - (2/3) L] \log_{10} [\bar{p}_c / \sigma'_v] \dots\dots (20)$$

$$\Delta H_2 = [C_c / (1+e_0)] [H - (2/3) L] \log_{10} (\sigma'_v + \Delta \sigma'_v) / \bar{p}'_c \dots\dots (21)$$



**DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE CARGA VERTICAL DE PILOTES EN
SUELO COHESIVO PARA LA CIMENTACION DE LA TORRE SOLAR**

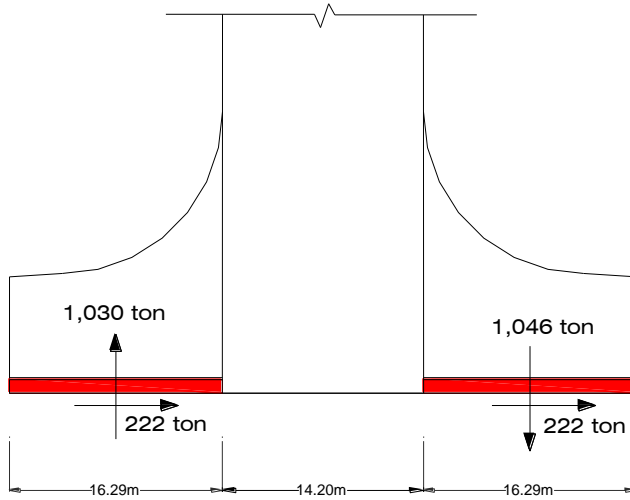
Procedimiento de diseño para pilotes en suelos cohesivos:

- 1.- Perfil del suelo.** Del estudio de suelos, se debe determinar la estratigrafía del suelo así como el nivel freático, capacidad portante y propiedades del suelo.
- 2.- Dimensiones del pilote y capacidad admisible de carga.** Se debe seleccionar un tipo de pilote, longitud y diámetro y calcular la capacidad admisible de carga para un pilote individual basado en las ecuaciones de capacidad de carga para suelos cohesivos.
- 3.- Numero de Pilotes.** Determinar el número de pilotes requeridos dividiendo la carga aplicada entre la capacidad de carga admisible de un pilote individual. Determinar el arreglo de los pilotes en el grupo (espaciamiento) en función del diámetro del pilote (según la Norma Técnica E-050), establecer las dimensiones del cabezal de los pilotes, si es demasiado largo, incrementar la longitud de pilotes y/o diámetro y repetir el paso 2 hasta obtener dimensiones razonables así como un arreglo adecuado de los pilotes. La capacidad del grupo de pilotes es luego el menor de los valores obtenidos por dos (02) fórmulas descritas para la capacidad de grupo de pilotes en suelos cohesivos.
- 4.- Asentamiento de los pilotes.** El asentamiento de pilotes en suelos cohesivos es la suma de los asentamientos de corto término y largo término. Para asentamientos de corto término se calcula primero el asentamiento para un pilote individual. Luego este valor es usado para estimar el asentamiento de corto término del grupo de pilotes. Para el cálculo de asentamientos de corto término se usan los métodos Semi Empírico y Empírico y para el asentamiento de largo término se utilizan las expresiones para suelos consolidados y para suelos sobre consolidados.
- 5.- Pruebas de carga del pilote y criterios de hincado.** Se recomienda una prueba de carga de pilotes para afinar la capacidad de carga admisible. Si se opta por pilotes hincados, especificar los criterios de hincado que serán complementados con las pruebas de carga.



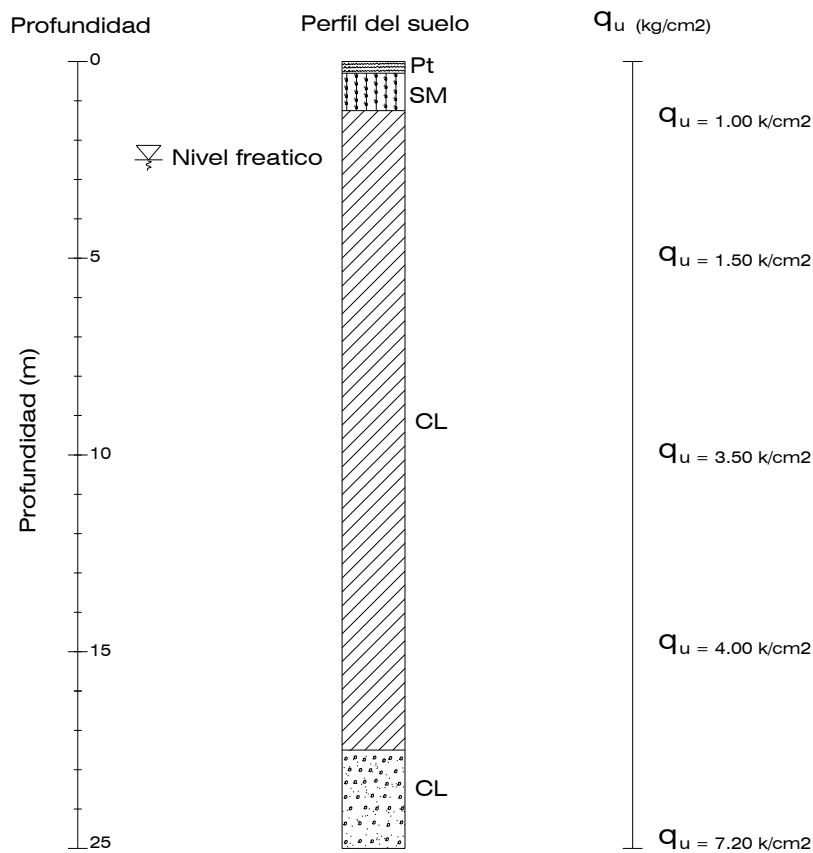
TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

De los resultados obtenidos del análisis estructural de la torre solar, se tiene:



Para el estado de carga:
 (D + L + 0.8 SPX)
 NORMA E-060 / RNE
 Cap. 15 – Ítem 15.2.5

1.- Perfil del suelo. De acuerdo al suelo promedio de la ciudad de Nauta, se puede asumir el siguiente perfil:



Relacion de Sobre consolidacion de la arcilla entre 6 y 8



2.- Dimensiones del pilote y capacidad admisible de carga para suelos cohesivos

$$(Q_v)_{ult} = A_p C_u N_c + p \sum_{L=0}^{L=L_e} C_a \Delta L \quad (\text{ecuación 8})$$

Debido a la configuración y geometría de la estructura, se usaran pilotes de acero de $B = 10''$ (27.3cm) diámetro, ASTM A-53 G°B – Schedule 80, y una profundidad de hincado $D_f = 25m$.

$$A_p = \pi/4(B)^2 = \pi/4(27.3)^2 = 585.35\text{cm}^2, \quad \text{área de la sección transversal del pilote}$$

$$p = \pi B = 85.76\text{cm}, \quad \text{perímetro del pilote}$$

$$q_u = (1 + 1.5 + 3.5 + 4.0) / 4 = 2.50 \text{ kg/cm}^2, \quad \text{promedio de capacidad ultima del suelo para la fricción a lo largo del pilote.}$$

$$C_u = \bar{q}_u / 2 = 2.50 / 2 = 1.25 \text{ kg/cm}^2, \quad \text{promedio del esfuerzo cortante no drenado (fricción)}$$

$$C_u = q_u / 2 = 7.20 / 2 = 3.60 \text{ kg/cm}^2, \quad \text{esfuerzo cortante no drenado en la base del pilote}$$

$$D_f / B = 25 / 0.273 = 91.58 > 4, \quad \text{de la tabla (2), } N_c = 9$$

$$\text{Para } B = 0.273\text{m}, \text{ como } B < 0.5\text{m}, \quad \text{de la tabla (3), } N_c = 9$$

$$\text{Del grafico (a) para } C_u = 1.25 \text{ kg/cm}^2 \Leftrightarrow 2,555 \text{ lb/pie}^2 \Rightarrow C_a / C_u = 0.48$$

$$C_a = 0.48 C_u = 0.48 S_u = 0.48 (1.25) = 0.60 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{De la tabla (4), } L_e = L - 1.5\text{m} = 25 - 1.5 = 23.50\text{m} \Leftrightarrow 2,350\text{cm}$$

Reemplazando valores en la ecuación (8), se tiene:

$$(Q_v)_{ult} = 585.35 \times 3.6 \times 9 + 85.76 \times 0.6 \times 2,350 = 139,887 \text{ kg} \Leftrightarrow 139.89 \text{ ton}$$

$$Q_p = 18.97 \text{ ton} \quad Q_f = 120.92 \text{ ton}$$

$$(Q_v)_{ult} = Q_p + Q_f = 139.89 \text{ ton}$$

$$\text{Factor de seguridad: } FS = 3$$

$$(Q_v)_{total} = (Q_v)_{ult} / FS = 46.63 \text{ ton}$$



3.- Número de pilotes.- El número de pilotes necesarios para soportar la carga de 1,046 ton será:

$$n = Q_{vG} / (Q_v)_{total} = 1,046 / 46.63 = 22.43 \quad (\text{es decir } 23 \text{ pilotes})$$

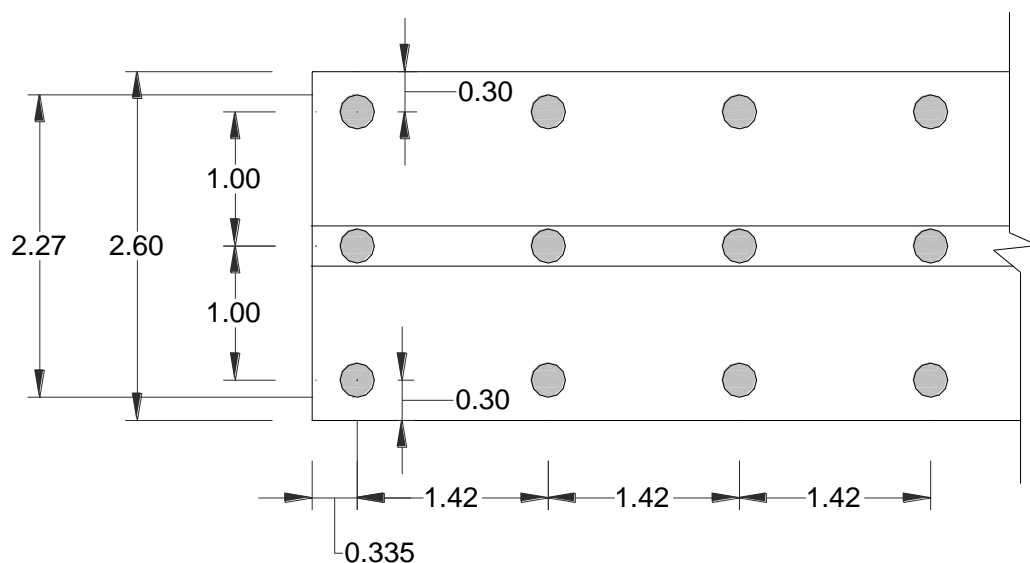
Se debe tener en cuenta que la capacidad de carga de un grupo de pilotes en suelos cohesivos es menor que la suma de la capacidad de carga de los pilotes en forma individual, por lo que evaluaremos la capacidad de carga del grupo de pilotes y de esa manera calcular el número de pilotes necesarios.

Según la Norma técnica E-050 (tabla 9 – ítem 26.4) y teniendo en cuenta que la longitud del pilote es de 20m, le corresponde un espaciamiento de 4B, es decir 1m de espaciamiento.

Se calculará la capacidad de carga del grupo de pilotes considerando los dos métodos descritos anteriormente, primero se utilizará la siguiente expresión:

$$(Q_{vg})_{ult} = C_u N_c (\bar{b}^2) + 4C_u (b) L_e$$

Si se utiliza 3 pilotes por fila, se tendrá en el presente caso: $b = 2.60\text{m}$ y $\bar{b} = 2.27\text{m}$



$$D_f / b = 25 / 2.6 = 9.62 > 4, \quad \text{de la tabla (2),} \quad N_c = 9$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Para $b = 2.6\text{m}$, como $b > 1.0\text{m}$, de la tabla (3), $N_c = 6$

$$(Q_{vg})_{ult} = 3.6 \times 6 \times (227)^2 + 4 \times 1.25 \times (227) \times (2,350) = 3,780,276 \text{ kg} \approx 3,780 \text{ ton}$$

$$(Q_{vg})_{total} = (Q_{vg})_{ult} / FS = 3,780 / 3 = 1,260 \text{ ton} > 1,046 \text{ ton} \quad \text{¡CONFORME!}$$

Usando el concepto de eficiencia de grupo:

$$(Q_{vg})_{ult} = G_e \cdot n \cdot (Q_v)_{ult}$$

$$S = 1.00\text{m}, \quad B = 0.273\text{m} \Rightarrow S / B = 4$$

De la tabla (5), $G_e = 0.75$, el numero de pilotes a usar será $n = 36$

$$(Q_v)_{ult} = 139.89 \text{ ton}, \text{ para un pilote individual calculado anteriormente}$$

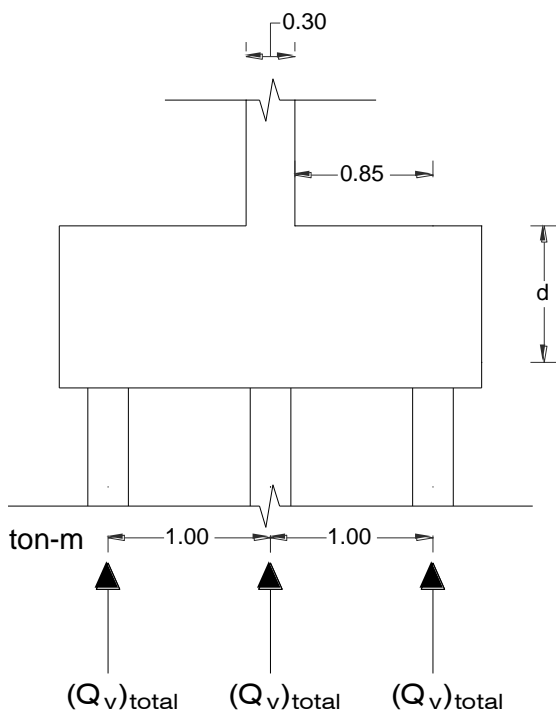
$$(Q_{vG})_{ult} = 0.75 \times 36 \times 139.89 = 3,777 \text{ ton}$$

$$(Q_{vG})_{total} = 3,777 / 3 = 1,259 \text{ ton} > 1,046 \text{ ton} \quad \text{¡CONFORME!}$$

El menor valor de $(Q_{vG})_{total}$ calculado según ambos procedimientos es de 1,259 ton, por lo que se considera como:

$$(Q_{vG})_{total} = 1,259 \text{ ton.}$$

Calculo del peralte del cabezal



$$f'_c = 21 \text{ MPa}$$

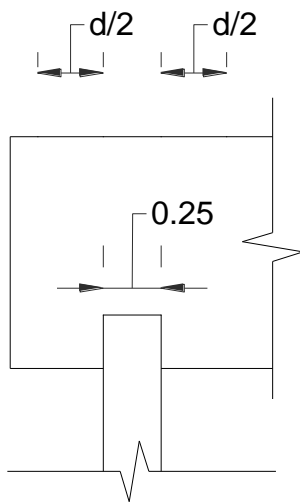
$$(Q_v)_{total} = 46.63 \text{ ton}$$

$$\Rightarrow V_u = 1.4 \times 46.63 = 65.28 \text{ ton}$$

$$M_u (-) = 65.28 \times 0.85^2 / 2 = 23.58$$



Verificación por Punzonamiento:



Para $d = 0.40\text{m}$. (Peralte mínimo para pilotes)

$$V_c = 1.06 (f'_c)^{1/2} (b_o) (d)$$

b_o = Perímetro de punzonamiento

$$b_o = \pi (d/2 + 27.3 + d/2) = 211.43\text{cm}$$

$$V_c = 1.06 (210)^{1/2} (211.43) (40) = 129,910 \text{ kg} \approx 129.9 \text{ ton}$$

$$V_u / \phi \leq V_c$$

$$V_u = 65.28 \text{ ton}$$

$$V_u / \phi = 65.28 / 0.85 = 76.80 \text{ ton} < 129.9 \text{ ton} \text{ ¡CONFORME!}$$

Verificación por Cortante:

De acuerdo al RNE (D.S. N° 010-2009 Vivienda)

$V_c = 0.17 (f'_c)^{1/2} b_w d$, Resistencia nominal al cortante del concreto

f'_c , expresado en MPa

b_w y d expresado en mm

V_u y V_c expresado en N

$$V_u = 65.28 \text{ ton} \approx 640,178 \text{ N}$$

$$V_c = 0.17 (21)^{1/2} (1000) (d) = V_u / \phi = 640,178 / 0.85 = 753,150 \Rightarrow d = 967\text{mm}$$

Tomamos como $d = 0.96\text{m}$ y $h = 1.00\text{m}$

Para: $M_u = 23.58 \text{ ton-m}$

$$f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_y = 4,200 \text{ kg-cm}^2$$

$d = 74\text{cm}$ (por la configuración de los pilotes - ver detalle)

Se obtiene un área de acero $A_s = 12.29\text{cm}^2$

$$A_{s \text{ min}} = 0.0018 b h = 0.0018 \times 100 \times 100 = 18\text{cm}^2 \text{ (RNE)}$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

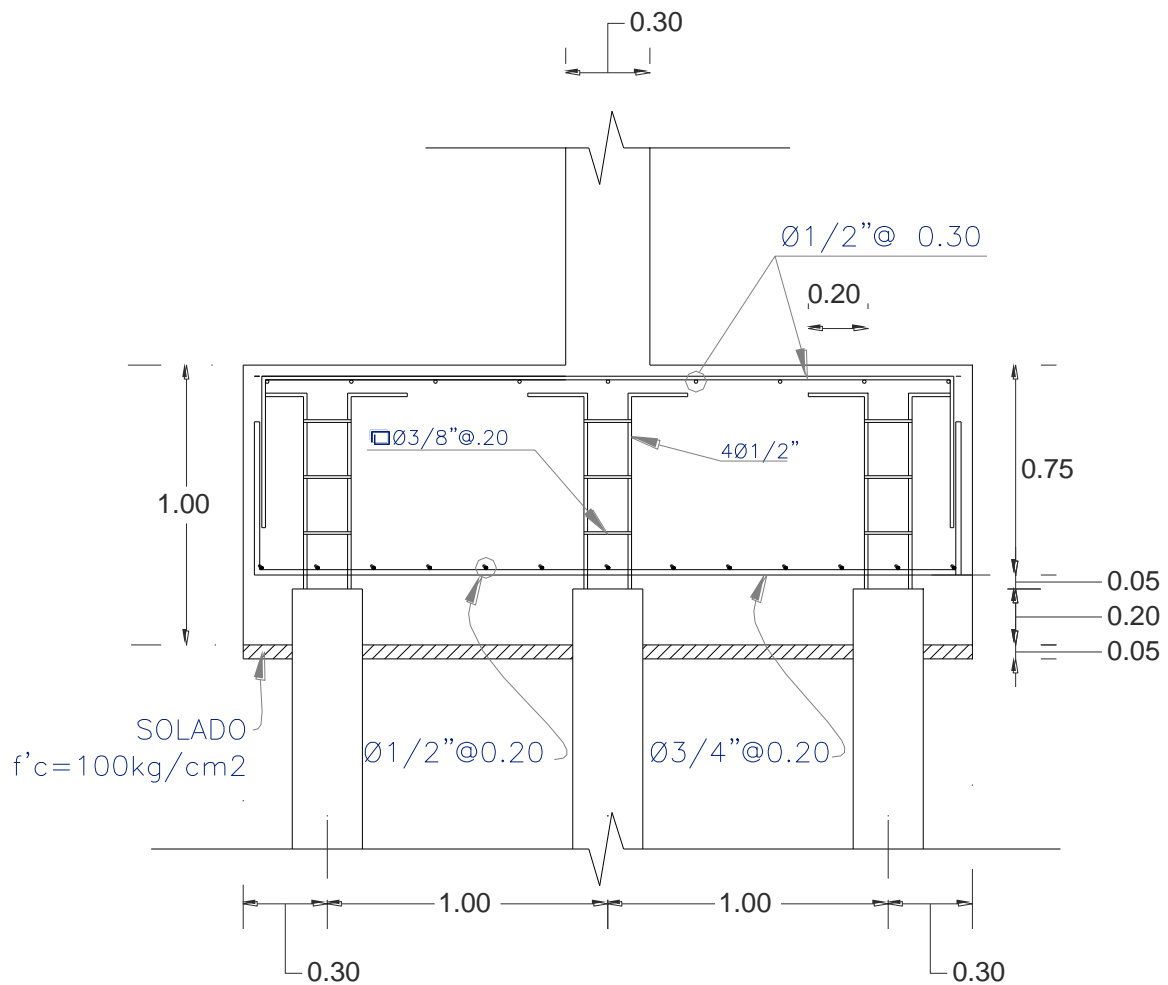
$A_{s \text{ min}} = 0.0012 b h = 0.0012 \times 100 \times 100 = 12\text{cm}^2$ (acero mínimo en tracción por flexión)

Se colocará $\emptyset 3/4'' @ 0.20 = 14.25\text{cm}^2$, en la dirección principal

$\emptyset 1/2'' @ 0.20 = 6.35\text{cm}^2$, en la dirección perpendicular

Total = $14.25 + 6.35 = 20.16\text{cm}^2 > 18\text{cm}^2$ ¡CONFORME!

Detalle de refuerzo en el cabezal de los pilotes



El peso del cabezal de los pilotes es: $(2.6 \times 16.29 \times 1.00) \text{ m}^3 \times 2.4 \text{ ton/m}^3 = 102 \text{ ton}$

Carga total en el grupo de pilotes = $1,046 \text{ ton} + 102 \text{ ton} = 1,148 \text{ ton}$

$(Q_{vG})_{\text{total}} = 1,259 \text{ ton} > 1,148 \text{ ton}$ ¡CONFORME!

$(Q_{vG})_{\text{total}} = 1,259 \text{ ton.}$



4.- Asentamiento de pilote individual y grupo de pilotes

(a) Asentamiento de corto término

(i) Método Semi empírico

$$S_t = S_s + S_p + S_{ps} \dots \dots \dots (22)$$

$$S_t = (Q_{pa} + \alpha_s Q_{fa}) L / (A_p E_p) + C_p Q_{pa} / (B q_p) + C_s Q_{fa} / (D_f q_p)$$

Carga total por grupo de pilotes = 1,259 ton

La carga por pilote será = 1,259 / 36 = 36.97 ton.

De los cálculos realizados en la sección anterior se tiene que $Q_p = 18.97$ ton, $Q_{p \text{ total}} = 18.97 / 3 = 6.32$ ton, también $Q_f = 120.92$ ton, $Q_{f \text{ total}} = 120.92 / 3 = 40.31$ ton, la capacidad de carga total es $6.32 + 40.31 = 46.63$ ton, mientras que la carga actual por pilote es de 36.97 ton, por lo que los valores de Q_p y Q_f serán proporcionales:

$$(Q_p)_{\text{actual}} = 6.32 (36.97 / 46.63) = 5.01 \text{ ton} = Q_{pa}$$

$$(Q_f)_{\text{actual}} = 40.31 (36.97 / 46.63) = 31.96 \text{ ton} = Q_{fa}$$

$$L = 2,500\text{cm}, \quad A_p = 585.35\text{cm}^2, \quad E_p = 2.1\text{E}+06 \text{ kg/cm}^2$$

$\alpha_s = 0.5$ (distribución uniforme), de la tabla (6)

$$C_p = 0.003, \quad B_p = B_b = 27.3\text{cm},$$

$$q_p = Q_p / A_{\text{base}} = 18,970 / 585.35 = 32.41 \text{ kg/cm}^2$$

$D_f = 2,500\text{cm}$ y de la expresión $C_s = (0.93 + 0.16 (D_f / B)^{1/2}) C_p$

$$C_s = (0.93 + 0.16 (2,500 / 27.3)^{1/2}) 0.03 = 0.074$$

Reemplazando valores se tiene:

$$S_s = (5,010 + 0.5 \times 31,960) 2,500 / (585.35 \times 2.1\text{E}+06) = 0.043\text{cm}$$

$$S_p = 0.03 \times 5,010 / (27.3 \times 32.41) = 0.17\text{cm}$$

$$S_{ps} = 0.074 \times 31,960 / (2500 \times 32.41) = 0.029\text{cm}$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

$$S_t = S_s + S_p + S_{ps} = 0.043 + 0.17 + 0.029 = 0.242\text{cm} \Rightarrow S_t = 2.42\text{mm}$$

(iii) Método Empírico

$$S_t = (B/100) + Q_{va} L / (A_p E_p)$$

$$B = 27.3\text{cm}, \quad Q_{va} = 36.97 \text{ ton}, \quad A_p = 585.35\text{cm}^2, \quad L = 2,500\text{cm}, \quad E_p = 2.1 \text{ E}+06 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_t = (27.3/100) + 36,970 \times 2,500 / (585.35 \times 2.1\text{E}+06) = 0.348 \text{ cm} \Rightarrow S_t = 3.48\text{mm}$$

El mayor valor obtenido mediante la utilización de ambos métodos el Semi empírico y el empírico es $S_t = 3.48\text{mm}$.

El asentamiento del grupo de pilotes se calcula utilizando la ecuación (16):

$$S_G = S_t * (\bar{b} / B)^{1/2}$$

$$\text{Para: } \bar{b} = 227\text{cm}, \quad B = 27.3\text{cm} \Rightarrow S_G = 0.348 (227 / 27.3)^{1/2} = 1.00\text{cm}$$

(b) Asentamiento de largo término (consolidación)

De acuerdo al perfil estratigráfico del suelo, la relación de sobre consolidación de las arcillas es mayor que 4, por lo que los asentamientos por consolidación son despreciables.

En conclusión, el asentamiento calculado para el grupo de pilotes $S_G = 1.00\text{cm}$ (0.39 pulg.) es menor que el asentamiento admisible de 0.75 pulg. (1.905cm), por lo tanto, el diámetro de diseño del pilote, longitud y distribución o arreglo de los pilotes es **¡CONFORME!**

B) Análisis y diseño de pilotes para cargas verticales en sentido contrario (PULLOUT)

La capacidad última de carga P_u para este tipo de carga en los pilotes, se puede calcular de manera similar a la capacidad última de los pilotes en compresión. La única diferencia será que la capacidad de carga en la punta (Q_p) será ignorado, excepto para pilotes en



**TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE**

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

forma de campana en la punta. La fuerza P_u es resistida solo por la parte de la resistencia por fricción Q_{fp} y el peso del pilote W_p , la expresión general para estimar la capacidad de carga de pilotes en sentido contrario será:

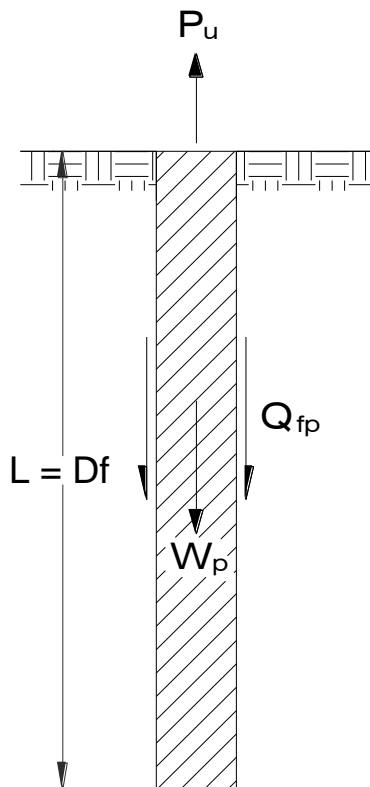
$$P_u = Q_{fp} + W_p \dots \dots \dots (23)$$

Donde:

P_u = Capacidad ultima de carga en pilotes en sentido contrario

Q_{fp} = Capacidad ultima de carga por fricción

W_p = Peso del pilote



Para suelos Cohesivos:

$$P_{total} = 1 / FS \left(\rho \sum_{L=0}^{L=Le} C_a \Delta L \right) + W_p$$

Para grupo de pilotes:

$$(PG)_{total} = n P_{total}$$

$$P_{total} = 1/3 (85.76 \times 0.6 \times 2,350) + W_p$$

Para, $L = 25m$ y $e = 1.509cm \Rightarrow W_p = 95.97 \text{ kg/ml}$

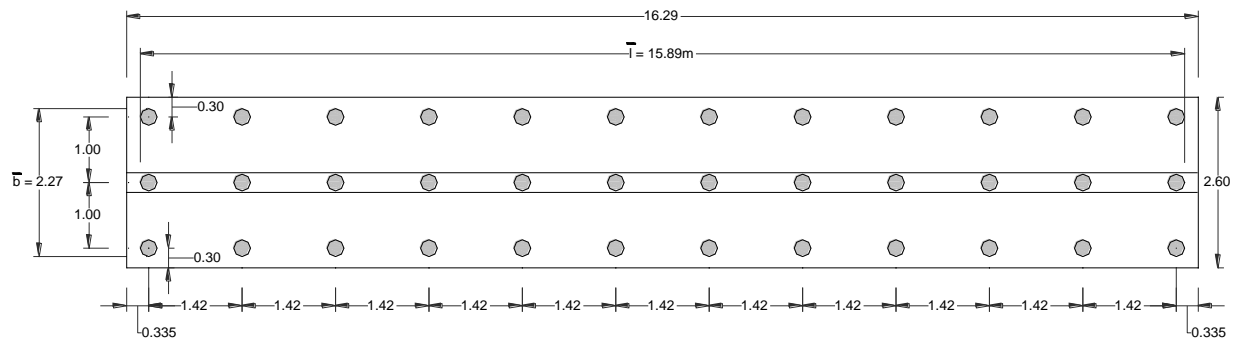
$$P_{total} = 40,307 + 95.97 \times 25 = 42,706 \text{ kg} \approx 42.71 \text{ ton}$$

$$(PG)_{total} = 36 \times 42.71 = 1,537 \text{ ton}$$

La capacidad de carga para el grupo de pilotes en el bloque encerrado por \bar{b} y \bar{l} , en la que el perímetro del bloque sería

$P = 2 (\bar{b} + \bar{l})$ y el peso dentro del grupo de pilotes será:

$$W_s = (\bar{b} + \bar{l}) L_e \gamma' \quad \Rightarrow \quad (PG)_{total} = 1 / FS [2 (\bar{b} + \bar{l}) L_e C_u + W_s]$$



Donde γ' es el peso unitario efectivo del suelo, es decir:

$$\gamma' = \gamma_{\text{suelo}} - \gamma_{\text{agua}} = 1.9 - 1 = 0.9 \text{ ton/m}^3 \quad \Leftrightarrow \quad 0.0009 \text{ kg/cm}^2$$

Para: $\bar{b} = 2.27\text{m} \Leftrightarrow 227\text{cm}$; $\bar{L} = 15.89\text{m} \Leftrightarrow 1,589\text{cm}$ y $L_e = 2,350\text{cm}$

$$(P_G)_{\text{total}} = 1/3 [2 (227 + 1,589) 2,350 \times 1.25 + (227 + 1,589) 2,350 \times 0.0009] = 3,557,614 \text{ kg}$$

$$(P_G)_{\text{total}} = 3,558 \text{ ton}$$

El menor valor obtenido para $(P_G)_{\text{total}} = 1,537 \text{ ton} > P_u = 1,030 \text{ ton}$ ¡CONFORME!

C) Análisis y diseño de pilotes para cargas laterales en suelos cohesivos

Además de la carga axial en los pilotes, actúan también cargas laterales y momentos. Existen dos tipos de condiciones de restricciones en la parte superior de los pilotes que se presentan en la práctica, la primera condición es sin restricciones (pilotes sin cabezal o sin restricciones - free head) y la segunda es llamada con cabezal o restringido (Fixed head - restringido contra la rotación pero sin restricciones a la traslación), tal como se muestra en la figura (c).

La carga lateral admisible en los pilotes es determinada por los dos siguientes criterios:

- 1.- La carga lateral admisible es obtenida dividiendo la carga última por un adecuado factor de seguridad.
2. La carga lateral admisible correspondiente a un desplazamiento lateral aceptable.

El menor valor obtenido de ambos criterios es el que se adopta como la carga lateral de diseño.

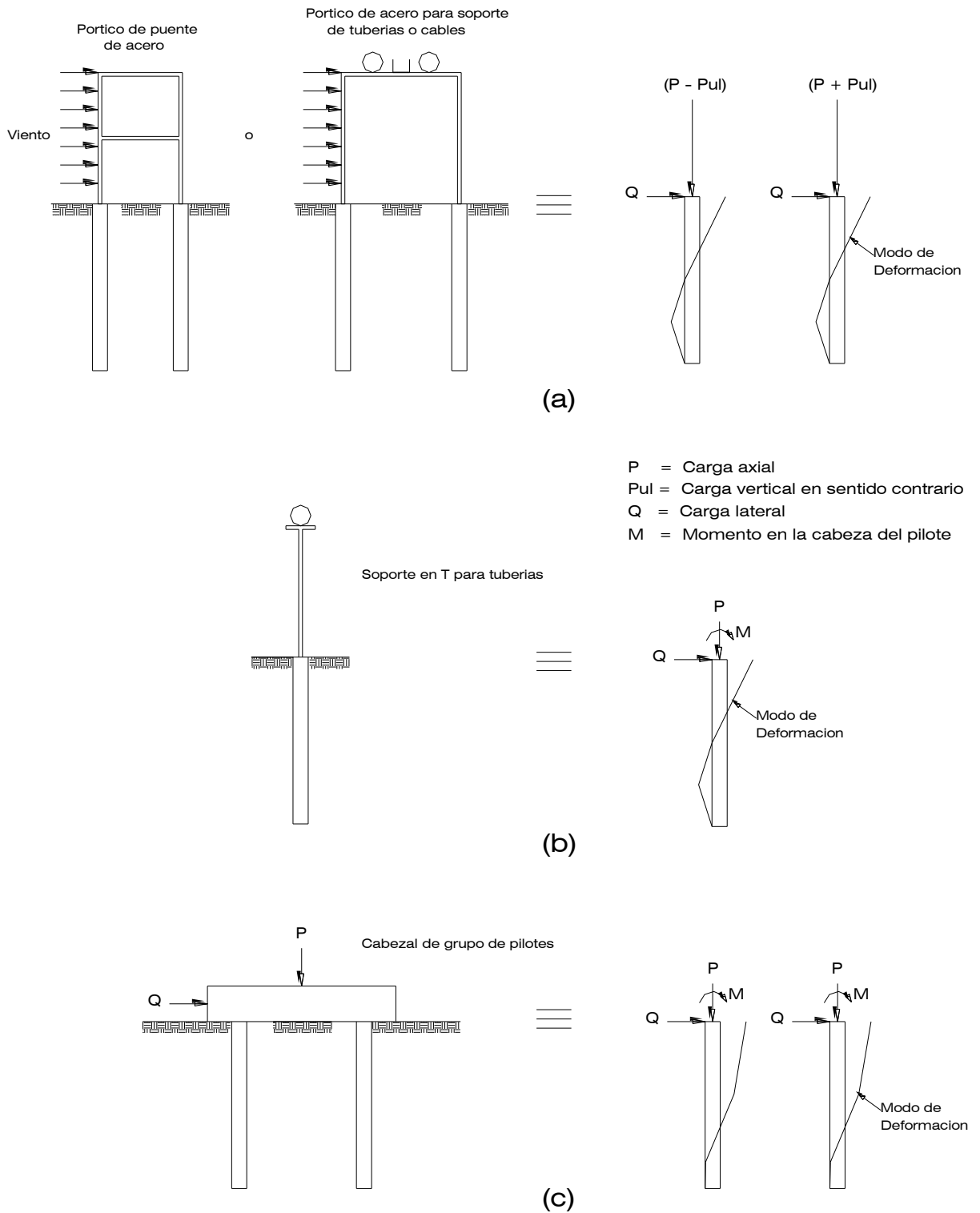


Figura (C): Pilotes sujetos a carga lateral. (a) Pilotes sujetos a carga vertical y lateral (sin restricciones), (b) Pilotes sujetos a carga vertical y lateral y momento (sin restricciones), (c) Pilotes sujetos a carga vertical y lateral y momento (con cabezal o restringido).



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Los métodos para calcular la resistencia lateral en pilotes verticales pueden ser ampliamente divididos en dos categorías:

- 1.- Métodos de cálculo para la resistencia lateral ultima.
- 2.- Métodos de cálculo para un desplazamiento aceptable en condiciones de servicio.

I.- Métodos de cálculo de la resistencia lateral en pilotes verticales

A. Método de Brinch Hansen (1961): Este método está basado en la teoría de presión de tierra y tiene las siguientes ventajas:

- 1.- Aplicable para suelos con cohesión y fricción paralelamente ($C - \emptyset$)
- 2.- Aplicable para suelos que cuentan con diferentes estratos

Sin embargo, este método tiene las siguientes desventajas:

- 1.- Es aplicable solo para pilotes cortos
- 2.- Requiere de iteraciones sucesivas para la solución del problema y así encontrar el punto de rotación

B. Método de Broms (1964): Este método también está basado en la teoría de presión de tierra, pero se han realizado algunas suposiciones simplificadas para la distribución de la resistencia a lo largo de la longitud del pilote, este método tiene las siguientes ventajas:

- 1.- Aplicable para pilotes cortos y largos
- 2.- Aplicable para suelos netamente friccionantes y netamente cohesivos
- 3.- Considera ambos casos, pilotes sin restricciones y pilotes con extremos restringidos (free head y fixed head), que pueden ser analizados separadamente

Sin embargo, este método tiene las siguientes desventajas:

- 1.- No es aplicable para suelos con diferentes estratos
- 2.- No es aplicable para suelos que tiene cohesión y fricción paralelamente ($C - \emptyset$)

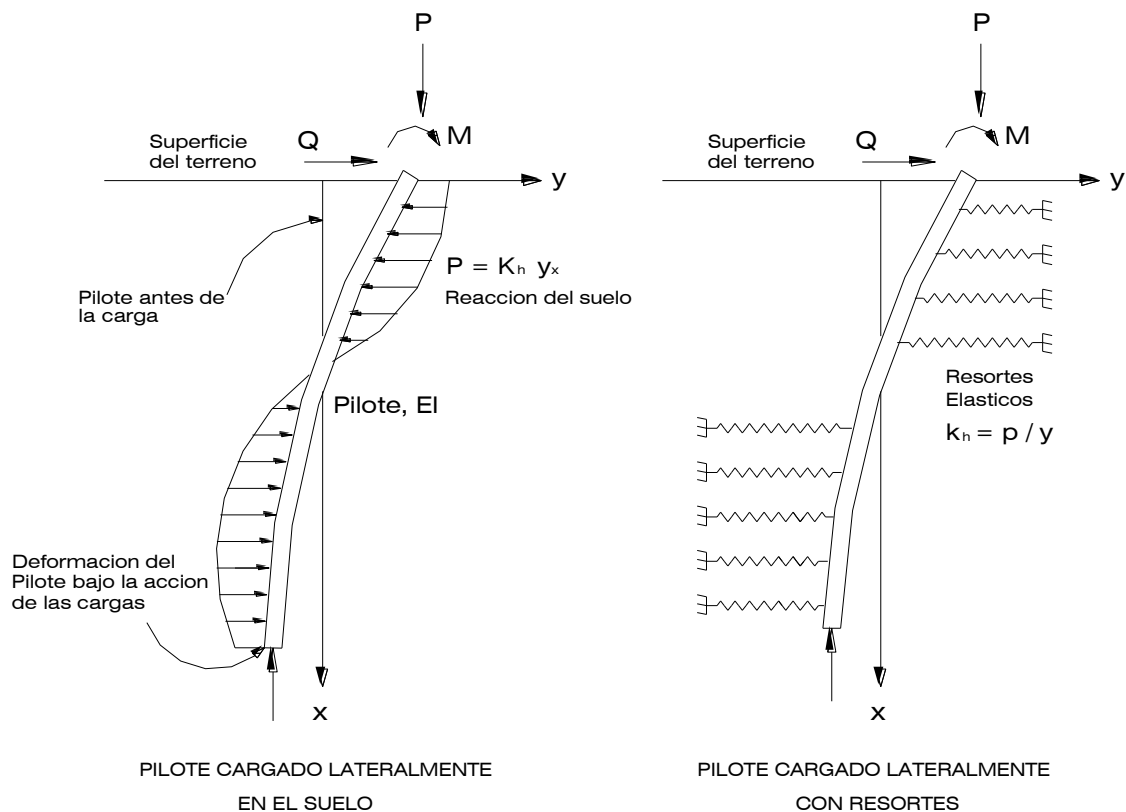
II.- Métodos de cálculo para un desplazamiento aceptable en condiciones de servicio

A. Aproximación por el método de la reacción del modulo de la sub rasante (Reese and Matlock, 1956): En este método se asume que el suelo actúa como una serie de resortes independientes linealmente elástico. Este método tiene las siguientes ventajas:

- 1.- Es relativamente simple
- 2.- Puede Incorporar factores como la no linealidad, variación de la reacción de la sub rasante (Modulo de balasto) con la profundidad, y sistemas de suelos con diferentes estratos.
- 3.- Se ha usado en la práctica por mucho tiempo

Sin embargo, a pesar de que se ha ganado mucha experiencia en la aplicación de la teoría en problemas en la práctica, se tiene las siguientes desventajas:

- 1.- Se ignora la continuidad del suelo
- 2.- El modulo de la reacción de la sub rasante no es la única propiedad del suelo pero depende del tamaño de la cimentación y de las deflexiones.





B. Aproximación Elástica (Poulos, 1971): En este método, se asume que al suelo como un medio elástico continuo, este método tiene las siguientes ventajas:

- 1.- Es basado teóricamente en una aproximación más realista,
- 2.- Proporciona soluciones para variaciones del módulo con la profundidad y sistemas de diferentes estratos.

Sin embargo este método tiene las siguientes desventajas:

- 1.- Es difícil de determinar las deformaciones en un campo de problemas y el correspondiente modulo del suelo.

Método de Brinch Hansen (1961)

Este método es para pilotes cortos, Hansen recomienda el método para una distribución general de la resistencia del suelo. El método es basado en la teoría de presión de tierras para suelos con $C - \phi$. Consiste en determinar el centro de rotación tomando momentos de todas las fuerzas alrededor del punto hasta que el resultado se iguale a cero.

La resistencia ultima del suelo en cualquier profundidad esta dado por la siguiente ecuación:

$$P_{xu} = \bar{\sigma}_{vx} K_q + C K_c \dots \dots (24)$$

Donde:

$\bar{\sigma}_{vx}$ = Presión vertical efectiva (descontando la presión del agua)

C = cohesión del suelo

K_c y K_q = factores que son funciones de ϕ y x/B (ver grafico -b)

Para Suelos cohesivos: $\phi = 0$ y $C = C_u$, $K_q = 0$, entonces la ecuación resulta:

$$P_{xu} = C_u K_c \dots \dots (25)$$

Donde K_c puede obtenerse del Grafico (b), mostrado a continuación:

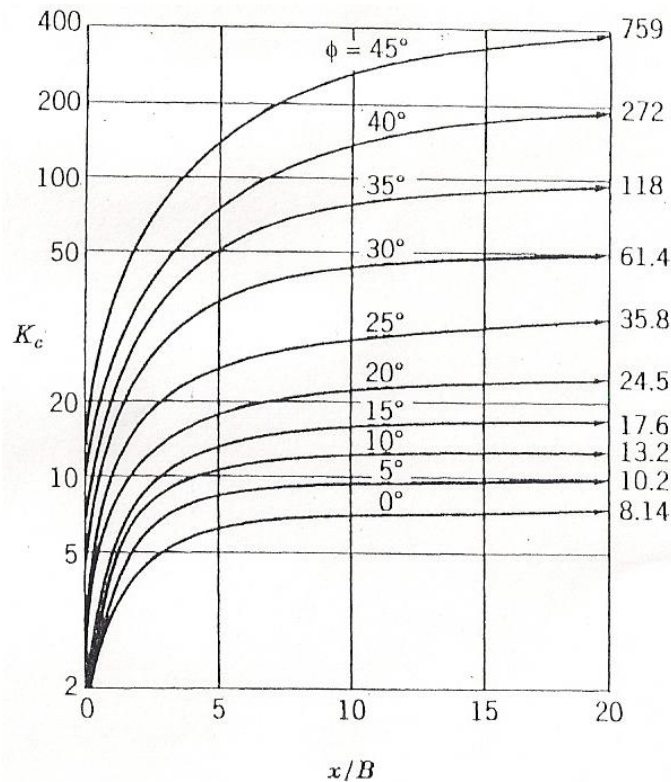
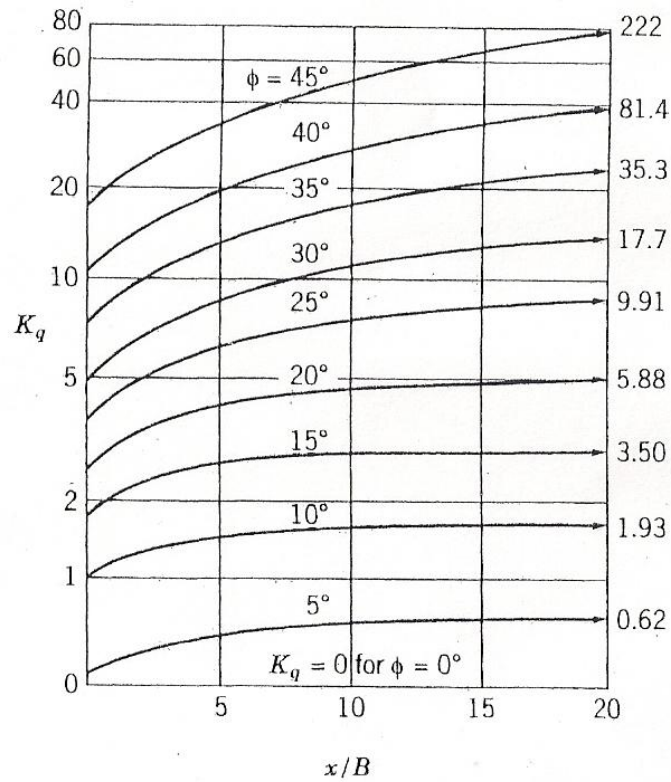


Grafico (b): Coeficientes K_q y K_c (Brinch Hansen, 1961)



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

El procedimiento para calcular la resistencia lateral última consiste en los siguientes cinco pasos:

- 1.- Dividir el perfil del suelo en un número de estratos
- 2.- Determinar K_c para cada estrato y calcular P_{xu} para estos estratos. Graficar P_{xv} con la profundidad.
- 3.- Asumir un punto de rotación a una profundidad X_r debajo del terreno y tomar momentos alrededor del punto de aplicación de la carga lateral Q_u
- 4.- Si este momento está cerca o igual a cero, entonces X_r es el verdadero valor. Si no lo es, repetir los pasos (1) hasta (3), hasta que el momento se aproxime a cero.
- 5.- Una vez obtenido X_r , la profundidad del punto de rotación, es determinada, tomando momentos alrededor del punto (centro) de rotación y calcular Q_u

Método de Broms (1964)

Este método fue propuesto por Broms para la resistencia lateral de pilotes verticales. En este método se han hecho las siguientes suposiciones:

- 1.- El suelo es puramente friccionante ($C = 0$) o puramente cohesivo ($\phi = 0$). Los pilotes en ambos tipos de suelos han sido analizados separadamente.
- 2.- Pilotes rígidos cortos y flexibles largos son considerados separadamente. El criterio para pilotes rígidos cortos es que $L / T \leq 2$ o $L / R \leq 2$

Donde:

$$T = (EI / n_h)^{1/5} \dots \dots \dots (26)$$

$$R = (EI / K_h)^{1/4} \dots \dots \dots (27)$$

E = Modulo de elasticidad del material del pilote

I = momento de inercia de la sección del pilote

$K_h = n_h x$, modulo del suelo que se incrementa linealmente con la profundidad (x)

n_h = constante del modulo de reacción de la sub rasante

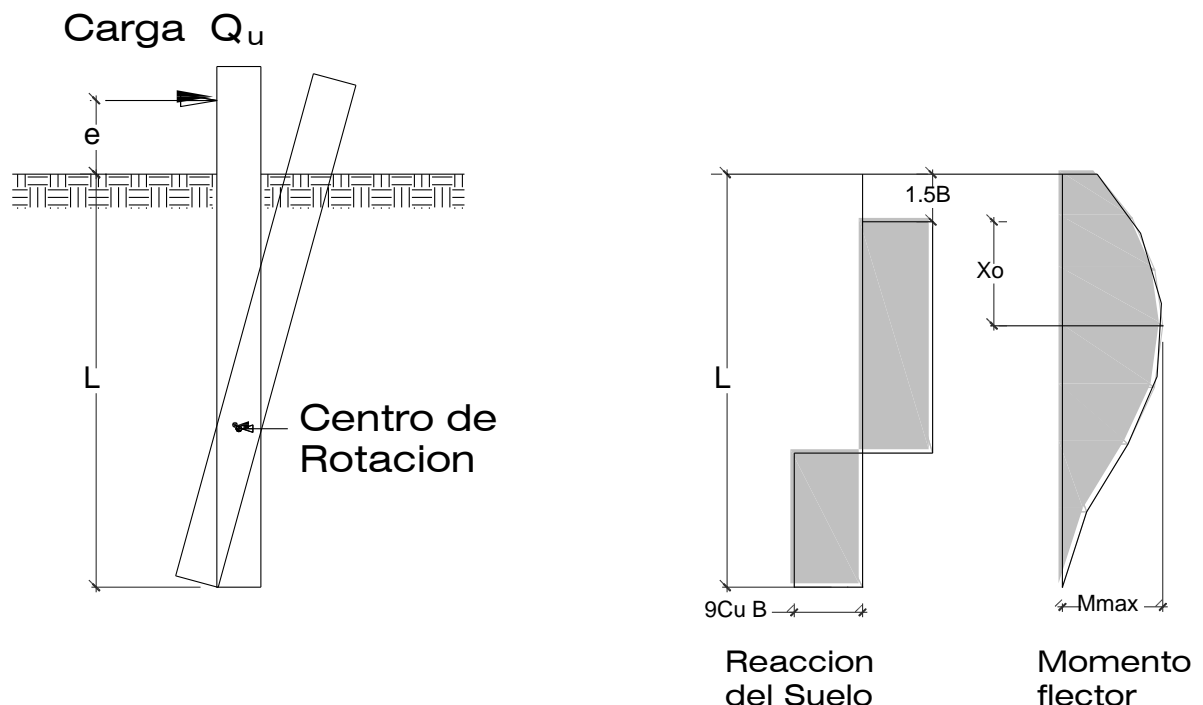
K = valor del modulo para suelos cohesivos que es una constante con la profundidad

El criterio para pilotes flexibles largos será $L / T \geq 4$ o $L / R \geq 3.5$

- 3.- Los pilotes cortos sin cabezal se espera que roten alrededor del centro de rotación mientras que los pilotes cortos con cabezal se mueven lateralmente en un modo de traslación. Los modos de deformación en pilotes largos son diferentes a los pilotes cortos porque la rotación y traslación de pilotes largos no puede ocurrir debido a la gran resistencia pasiva del suelo en la parte baja del pilote. La capacidad de carga lateral en pilotes cortos y largos ha sido evaluada por lo tanto por métodos diferentes.
- 4.- La distribución de la resistencia ultima del suelo a lo largo del pilote para diferentes condiciones de terminación del pilote son presentados a continuación:

Pilotes sin cabezal (sin restricciones)

1.- **Pilotes cortos ($L / R \leq 2$):** La siguiente figura representa la posible forma de falla y la distribución de la reacción ultima del suelo y el momento flector para un pilote corto sin restricciones o sin cabezal en suelos cohesivos



A diferencia de los pilotes largos donde la capacidad lateral es dependiente del momento de fluencia del pilote, la capacidad lateral de pilotes cortos es solamente dependiente de



la resistencia del suelo. Tomando momentos alrededor del punto de máximo momento (a una distancia $1.5B + X_o$ debajo del terreno), se tiene:

$$M_{\text{máx.}} = Q_u (e + 1.5B + 0.5 X_o) \dots\dots (28)$$

La longitud $(L - X_o)$ del pilote que resiste el máximo momento flector, esta dado por:

$$M_{\text{máx.}} = 2.25 B C_u (L - X_o)^2 \dots\dots\dots (29)$$

Donde:

$$X_o = (Q_u / 9 C_u B) \dots\dots\dots (30)$$

Resolviendo las ecuaciones (29) y (30) se puede obtener Q_u .

La solución se presenta en el Grafico (c). Donde si las relaciones L / B y e / B son conocidas luego $(Q_u / C_u B^2)$ puede ser obtenida. Así el valor de Q_u puede ser calculado.

Capacidad de carga lateral ultima en pilotes cortos

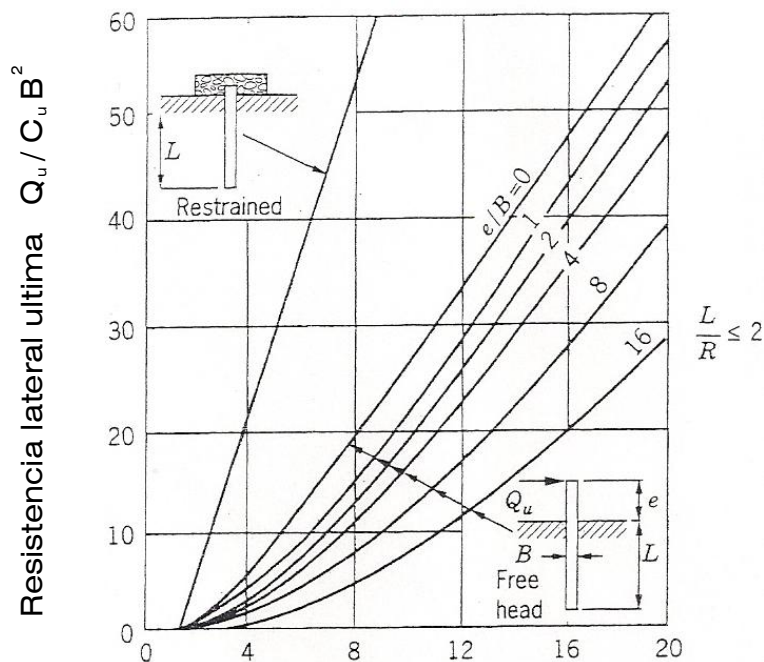
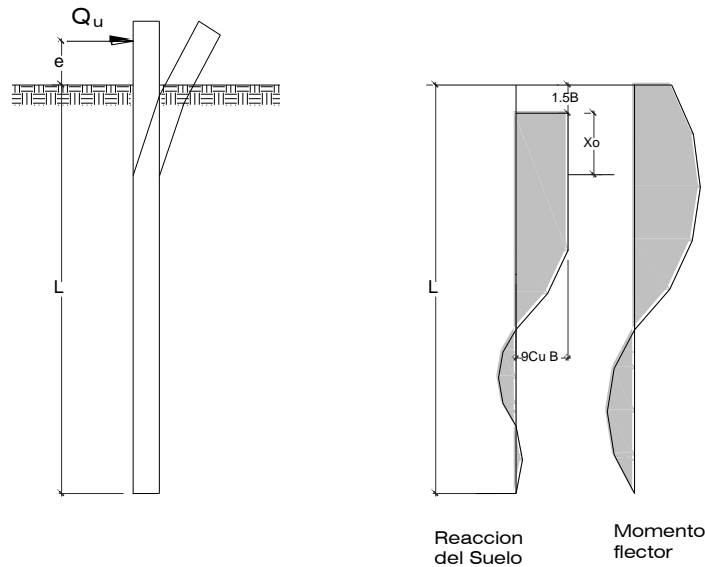


Grafico (c) - Longitud embebida L/B

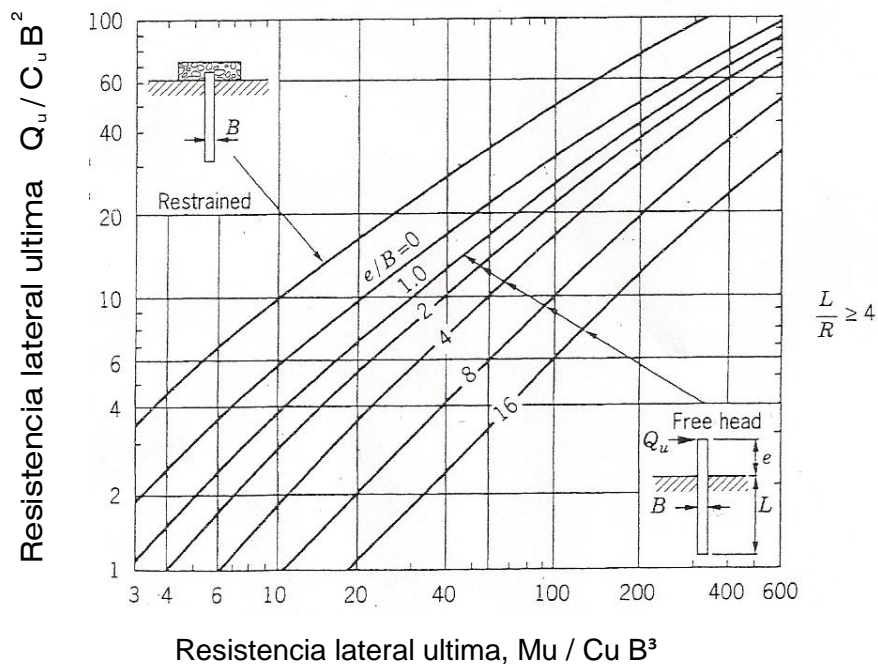
2.- Pilotes largos ($L / R \geq 3.5$):

La siguiente figura representa la posible forma de falla y la distribución de la reacción ultima del suelo y el momento flector para un pilote largo sin restricciones o sin cabezal en suelos cohesivos



Las ecuaciones (28) y (30) también son aplicables para este caso (Broms 1964). La solución esta graficada en el Grafico (d). Así para $(M_u / C_u B^3)$ conocido, se puede obtener $(Q_u / C_u B^2)$ y finalmente Q_u .

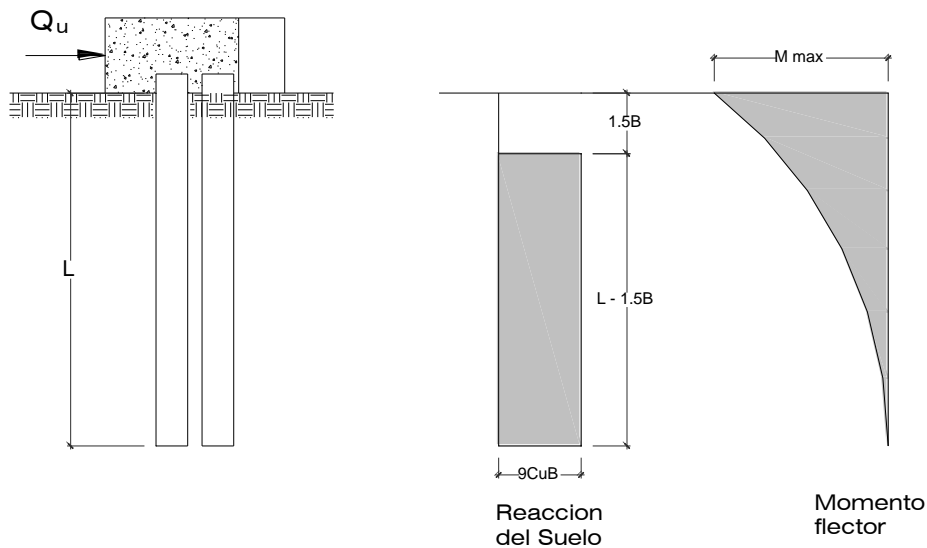
Grafico (d): Capacidad de carga lateral ultima en pilotes largos



Pilotes con cabezal (restringido)

1.- Pilotes cortos:

La siguiente figura representa la posible forma de falla y la distribución de la reacción ultima del suelo y el momento flector para un pilote corto con cabezal o restringido en suelos cohesivos



Las siguientes relaciones son aplicables para estos pilotes:

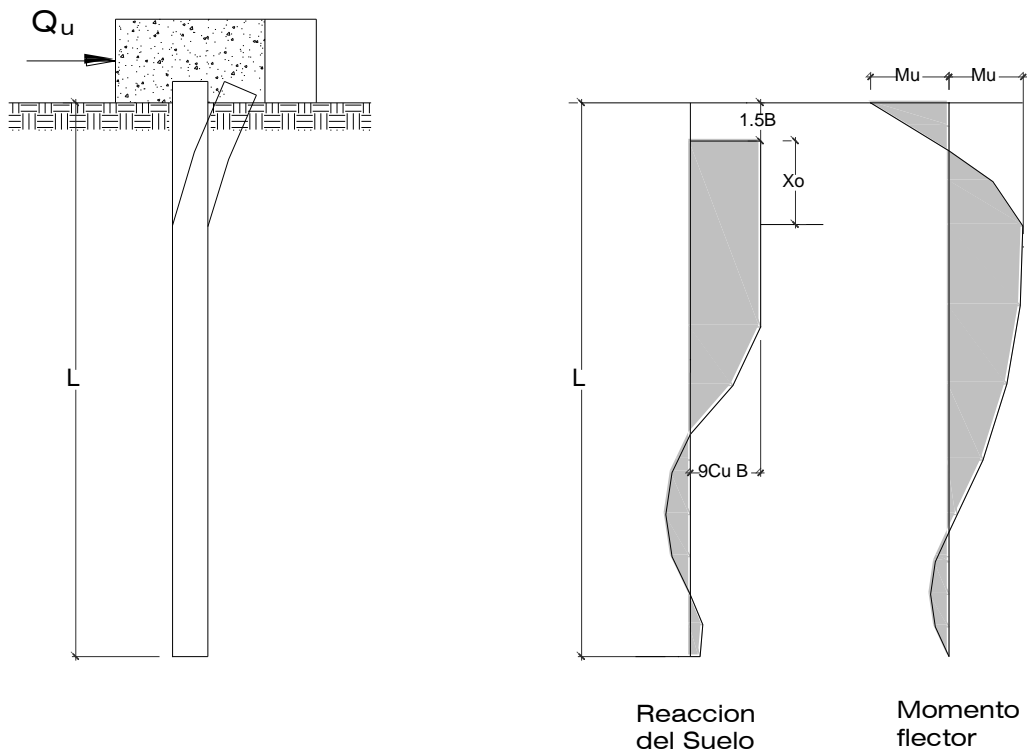
$$Q_u = 9 C_u B (L - 1.5 B) \dots \dots \dots (31)$$

$$M_{\text{máx.}} = 4.5 C_u B (L^2 - 2.25 B^2) \dots \dots \dots (32)$$

Estas ecuaciones están graficadas en la Figura (d)

2.- Pilotes largos:

Nuevamente la siguiente figura representa la posible forma de falla y la distribución de la reacción ultima del suelo y el momento flector para un pilote largo con cabezal o restringido en suelos cohesivos



El valor de Q_u para estos pilotes puede ser obtenido de las siguientes relaciones:

$$Q_u = 2 M_u / (1.5 B + 0.5 X_o) \dots\dots (33)$$

Esta ecuación es graficada en la figura (e)

$$X_o = Q_u / (9 C_u B) \dots\dots (34)$$

CARGA LATERAL ÚLTIMA RESISTENTE DE GRUPO DE PILOTES EN SUELOS COHESIVOS

El concepto de eficiencia de grupo, G_e , que es válido para suelos no cohesivos, también puede ser utilizado para suelos cohesivos. Así se tiene que la carga lateral ultima resistente $(Q_u)_G$ de un grupo de pilotes puede ser calculada de la siguiente relación:

$$(Q_u)_G = G_e n Q_u \dots\dots (35)$$

Donde n es el número de pilotes en el grupo, y Q_u es la carga lateral ultima resistente del pilote individual.



TABLA 7.- Eficiencia de grupo G_e para pilotes en suelos cohesivos (a)

G_e			
S/B	Grupo de 2x2	Grupo de 3 x 3	Recomendado
1	2	3	4
3.0	0.42	0.39	0.40
3.5	0.50	0.42	0.45
4.0	0.57	0.44	0.50
4.5	0.61	0.47	0.55
5.0	0.63	0.48	0.55
6.0 (b)	—	—	0.65
8.0 (b)	—	—	1.00

S = Espaciamiento entre ejes de pilotes

B = Diámetro o ancho del pilote

(a) Estos valores han sido obtenidos de las curvas proporcionadas por Prakash y Saran (1967)

(b) Valores extrapolados

DESPLAZAMIENTO LATERAL DE UN PILOTE INDIVIDUAL EN SUELOS COHESIVOS

Los dos métodos que pueden ser utilizados para calcular el desplazamiento lateral de un pilote individual en suelos cohesivos son la aproximación por la reacción de la sub rasante y la aproximación elástica, sin embargo el método más utilizado en la práctica es el primero, por lo que a continuación se desarrollara aspectos teóricos de esta aproximación:

Aproximación por el Método de la Reacción de la Sub rasante

Para arcillas normalmente consolidadas

El modulo de la reacción de la sub rasante se incrementa linealmente con la profundidad, a continuación se describe la parte teórica de este método:

Pilotes sin cabezal (sin restricciones)

La figura (f) muestra la distribución de los desplazamientos del pilote y, la variación de la pendiente dy/dx , momento, cortante, y reacción del suelo a lo largo de la longitud del

pilote debido a la carga lateral Q_g y momento M_g , aplicado en la cabeza del pilote. El comportamiento de estos pilotes puede expresarse por la ecuación (36).

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + p = 0 \dots\dots(36)$$

Donde:

E = modulo de elasticidad del pilote

I = momento de inercia de la sección del pilote

p = reacción del suelo, la cual es igual a $(K_h y)$

La ecuación (36) puede escribirse como:

$$\frac{d^4 y}{dx^4} + \frac{K_h y}{EI} = 0$$

En general, la solución de esta ecuación puede expresarse por la siguiente formulación:

$$y = f(x, T, L, K_h, EI, Q_g, M_g)$$

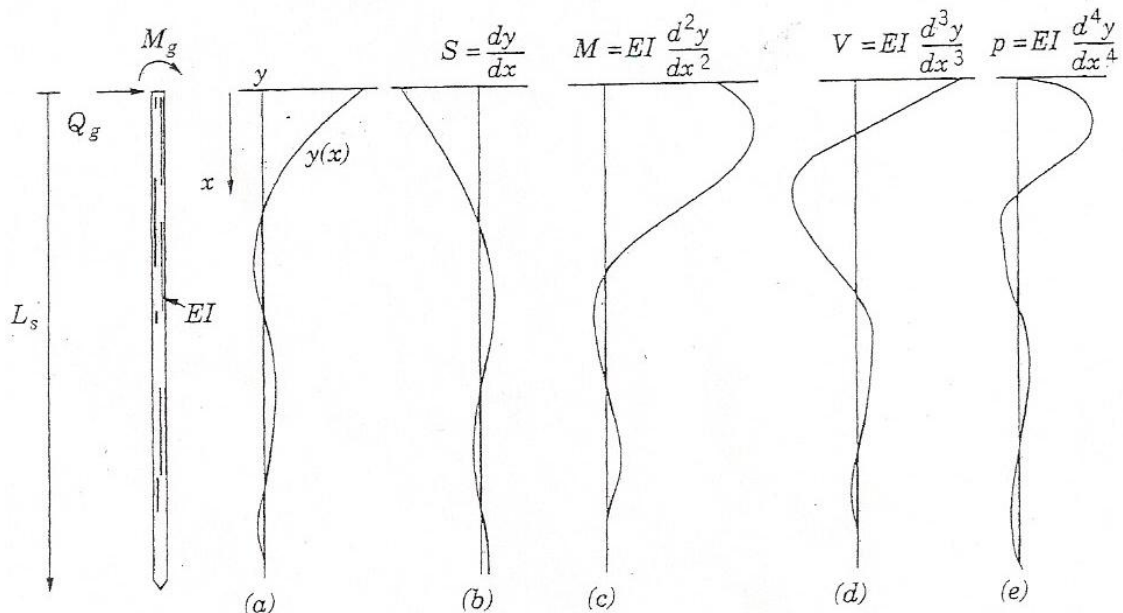


Figura (d): Pilote de longitud L embebida en el suelo con cargas actuantes Q_g y M_g , (a) desplazamientos, y ; (b) pendiente, dy/dx ; (c) momento, $EI (d^2y/dx^2)$; (d) cortante, $EI (d^3y/dx^3)$; (e) reacción del suelo, $EI (d^4y/dx^4)$ (Reese y Matlock. 1956)



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Donde:

x = profundidad bajo el terreno

T = factor de rigidez relativa

L = longitud del pilote

$K_h = n_h x$, modulo horizontal de la reacción de la sub rasante

n_h = constante de la reacción de la sub rasante

B = diámetro o ancho del pilote

EI = rigidez del pilote

Q_g = carga lateral aplicada en la cabeza del pilote

M_g = momento aplicado en la cabeza del pilote

Para desplazamientos pequeños en comparación con las dimensiones del pilote se asume el comportamiento elástico. Para este comportamiento, se puede aplicar el principio de superposición. Utilizando el principio de superposición, el efecto de la carga lateral Q_g en la deformación y_A y el efecto del momento M_g en la deformación y_B se puede considerar separadamente. Luego el desplazamiento total y_x en la profundidad x puede escribirse de la siguiente manera:

$$y_x = y_A + y_B$$

Donde:

$$y_A / Q_g = f_1 (x, T, L, K_h, EI)$$

y

$$y_B / M_g = f_2 (x, T, L, K_h, EI)$$

f_1 y f_2 son dos funciones diferentes de los mismos términos, en estas ecuaciones hay seis términos y dos dimensiones; fuerza y longitud. Por lo tanto, los siguientes cuatro términos no dimensionales pueden ser determinados:

$$y_A EI / Q_g T^3, x/T, L/T, K_h T^3 / EI$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

$$y_B EI / M_g T^2, x/T, L/T, KhT^3 / EI$$

Además, se pueden asignar los siguientes símbolos a los términos no dimensionales:

$$\frac{y_A EI}{Q_g T^3} = A_y \quad (\text{Coeficiente de desplazamiento para carga lateral})$$

$$\frac{y_B EI}{M_g T^2} = B_y \quad (\text{Coeficiente de desplazamiento para momento})$$

$$X/T = Z \quad (\text{Coeficiente de profundidad})$$

$$L/T = Z \text{ máx.} \quad (\text{Coeficiente de máxima profundidad})$$

$$KhT^4 / EI = \emptyset(x) \quad (\text{Función del modulo del suelo})$$

De las ecuaciones anteriores se puede obtener:

$$y_x = y_A + y_B = A_y \frac{Q_g T^3}{EI} + B_y \frac{M_g T^2}{EI}$$

Similarmente, se puede obtener expresiones para momentos M_x , pendientes S_x , cortantes V_x y reacción del suelo P_x , tal como se muestra a continuación:

$$M_x = M_A + M_B = A_m Q_g T + B_m M_g$$

$$S_x = S_A + S_B = A_s (Q_g T^2 / EI) + B_s (M_g T / EI)$$

$$V_x = V_A + V_B = A_v Q_g + B_v (M_g / T)$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

$$P_x = P_A + P_B = A_p (Q_g / T) + B_p (M_g / T^2)$$

Refiriéndose a la ecuación diferencial básica de una viga en una cimentación elástica y utilizando el principio de superposición, se tiene:

$$(d^4 y_A / dx^4) + (K_h / EI) y_A = 0$$

$$(d^4 y_B / dx^4) + (K_h / EI) y_B = 0$$

Sustituyendo los valores en las ecuaciones anteriores se tiene:

$$(d^4 A_y / dz^4) + \emptyset(x) A_y = 0 \dots\dots (37)$$

$$(d^4 B_y / dz^4) + \emptyset(x) B_y = 0 \dots\dots (38)$$

La solución para las ecuaciones (37) y (38), fueron obtenidos por Reese y Matlock, usando el método de diferencias finitas, para los valores de A_y , A_s , A_m , A_v , A_p , B_y , B_s , B_m , B_v y B_p , para diferentes valores de $Z = x / T$.

Pilotes con cabezal (Restringido)

Para pilotes con cabezal o restringido, la pendiente en la superficie o cabeza del pilote es igual a cero. Por lo tanto la ecuación para la pendiente resulta:

$$S_x = S_A + S_B = A_s (Q_g T^2 / EI) + B_s (M_g T / EI) = 0$$

Entonces:

$$M_g / Q_g T = - A_s / B_s \quad \text{para } x = 0$$



Para arcillas sobre consolidadas,

El modulo de la reacción de la sub rasante es constante con la profundidad. Para esta clase de arcillas, los coeficientes de desplazamiento A y B están definidos por:

$$\frac{y_A EI}{Q_g R^3} = A_{yc}$$

$$\frac{y_B EI}{M_g R^2} = B_{yc}$$

Donde:

A_{yc} , B_{yc} = coeficientes de desplazamiento en arcillas para Q_g y M_g

Sea $y = y_A + y_B$, entonces se tiene los desplazamientos y a cualquier profundidad:

$$y = A_{yc} \frac{Q_g R^3}{EI} + B_{yc} \frac{M_g R^2}{EI} \dots\dots\dots (39)$$

De manera similar, el momento en cualquier profundidad será:

$$M = A_{mc} Q_g R + B_{mc} M_g \dots\dots\dots (40)$$

La solución para los coeficientes A y B han sido obtenidos por Davison y Gill (1963). Reemplazando A_y por A_{yc} en la ecuación (37), se tiene:

$$\frac{d^4 A_{yc}}{dz^4} + \phi(x) A_{yc} = 0 \dots\dots\dots (41)$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Ahora poniendo $\emptyset(x) = 1$, $K_h = K$, y reemplazando T por R, la función del modulo del suelo descrita anteriormente resulta:

$$\frac{K R^4}{EI} = 1$$

$$R = \left(\frac{EI}{K} \right)^{1/4}$$

y,

$$Z = x / R$$

Sustituyendo la ecuación anterior en la ecuación (41), se obtiene la solución para los coeficientes A y B.

La solución para A_{yc} y A_{mc} ha sido graficado para la profundidad no dimensional del coeficiente z en el Grafico (e) y B_{yc} y B_{mc} en el Grafico (f). Se puede apreciar del Grafico (e) que si $Z_{m\acute{a}x.} (= L / R) \leq 2$, el pilote se comporta como pilote r\ıgido. Y para $Z_{m\acute{a}x.} (= L / R) \geq 4$, el pilote se comporta como un pilote infinitamente largo.

La longitud del pilote mas all\aa de $Z_{m\acute{a}x} = 5$ no cambia los desplazamientos. En la pr\actica, en la mayor\ıa de los casos la longitud del pilote es mayor que $5R$, por lo tanto, los coeficientes a tomar ser\aa para los $Z_{m\acute{a}x}$ de los gr\aficos.

A continuaci\on se presentan los gr\aficos para determinar los coeficientes de desplazamiento y de momento.

Los gr\aficos (e) y (f) permiten obtener los coeficientes de momentos y desplazamientos para pilotes sin restricciones en suelos con m\odulos constantes.

El grafico (e) es para pilotes sin restricciones con cargas horizontales en la cabeza del pilote pero sin momentos.

El grafico (f) es para pilotes sin restricciones con momentos pero sin cargas horizontales en la cabeza del pilote.



Coeficiente de desplazamiento A_{yc} y Coeficiente de momento A_{mc}

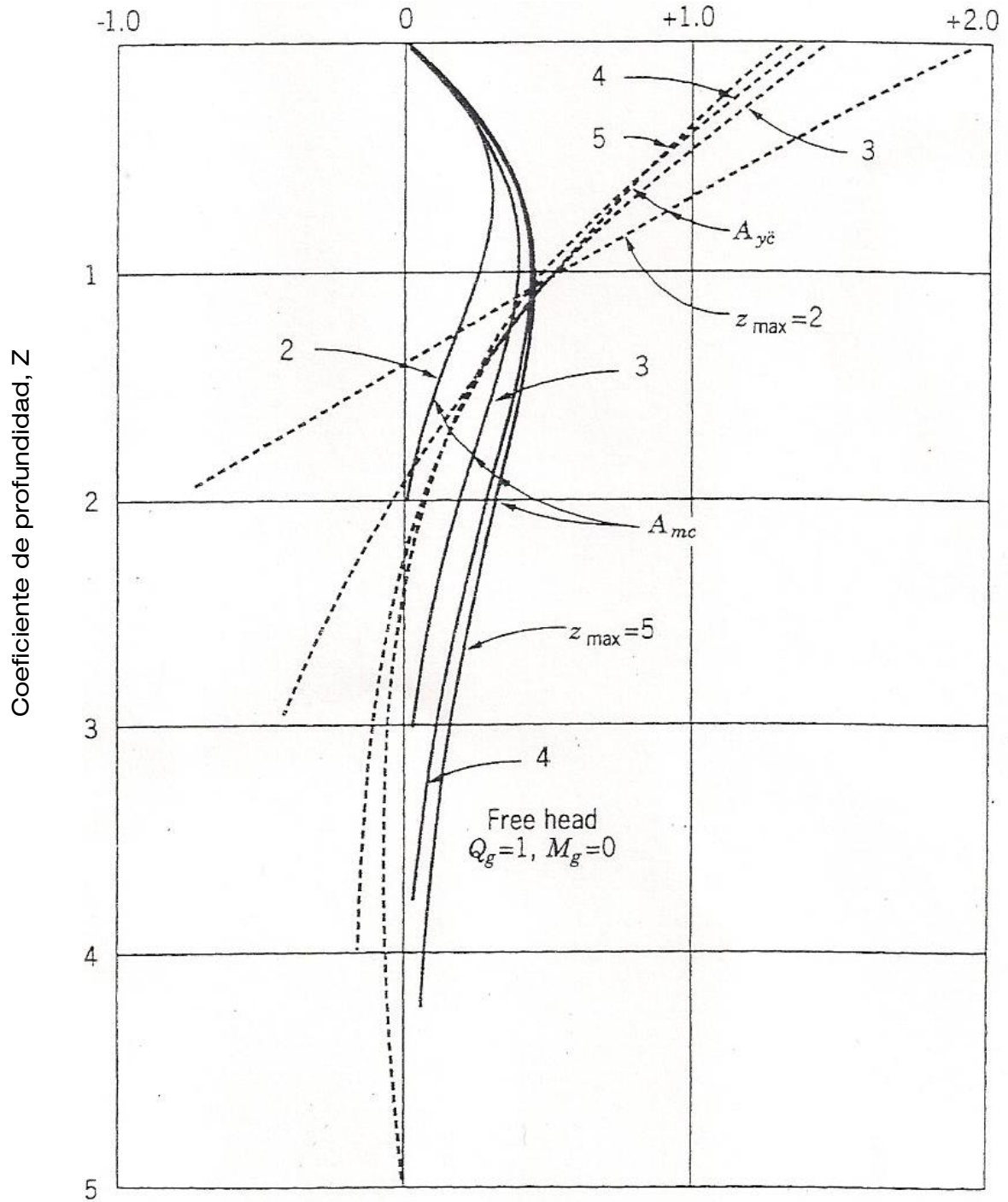


Grafico (e)



Coeficiente de desplazamiento B_{yc} y Coeficiente de momento B_m

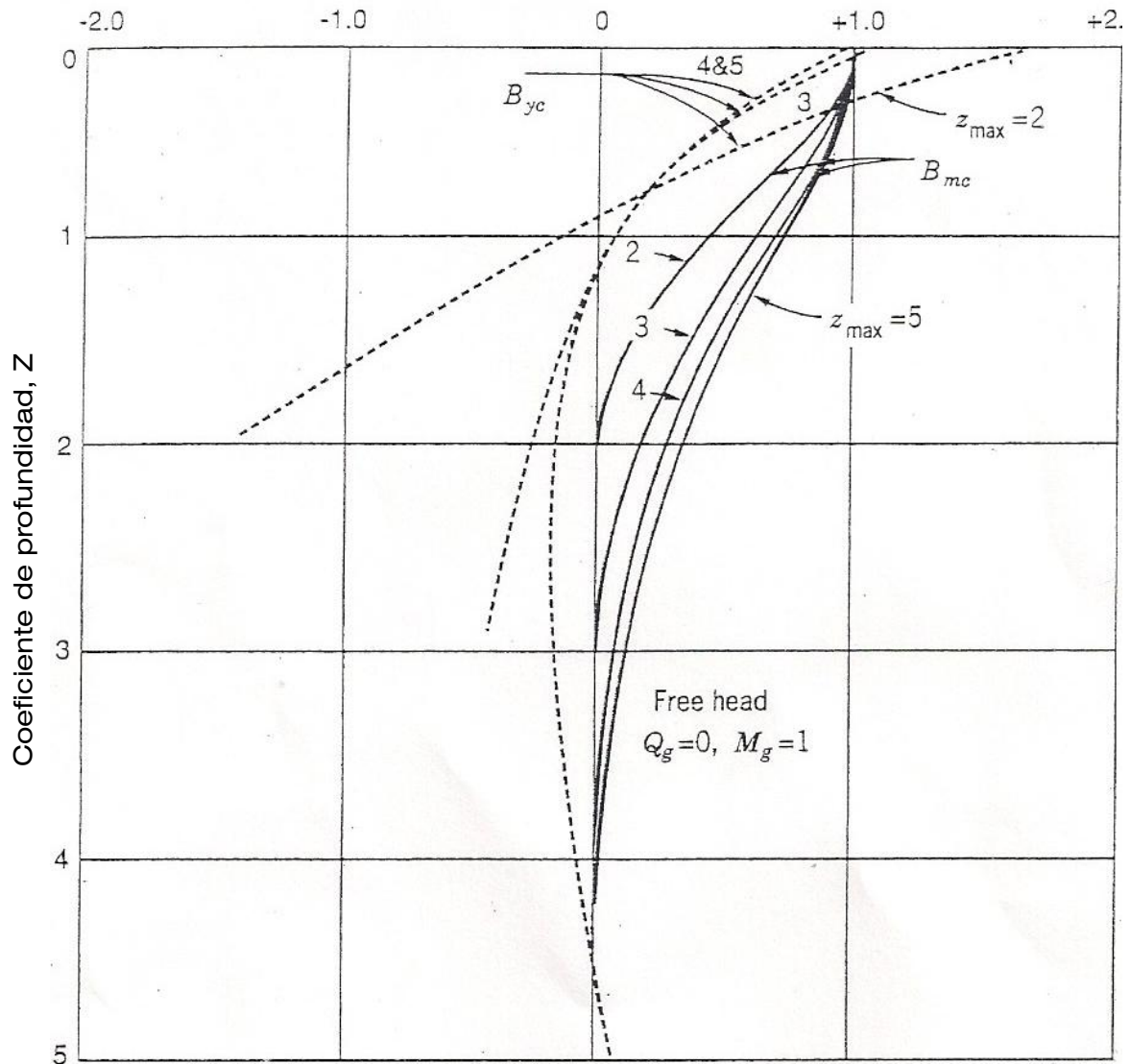


Grafico (f)

DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE CARGA LATERAL DE PILOTES EN SUELO COHESIVO PARA LA CIMENTACION DE LA TORRE SOLAR

Procedimiento de diseño para pilotes en suelos cohesivos:

Basado en el estudio, comportamiento y análisis de pilotes en suelos cohesivos, se propone el siguiente procedimiento de diseño:



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

- 1.- **Perfil del suelo.** Del estudio de suelos, se debe determinar la estratigrafía del suelo así como el nivel freático, capacidad portante y propiedades del suelo.

- 2.- **Dimensiones y distribución de pilotes.** Normalmente, las dimensiones y distribución de los pilotes son establecidas para los requerimientos de carga axial de compresión. La habilidad para conseguir dimensiones y distribución de pilotes que resistan las cargas laterales y momentos impuestos es luego verificada por el siguiente procedimiento.

- 3.- **Calculo de la Resistencia Lateral Última y Máximo Momento Flector**

(A) Pilotes Individuales

- (i) (a) Para arcillas normalmente consolidadas cuyo modulo del suelo se incrementa linealmente con la profundidad, determinar el valor de n_h
- (b) Calcular la rigidez relativa $T = (EI / n_h)^{1/5}$
- (c) Determinar la relación L / T y verificar si el comportamiento del pilote es como pilote corto ($L/T \leq 2$) o pilote largo ($L/T \geq 4$).
- (ii) (a) Para arcillas sobre consolidadas cuyo modulo del suelo es constante con la profundidad, determine K ($K \approx 67 S_u$), donde S_u es el esfuerzo cortante no drenado del suelo.
- (b) Calcular la rigidez relativa $R = (EI / K)^{1/4}$
- (c) Determinar la relación L / R y verificar si el comportamiento del pilote es como pilote corto ($L/R \leq 2$) o pilote largo ($L/R \geq 3.5$).
- (iii) Calcular la Resistencia Lateral Última Q_u , la carga lateral admisible Q_{total} , y el máximo momento flector $M_{máx}$ para las cargas aplicadas por el método de Broms.

(B) Pilotes en grupo

De la tabla 7, determinar el valor G_e para la relación (S/B) del grupo. La Resistencia Lateral admisible del grupo (Q_{total})_G es luego G_e veces ($n Q_{total}$) donde n es el número total de pilotes en el grupo, y Q_{total} es obtenido del paso (iii).



4.-Cálculo de la Resistencia Lateral Última y Máximo Momento para un desplazamiento lateral admisible.

(A) Pilotes Individuales

- (i) (a) Para arcillas normalmente consolidadas cuyo módulo del suelo se incrementa linealmente con la profundidad, determinar el valor de n_h
- (b) Calcular la rigidez relativa $T = (EI / n_h)^{1/5}$, y determinar la relación L/T
- (c) Calcular la carga lateral admisible para un desplazamiento establecido y el máximo momento flector para las condiciones de diseño por el método de la reacción de la sub rasante.
- (ii) (a) Para arcillas sobre consolidadas cuyo módulo del suelo es constante con la profundidad, determine K ($K \approx 67 S_u$), donde S_u es el esfuerzo cortante no drenado del suelo
- (b) Calcular la rigidez relativa $R = (EI / K)^{1/4}$, y determinar la relación L/R
- (c) Calcular la carga lateral admisible para una deformación establecida y el máximo momento flector para las condiciones de diseño por el método de la reacción de la sub rasante.

(B) Pilotes en grupo

- (i) De la siguiente Tabla 8, determinar el factor de reducción de grupo para n_h o K , para la relación S/B del grupo. Luego el nuevo valor de n_h o K se obtiene multiplicando los valores de n_h o K obtenidos en los pasos 4(A) (i) (a) o (ii) (a), por el factor de reducción. Finalmente, como se establece en el paso 4(A), se calcula la capacidad de carga lateral admisible para un pilote individual basado en los nuevos valores de n_h o K .

TABLA 8.- Factor de Reducción de grupo (Davisson 1970)

Espaciamiento del pilote en la Dirección de la carga	Factor de Reducción de Grupo Para n_h o K
3B	0.25
4B	0.40
6B	0.70
8B	1.00



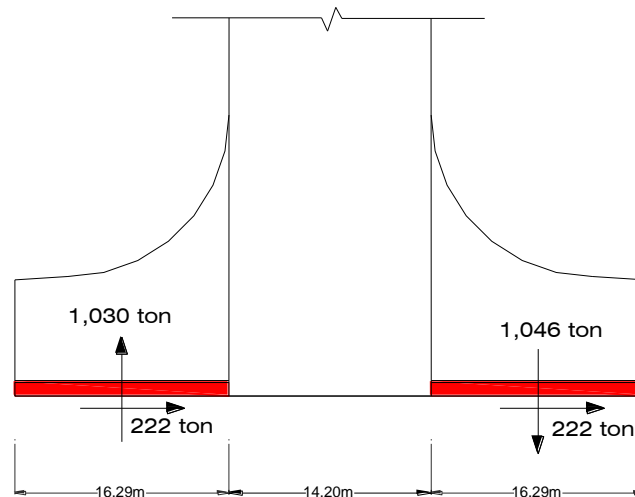
TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

- (ii) La capacidad del grupo de pilotes es la capacidad de carga admisible de un pilote individual, obtenido en el paso B (i), multiplicado por el número de pilotes. El máximo momento flector será para la nueva carga lateral admisible del grupo.

5.-Carga Lateral Admisible y Máximo Momento Flector. La carga lateral admisible será el menor valor obtenido en los pasos 3 y 4. El máximo momento flector corresponde a la carga lateral admisible.

Determinación de la Resistencia Lateral Última y Máximo Momento Flector para la torre solar

De los resultados obtenidos del análisis estructural de la torre solar, se tiene:



$$Q_u = 222 \text{ ton.}$$

Pilote de tubo de acero sin costura $\varnothing = 10''$ ASTM A-53 Grado B – SCHEDULE 80

$B = 27.3 \text{ cm} \leftrightarrow 0.8957 \text{ pies}$

$e = 1.509 \text{ cm} \leftrightarrow 0.0495 \text{ pies}$

$L = 25\text{m} = 82 \text{ pies}$

$F_y = 2,500 \text{ kg/cm}^2 \leftrightarrow 5110 \text{ kips / pie}^2$

$\bar{q}_u = 2.5 \text{ kg/cm}^2$ (Resistencia a la compresión no confinada promedio del suelo)



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

$$C_u = S_u = \bar{q}_u / 2 = 1.25 \text{ kg/cm}^2 \Leftrightarrow 2.55 \text{ kips / pie}^2 \text{ (Esfuerzo cortante no drenado del suelo)}$$

$$K = 67 C_u \quad \text{(Modulo de reacción de la sub rasante o coeficiente de balasto)}$$

$$K = 67 \times 2.55 = 170.85 \text{ kips / pie}^3 \Leftrightarrow 2.74 \text{ kg/cm}^2$$

$$E = 2.1E+06 \text{ kg/cm}^2 \Leftrightarrow 4,292,120 \text{ kips / pie}^2 \text{ (Modulo de elasticidad del material del pilote)}$$

$$I = \pi/64 (0.8957^4 - 0.7967^4) = 0.0118 \text{ pies}^4$$

$$EI = 50,647 \text{ kips} \cdot \text{pie}^2$$

$$Z = I / (B/2) = 0.0118 / (0.8957 / 2) = 0.0263 \text{ pie}^3$$

$$M_u = Z f_b = 0.0263 (0.6 \times 5110) = 80.64 \text{ kips-pie} \Leftrightarrow 11.17 \text{ ton-m}$$

$$R = (EI / K)^{1/4} = (50,647 / 170.85)^{1/4} = 4.15 \text{ pies}$$

$$L / R = 82 / 4.15 = 19.75 > 3.5 \quad \text{(Comportamiento como pilote largo)}$$

$$M_u / (C_u B^3) = 80.64 / (2.55 \times 0.8957^3) = 44, \text{ entrando con este valor al grafico (e), se tiene:}$$

$$Q_u / (C_u B^2) = 30 \Rightarrow Q_u = 30 \times 2.55 \times (0.8957)^2 = 61.37 \text{ kips} \Leftrightarrow 27.89 \text{ ton}$$

$$Q_{total} = Q_u / FS = 27.89 / 2.5 = 11.16 \text{ ton}$$

$$\text{De la tabla 7, Para } S = 4B \Rightarrow G_e = 0.57 \text{ (Factor de reducción por eficiencia de grupo)}$$

$$(Q_{total})_G = 0.57 \times 11.16 \times 36 = 229 \text{ ton} > 222 \text{ ton} \quad \mathbf{¡CONFORME!}$$

Determinación de la Resistencia Lateral Última y Máximo Momento Flector para un desplazamiento lateral admisible en la torre solar

$$y = A_{yc} \frac{Q_g R^3}{EI} + B_{yc} \frac{M_g R^2}{EI} \quad \text{(Ecuación 39)}$$

Para el presente caso:

$$M_g = 0 \quad \text{(Pilote largo con cabezal)}$$

$$EI = 50,647 \text{ kips} \cdot \text{pie}^2$$

$$R = 4.15 \text{ pies}$$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Para desplazamientos laterales, es usual tomar como desplazamientos admisibles entre ¼ pulg. a ½ pulg. Para nuestro caso se tomará el valor de $y = 1.27\text{cm} \langle \rangle ½ \text{ pulg} \langle \rangle 0.042\text{pies}$ como desplazamiento máximo admisible.

$Z_{\text{máx.}} = L / R = 19.76$ en $X / R = 0$, de los gráficos (e) y (f), se tiene:

$A_{yc} = 1.4$, $B_{yc} = 1.00$ (Coeficientes de desplazamiento)

Reemplazando valores en la ecuación (39), se tiene:

$0.042 = 1.4 Q_g (4.15)^3 / 50,647 \Rightarrow Q_g = 21.26 \text{ kips} \langle \rangle 9.66 \text{ ton}$ (por pilote individual)

Para el grupo de pilotes: $(Q_{\text{total}})_G = 36 \times 9.66 = 348 \text{ ton} > 222 \text{ ton}$ **¡CONFORME!**

Se debe tener en cuenta que por el efecto de la eficiencia de grupo se debe de reducir el valor de R de acuerdo a lo siguiente:

De la tabla 8, se tiene que para $S = 4B \Rightarrow G_e = 0.40$ y para $S = 6B \Rightarrow G_e = 0.70$

Para el presente caso se tienen dos valores de S en ambos sentidos por lo que se tomará un valor promedio de $G_e = 0.55 \Rightarrow K = 0.55 \times 170.85 \text{ kips} / \text{pie}^3 = 93.97 \text{ kips} / \text{pie}^3$

$R = (EI / K)^{1/4} = (50,647 / 93.97)^{1/4} = 4.82\text{pies}$

$L / R = 17.01$

Reemplazando estos nuevos valores en la ecuación (39), se tiene:

$0.042 = 1.4 Q_g (4.82)^3 / 50,647 \Rightarrow Q_g = 13.57 \text{ kips} \langle \rangle 6.17 \text{ ton}$ (por pilote individual)

Para el grupo de pilotes: $(Q_{\text{total}})_G = 36 \times 6.17 = 222.12 \text{ ton} > 222 \text{ ton}$ **¡CONFORME!**

Para el momento flector se tiene que:

$$M = A_{mc} Q_g R + B_{mc} M_g \quad (\text{Ecuación 40})$$

En nuestro caso $M_g = 0$, $Q_g = 13.57 \text{ kips}$, $R = 4.82 \text{ pies}$

Del grafico (e), el máximo valor de $A_{mc} = 0.40$. Entonces sustituyendo estos valores en la ecuación (40) se tiene:

$$M_{\text{máx.}} = 0.4 \times 13.57 \times 4.82 = 26.16 \text{ kip-pie} \langle \rangle 3.62 \text{ ton-m} < M_u = 11.17 \text{ ton-m}$$

¡CONFORME!



**VERIFICACION DE CAPACIDAD DE CARGA LATERAL DE PILOTES, MEDIANTE
MODELOS MATEMATICOS EN EL SAP2000:**

Para un pilote individual

Para el presente caso se realizará un modelo con elementos tipo frame, considerando resortes elásticos con una rigidez equivalente al modulo de la reacción de la sub rasante (K_h) multiplicado por la mitad del área en contacto del pilote, es decir:

$$K_r = K_h \pi (B/2) L_i \quad (\text{ton / m})$$

Donde:

$$K_h = 170.85 \text{ kips / pie}^3 \Leftrightarrow 2.74 \text{ kg/cm}^3 \Leftrightarrow 2,740 \text{ ton/m}^3$$

$$B = 0.273\text{m}$$

L_i = longitud a discretizar en el pilote, para el presente caso se utilizará una longitud de 0.25m en los primeros 6m, 0.50m en los siguiente 5m y el resto cada 1m.

De acuerdo a la bibliografía sobre la materia y por la experiencia en la práctica, corroborado con el siguiente modelo matemático, se tiene que la profundidad crítica del pilote varía entre está los $L/5$ y $L/4$, es decir entre los 5m a 6m para el presente caso. En el modelo matemático se ha tomado como profundidad critica 6m, es decir los resortes actúan en sentido contrario en los tramos comprendidos de (0, 6m) y (6m, 25m). Las rigideces de los resortes para el presente modelo serán:

$$K_1 = - 2,740 \pi (0.273/2) 0.25 = - 293.75 \text{ ton/m (entre la superficie del terreno y 6m)}$$

$$K_2 = + 2,740 \pi (0.273/2) 0.50 = + 587.50 \text{ ton/m (de los 6m hasta los 11m)}$$

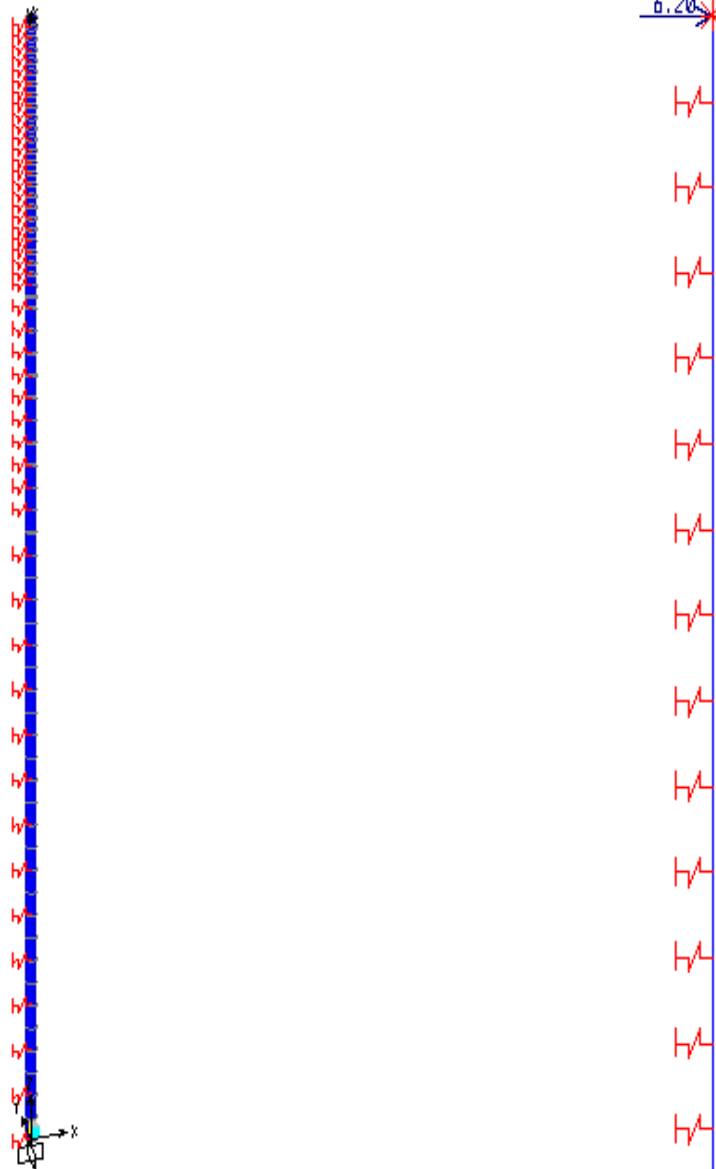
$$K_3 = + 2,740 \pi (0.273/2) 1.00 = + 1,175 \text{ ton/m (de los 11m hasta los 25m)}$$

El signo negativo del resorte indica que actúa en sentido contrario a la carga y el signo positivo en el mismo sentido de la carga, para el presente caso se tiene una carga actuante de $Q_u / 36 = 222 \text{ ton} / 36 \text{ pilotes} = 6.20 \text{ ton por pilote}$.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Se debe tener en cuenta que en el presente caso el grupo de pilotes se encuentran unidos por un cabezal de concreto, por lo que se debe restringir la cabeza del pilote individual contra la rotación.



MODELO MATEMATICO DEL PILOTE

$\varnothing = 10''$, $B = 0.273m$, $L = 25m$

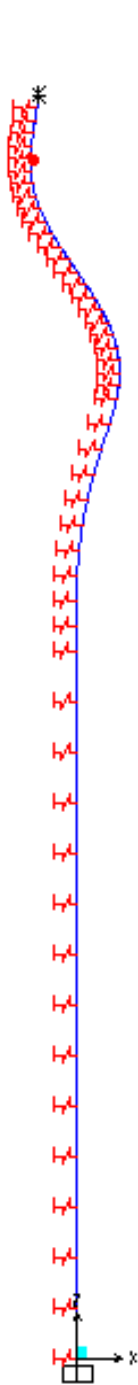
PARTE SUPERIOR DEL PILOTE

Carga = 6.2 ton



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Pt Obj: 59
Pt Elm: 59
U1 = -.0031
U2 = 0
U3 = 0
R1 = 0
R2 = .00003
R3 = 0



Desplazamientos
(m)

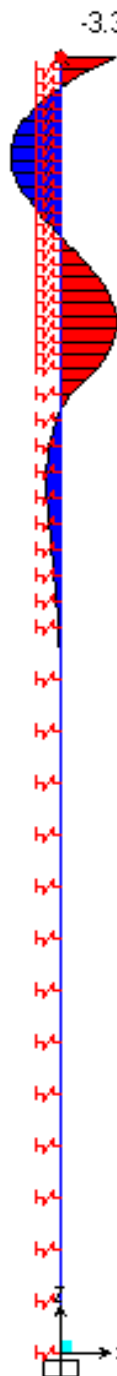


Diagrama de Momentos
(ton-m)

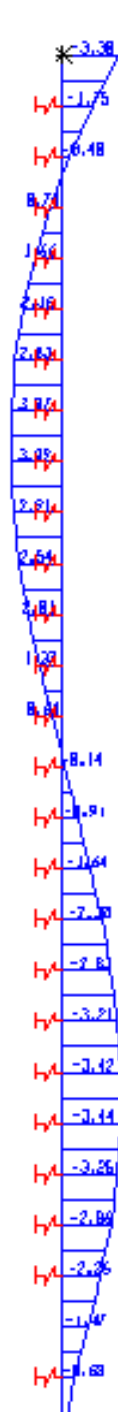


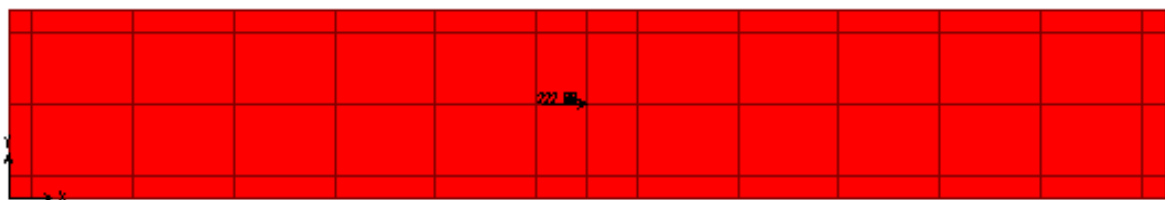
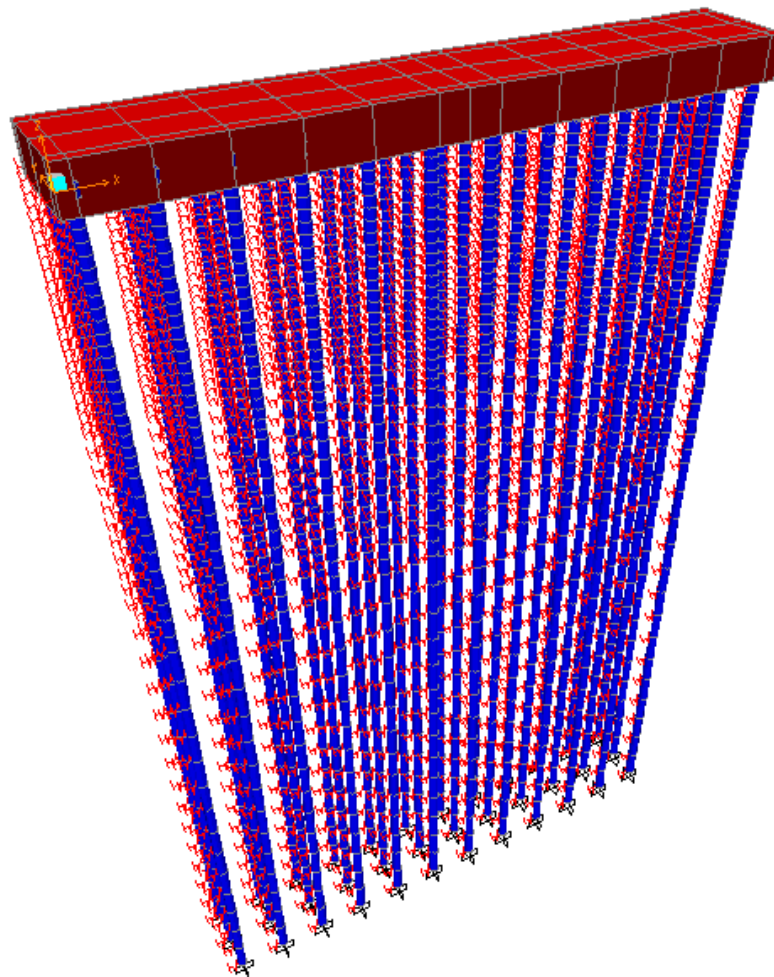
Diagrama de Cortantes
(ton)

RESULTADO OBTENIDOS POR EL SAP2000

Para el grupo de pilotes

Para el presente caso se realizará un modelo con elementos tipo frame para los pilotes y tipo Shell para el cabezal del pilote, considerando resortes elásticos con una discretizacion y rigidez equivalente al utilizado en el pilote individual.

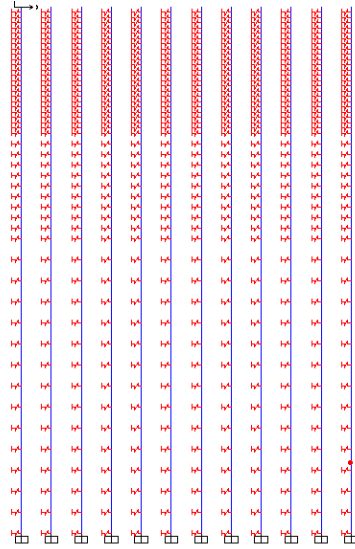
VISTA TRIDIMENSIONAL DEL GRUPO DE PILOTES



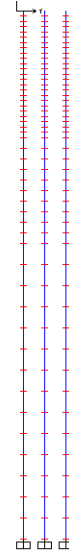
VISTA EN PLANTA DEL CABEZAL DEL PILOTE ($Q_u = 222 \text{ ton}$)



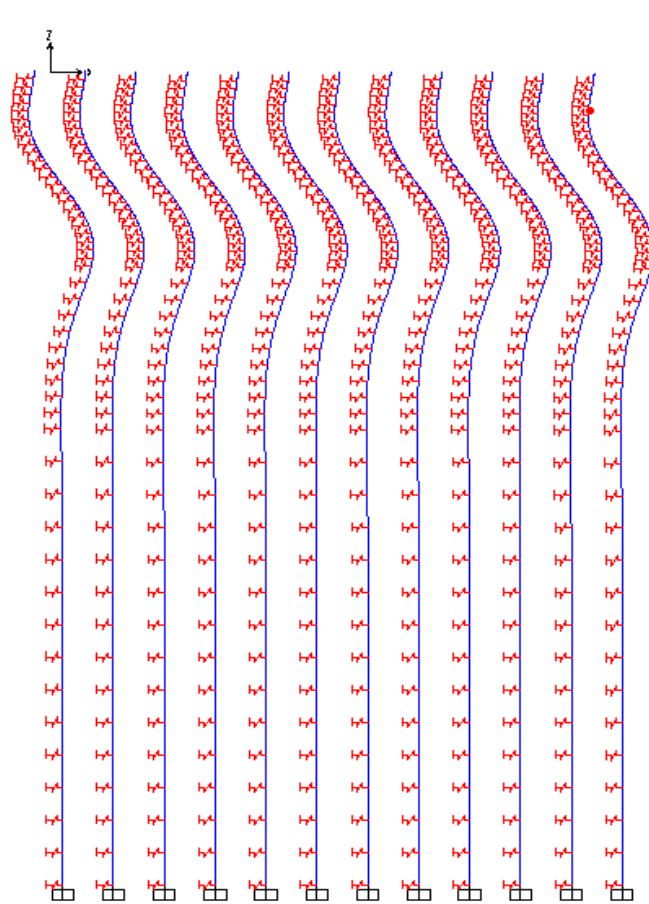
TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



Pilotes en la dirección X-Z



Dirección Y-Z



Pt Obj: 3980
Pt Elm: 632
U1 = -.0032
U2 = .000002663
U3 = .0002
R1 = -.000001912
R2 = .00005
R3 = .000000000

Desplazamientos del grupo de pilotes (m)

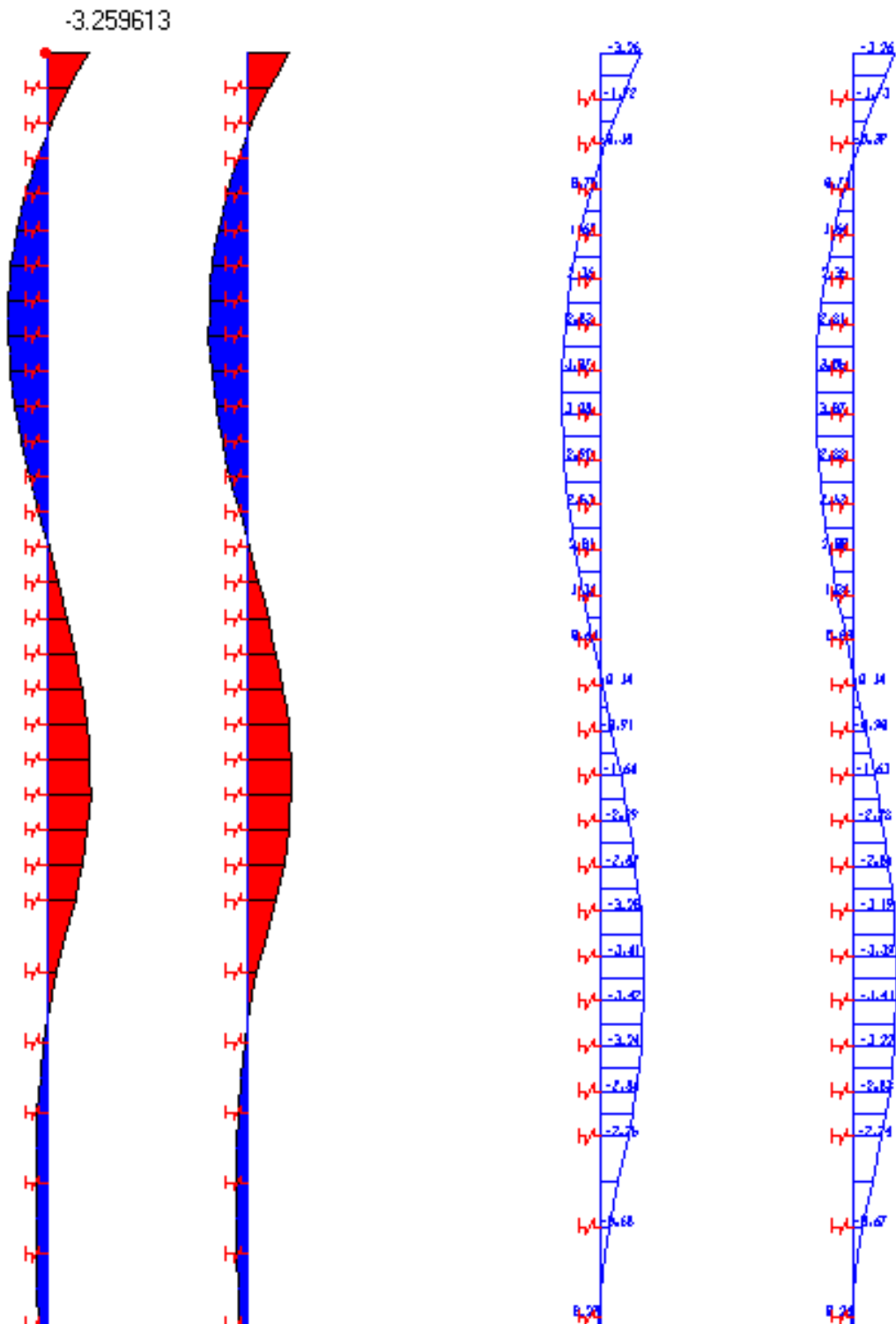


Diagrama de Momentos del grupo de pilotes
(ton-m)

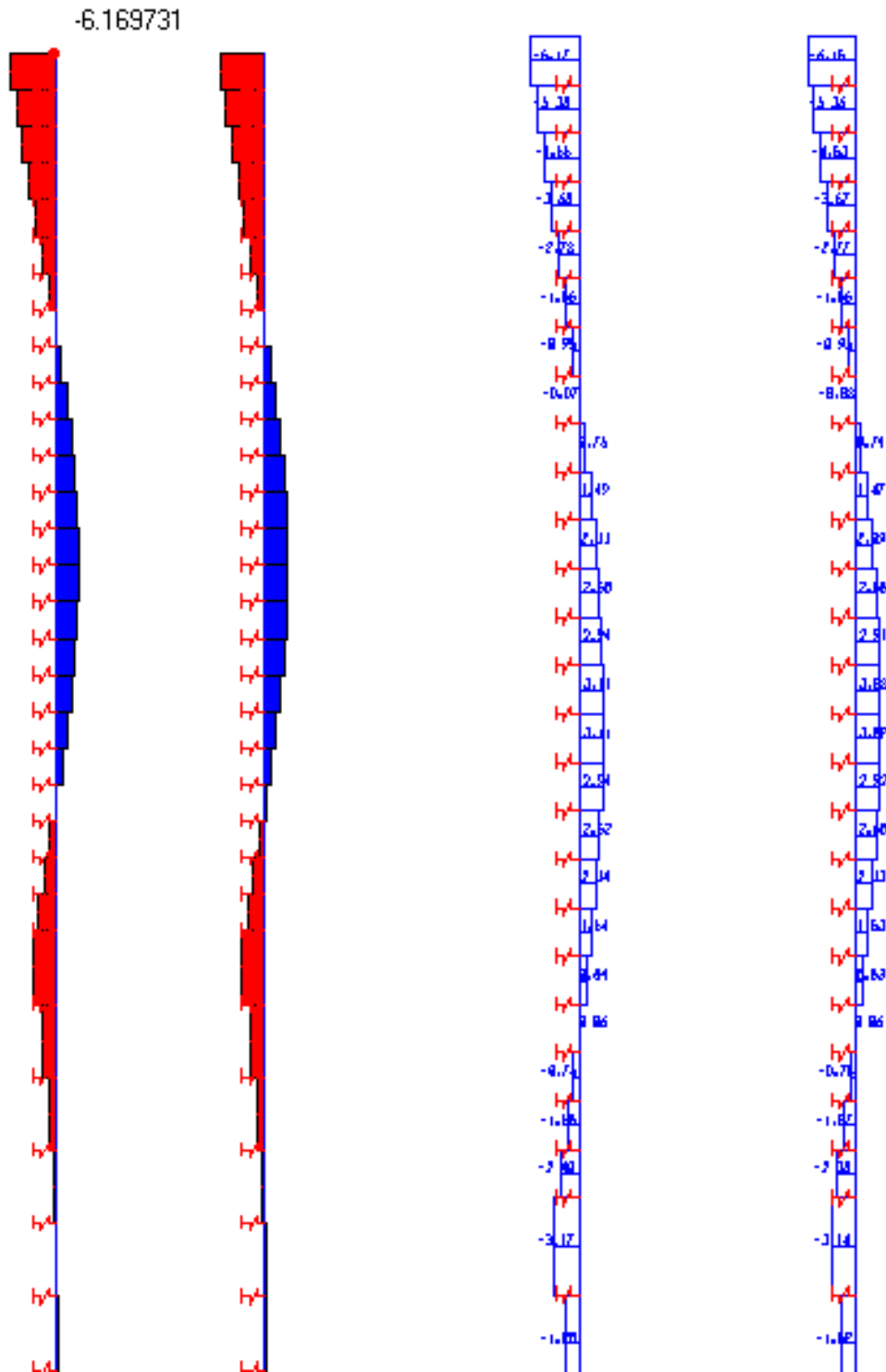


Diagrama de cortantes del grupo de pilotes
(ton)



COMPARACIÓN DE RESULTADOS

RESULTADOS OBTENIDOS	METODO / PRAKASH	SAP 2000
CORTANTE (ton)	6.17	6.17
MOMENTO (ton-m)	3.62	3.26
DESPLAZAMIENTOS (m)	0.0127	0.0032

Como se puede observar los resultados obtenidos son muy aproximados, existiendo diferencias considerables solo en el desplazamiento lateral, siendo el caso que dicho desplazamiento ha sido supuesto en el caso del cálculo analítico, por lo que se debe considerar como el verdadero desplazamiento el obtenido por el SAP 2000.

CAPITULO 4:

DISEÑO DE ELEMENTOS

4.1 Diseño de elementos de la torre solar

Diseño de pared circular (23)

La Norma ACI 307-98 (Desing and Construcción of Reinforced Concrete Chimneys) explica un procedimiento sencillo para el cálculo de la cuantía de acero a utilizar en las paredes de una chimenea circular, basada en el grafico de los diagramas de esfuerzo y deformación que se presentan a continuación, dicho procedimiento consta de cinco pasos:

Dados:

r = radio promedio de la sección.

t = espesor de la sección.

f'_c = resistencia a la compresión del concreto.

F_y = fluencia del acero

E_s = modulo de elasticidad del acero

τ = ángulo mostrado en el grafico.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

P_u = carga vertical ultima.

M_u = momento ultimo.

M_n = momento nominal resistente de la sección.

α = $\frac{1}{2}$ del ángulo central subtendido por el eje neutro.

μ, τ, Ψ = ángulos mostrados en el grafico de esfuerzos y deformaciones

ρ_t = relación del reforzamiento vertical con el área total del concreto.

Paso 1. Asumir un valor de la cuantía vertical total ρ_t .

Paso 2. Por aproximaciones encontrar el valor del ángulo α que satisfaga la ecuación:

$$P_u / r_t f'_c = K_1 = 1.7 Q \lambda + 2 \epsilon_m K_e \omega_t Q_1 + 2 \omega_t \lambda_1$$

Donde:

$$Q_1 = (\sin \Psi - \sin \mu - (\Psi - \mu) \cos \alpha) / (1 - \cos \alpha)$$

$$\lambda_1 = \mu + \Psi - \pi \quad (\text{radianes})$$

$$\cos \tau = 1 - \beta_1 (1 - \cos \alpha)$$

$$\cos \Psi = \cos \alpha - ((1 - \cos \alpha) / \epsilon_m) (F_y / E_s) \geq -1.0$$

$$\cos \mu = \cos \alpha + ((1 - \cos \alpha) / \epsilon_m) (F_y / E_s) \leq 1.0$$

$$\epsilon_m = 0.07 (1 - \cos \alpha) / (1 + \cos \alpha) \leq 0.003$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 (f'_c - 27.6) / 6.9 \geq 0.65, \text{ para } f'_c > 27.6 \text{ MPa}$$

$$K_e = E_s / F_y$$

$$\omega_t = \rho_t F_y / f'_c$$

Paso 3. Sustituir el valor del ángulo α en la siguiente ecuación y calcular M_n :

$$M_n / P_u r = K_3 = \cos \alpha + K_2 / K_1, \quad M_n = P_u r K_3$$

Donde:



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

$$K_2 = 1.7 Q R + \varepsilon_m K_e \omega_t Q_2 + 2 \omega_t K$$

Para $\alpha \leq 5^\circ$

$$Q = (-0.523 + 0.181 \alpha + 0.0154 \alpha^2) + (41.3 - 13.2 \alpha + 1.32 \alpha^2) (t / r)$$

Para $5^\circ < \alpha \leq 10^\circ$

$$Q = (-0.154 + 0.01773 \alpha + 0.00249 \alpha^2) + (16.42 - 1.980 \alpha + 0.0674 \alpha^2) (t / r)$$

Para $10^\circ < \alpha \leq 17^\circ$

$$Q = (-0.488 + 0.076 \alpha) + (9.758 - 0.640 \alpha) (t / r)$$

Para $17^\circ < \alpha \leq 25^\circ$

$$Q = (-1.345 + 0.2018 \alpha - 0.004434 \alpha^2) + (15.83 - 1.676 \alpha + 0.03994 \alpha^2) (t / r)$$

Para $25^\circ < \alpha \leq 35^\circ$

$$Q = (0.993 - 0.00258 \alpha) + (-3.27 + 0.0862 \alpha^2) (t / r)$$

Para $\alpha > 35^\circ$

$$Q = 0.89$$

$$Q_2 = [(\Psi - \mu) (1 + 2 \cos^2 \alpha) + (1/2) (4 \sin 2\alpha + \sin 2\Psi - \sin 2\mu) - 4 \cos \alpha (\sin \alpha + \sin \Psi - \sin \mu)] / (1 - \cos \alpha)$$

$$K = \sin \Psi + \sin \mu + (\pi - \Psi - \mu) \cos \alpha$$

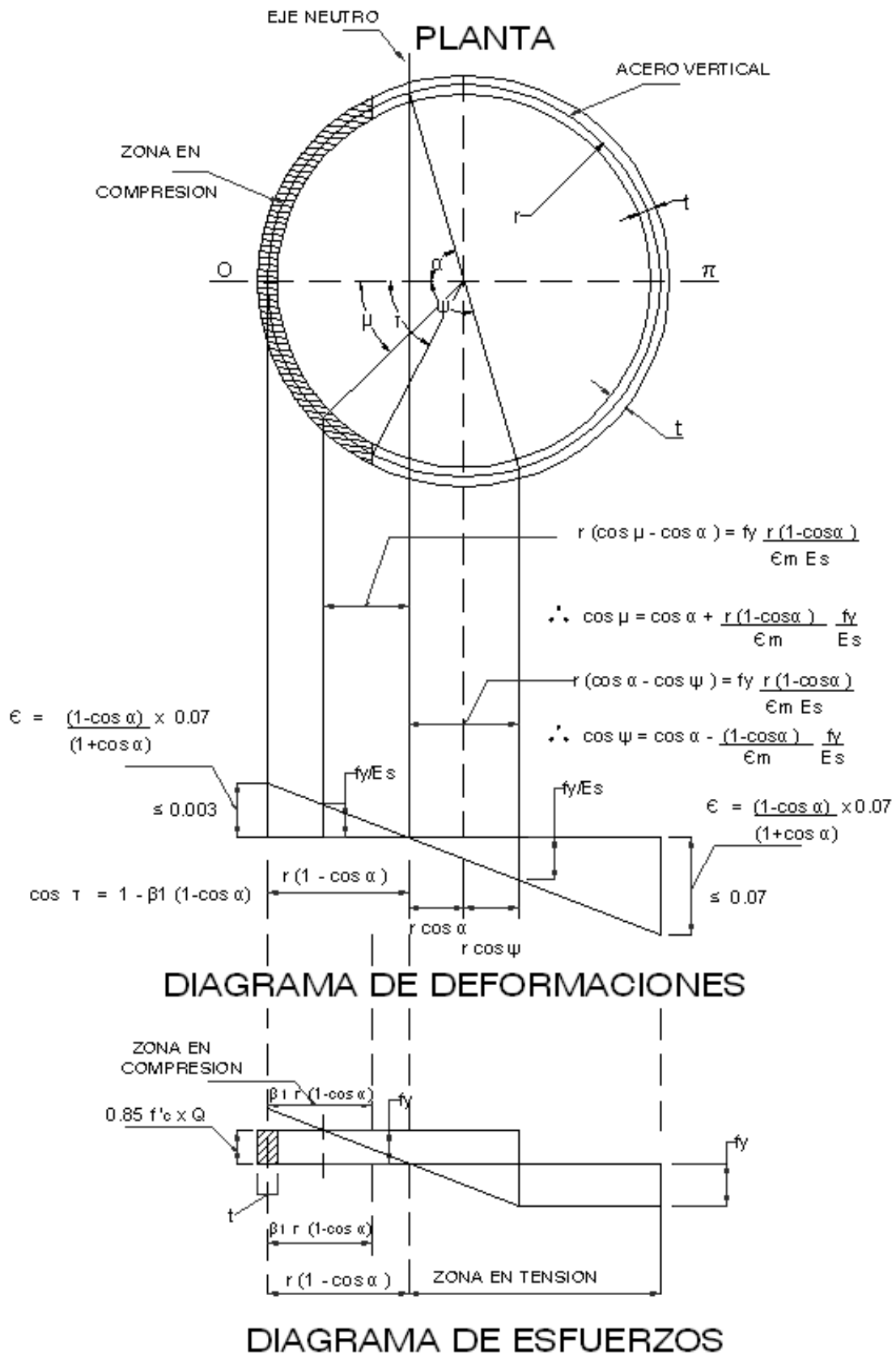
$$R = \sin \tau - \tau \cos \alpha$$

Paso 4. Si $\Phi M_n < M_u$, incrementar la cuantía ρ_t , si $\Phi M_n > M_u$, reducir la cuantía ρ_t

Paso 5. Repetir los pasos del 2 al 4 hasta que $\Phi M_n < M_u$.

En el presente caso no existen aberturas en las paredes de la chimenea, por lo que se ha graficado los esfuerzos y deformaciones y se ha desarrollado el procedimiento para una chimenea sin considerar ninguna abertura.

Para una mejor ilustración se presenta en los anexos una hoja en Excel con el procedimiento descrito, que permite calcular la cuantía de acero en cualquier sección de la chimenea de la torre.





TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Cabe señalar que el programa SAP 2000, calcula las áreas de acero por metro en todas las secciones, los que han sido comparados con el procedimiento analítico, encontrando una gran coincidencia en los resultados.

A continuación se presentan los resultados de las áreas de acero en la estructura:

h (m)	A _{st2} (cm ² /m)	A _{st1} (cm ² /m)
20	29.45	10.36
30	24.52	6.48
40	20.85	6.00
50	18.15	5.46
60	16.41	4.92
70	15.48	4.40
80	15.11	3.92
90	15.01	3.47
100	14.89	3.08
110	14.52	2.83
120	13.75	2.71
130	12.66	2.67
140	10.96	2.63
150	9.02	2.56
160	6.81	2.45
170	4.48	2.25
180	2.29	2.04
190	0.61	1.39
200	0.32	2.64

Cuantía mínima Vertical: $\rho_{\min v} = 0.0025$

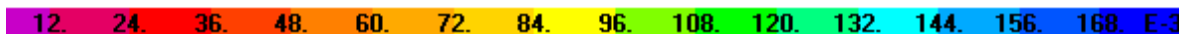
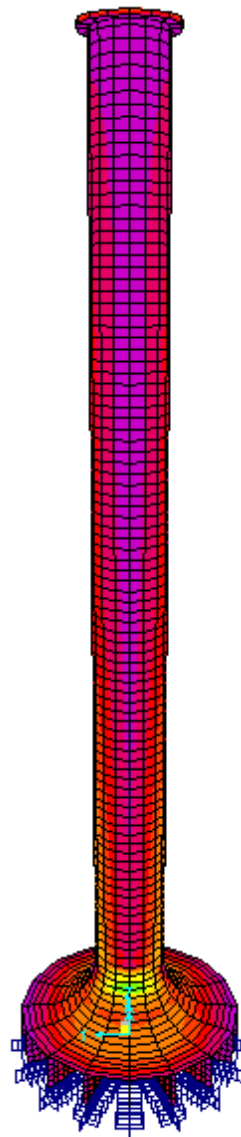
Cuantía mínima Horizontal: $\rho_{\min H} = 0.0025$



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Para una franja de un metro lineal usando acero en dos capas se tiene:

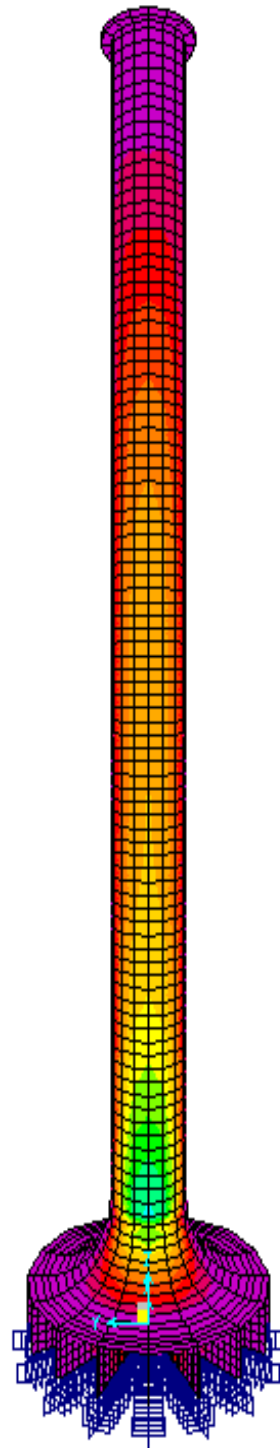
Esesor (cm)	As min v (cm ²)	As min H (cm ²)	Reforzamiento
25	3.13	3.13	Ø 3/8" @ 0.20
30	3.75	3.75	Ø 1/2" @ 0.30
35	4.38	4.38	Ø 1/2" @ 0.275
40	5.00	5.00	Ø 1/2" @ 0.25



Área de acero horizontal (A_{st1}) - cm² / m



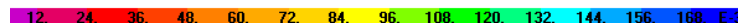
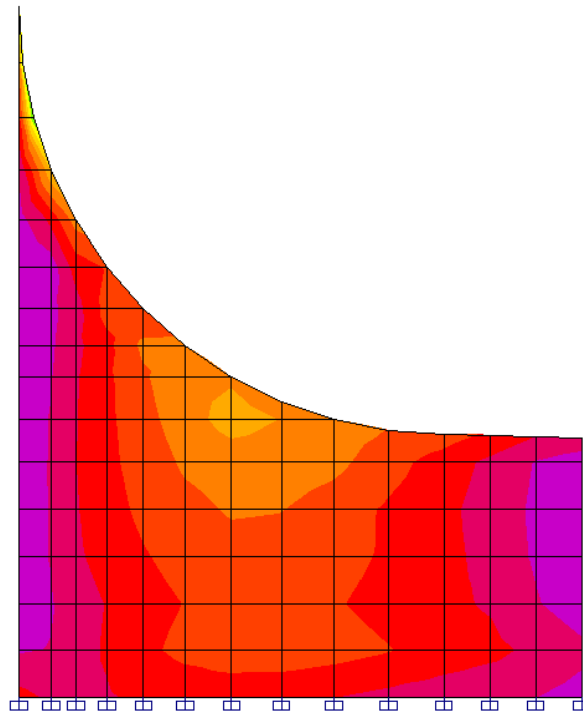
TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



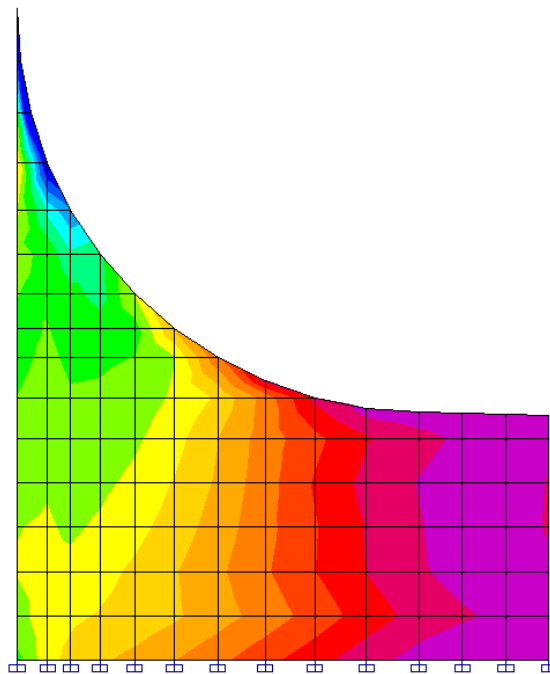
Área de acero vertical (A_{st2}) - cm^2 / m



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



Área de acero horizontal (A_{st1}) - cm^2 / m



Área de acero vertical (A_{st2}) - cm^2 / m



CAPITULO 5:

EVALUACION ECONOMICA DEL PROYECTO

5.1 Costos y Presupuestos del proyecto

a) Inversión

El costo más importante que está relacionado a las obras de infraestructura del proyecto está determinado por el volumen de obra y la estimación de los costos. A nivel de perfil se arrojan las primeras estimaciones de recursos económicos necesarios para la materializar la inversión del proyecto. Estos estudios se basan, fundamentalmente, en proyectos con características similares recientemente terminados (tanques elevados) o en estimaciones en base a la experiencia de los evaluadores como es el caso del presente estudio.

PRESUPUESTO TORRE SOLAR

01 OBRAS PROVISIONALES	497,965
TRABAJOS PRELIMINARES	126,744
03 MOVIMIENTO DE TIERRAS	133,727
04 CIMENTACION	7,225,939
05 ESTRUCTURA TORRE SOLAR	6,841,897
06 COLECTOR SOLAR	1,352,244
07 MIRADOR TURISTICO	74,494
08 CASA DE MAQUINAS	288,000
09 EQUIPAMIENTO	
ELEVADOR DE 200m	750,000
AEROGENERADORES DE 15.6 KW	1,152,000
TRANSFORMADOR DE 2MW	864,000



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

10 VARIOS	300,000
TOTAL COSTO DIRECTO	19,607,010
Gastos generales (10.00%)	1,960,701
Utilidad (10.00%)	1,960,701
SUB TOTAL	23,528,412
IGV (19%)	4,470,398
COSTO TOTAL DE LA OBRA	27,998,810
Estudios de Ingeniería (5.00%)	1,399,941
Supervisión del Proyecto (3.00%)	839,964
TOTAL	30,238,715

**SON: TREINTA MILLONES DOSCIENTOS TREINTA Y OCHO MIL SETECIENTOS
QUINCE Y 00/100 NUEVOS SOLES**

5.2 Análisis de rentabilidad del proyecto

En todas las empresas es necesario, en mayor o en menor medida, hacer frente a inversiones sobre las que se vaya a basar la operativa del negocio. Por analizar la viabilidad de una inversión puede entenderse el hecho de plantearnos si los ingresos derivados de nuestro proyecto de negocio van a ser suficientes para hacer frente a los compromisos adquiridos con los agentes que ponen dinero para financiarlo (accionistas y terceros suministradores de financiación), y en qué medida ese proyecto va a ser rentable.

La evaluación para analizar proyectos de inversión se basan normalmente en el análisis de los ingresos y gastos relacionados con el proyecto, teniendo en cuenta cuándo son efectivamente recibidos y entregados es decir, en los flujos de caja (cash flows) que se obtienen en dicho proyecto con el fin de determinar si son suficientes para soportar el servicio de la deuda anual (principal + intereses) y de retribuir adecuadamente el capital aportado por los socios.

Para evaluar la viabilidad de un proyecto de inversión los indicadores más utilizados por los expertos son: Valor actual neto, tasa interna de retorno, coeficiente beneficio costo, y periodo de recuperación.



**TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE**

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Estos indicadores de evaluación permiten dar una medida, más o menos ajustada, de la rentabilidad que se puede obtener con el proyecto de inversión, antes de ponerlo en marcha. También permiten compararlo con otros proyectos similares, y, en su caso, realizar los cambios en el proyecto que se consideren oportunos para hacerlo más rentable.

Por tanto este trabajo se basa en la evaluación desde el punto de vista empresarial utilizando los indicadores antes mencionados, para una mejor toma de decisión. Aunque es oportuno decir que para un mejor análisis se puede hacer también una evaluación social, un análisis de sensibilidad u otros.

OBJETIVOS

1. El objetivo de la evaluación es la obtención de elementos de juicios necesarios para la toma de decisiones de ejecutar o no el proyecto, respecto a las condiciones que ofrece dicho proyecto.
2. Objetivo general
3. Objetivo específico
 - Manejar los resultados de una evaluación empresarial, para la toma de decisiones del inversionista sobre la ejecución o no del proyecto de inversión.
 - Manejar los indicadores más utilizados que brindan información necesaria para el análisis de las inversiones.
 - Aplicar la evaluación económica, la evaluación financiera y la evaluación del accionista, necesarios para determinar la rentabilidad del proyecto.
 - Identificar los elementos que conforman el Estado de Ganancias y Pérdidas, con la finalidad de efectuar la proyección de las utilidades del proyecto.
 - Manejar los elementos del flujo de caja para proyectar los ingresos en efectivo y los egresos en efectivo, que generen siempre saldos mayores a cero.
 - Identificar los componentes que integran el Estado de fuentes y Usos de Fondos, con el objeto de proyectar saldos de caja positivos que aseguren la operatividad del proyecto.



EVALUACION ECONOMICA Y FINANCIERA DEL PROYECTO DE LA TORRE SOLAR

CONCEPTO

La evaluación de un proyecto es el proceso de medición de su valor, que se basa en la comparación de los beneficios que genera y los costos o inversiones que requiere, desde un punto de vista determinado.

Existen 2 puntos de vista o evaluaciones de un proyecto: evaluación empresarial y evaluación social.

EVALUACION EMPRESARIAL

La evaluación empresarial o evaluación privada, corresponde al punto de vista de la empresa y sus inversionistas privados, quienes efectúan contribuciones de recursos en calidad de aportaciones necesarias para la realización del proyecto.

Este se realiza por lo general desde 3 puntos de vista: Evaluación económica, evaluación financiera, y evaluación del accionista; utilizando para ello el flujo de caja proyectado.

Los indicadores más utilizados son: valor actual neto, tasa interna de retorno, coeficiente beneficio costo, y periodo de recuperación.

VALOR ACTUAL NETO (VAN)

Consiste en actualizar a valor presente los flujos de caja futuros que va a generar el proyecto, descontados a un cierto tipo de interés ("la tasa de descuento"), y compararlos con el importe inicial de la inversión. Como tasa de descuento se utiliza normalmente el costo de oportunidad del capital (COK) de la empresa que hace la inversión.

$$VAN = - A + [FC_1 / (1+r)^1] + [FC_2 / (1+r)^2] + \dots + [FC_n / (1+r)^n]$$

Siendo:

A: desembolso inicial

FC: flujos de caja

n: número de años (1,2,..., n)

r: tipo de interés ("la tasa de descuento")



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

$1/(1+r)^n$: factor de descuento para ese tipo de interés y ese número de años

Si $VAN > 0$: El proyecto es rentable.

Si $VAN = 0$: El proyecto es postergado.

Si $VAN < 0$: El proyecto no es rentable.

A la hora de elegir entre dos proyectos, elegiremos aquel que tenga el mayor VAN.

Este método se considera el más apropiado a la hora de analizar la rentabilidad de un proyecto.

Ejemplo:

Año	Costos y beneficios	Factor de descuento	Flujo actualizado
0	-35,000	$1/(1+0.3)^0$	-35,000
1	15,000	$1/(1+0.3)^1$	11,538
2	15,000	$1/(1+0.3)^2$	8,876
3	15,000	$1/(1+0.3)^3$	6,827
4	15,000	$1/(1+0.3)^4$	5,252
5	15,000	$1/(1+0.3)^5$	4,040
VAN			1,534

TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

Se define como la tasa de descuento o tipo de interés que iguala el VAN a cero, es decir, se efectúan tanteos con diferentes tasas de descuento consecutivas hasta que el VAN sea cercano o igual a cero y obtengamos un VAN positivo y uno negativo.

Si $TIR > \text{tasa de descuento } (r)$: El proyecto es aceptable.

Si $TIR = r$: El proyecto es postergado.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Si $TIR < \text{tasa de descuento } (r)$: El proyecto no es aceptable.

Este método presenta más dificultades y es menos fiable que el anterior, por eso suele usarse como complementario al VAN.

Ejemplo:

Año	Costos y beneficios	Factor actualizado $r = 32 \%$	Flujo actualizado $r = 33 \%$
0	-35,000	-35,000	-35,000
1	15,000	11,364	11,278
2	15,000	8,609	8,480
3	15,000	6,522	6,376
4	15,000	4,941	4,794
5	15,000	3,743	3,604
VAN		178	-468

$TIR = 32 \% + 178 / (178 + 468) = 32.3 \%$

PERIODO DE RECUPERACION (PR)

Se define como el período que tarda en recuperarse la inversión inicial a través de los flujos de caja generados por el proyecto. La inversión se recupera en el año en el cual los flujos de caja acumulados superan a la inversión inicial.

Se efectúa por tanteos utilizando los valores del VAN hasta obtener un valor negativo y uno positivo.

No se considera un método adecuado si se toma como criterio único. Pero, de la misma forma que el método anterior, puede ser utilizado complementariamente con el VAN.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

Ejemplo:

Año	Costos y beneficios	Valores actualizados t = 4 años	Valores actualizados t = 5 años
0	-35,000	-35,000	-35,000
1	15,000	11,538	11,538
2	15,000	8,876	8,876
3	15,000	6,827	6,827
4	15,000	5,252	5,252
5	15,000		4,040
VAN		-2,507	1,533

$PR = 4 + 2,507 / (2,507 + 1,533) = 4.62$ años

EVALUACION ECONOMICA

La evaluación económica es aquella que identifica los meritos propios del proyecto, independientemente de la manera como se obtengan y se paguen los recursos financieros que necesite y del modo como se distribuyan los excedentes o utilidades que genera. Los costos y beneficios constituyen el flujo económico.

Su valor residual o valor de recuperación, es el valor hipotético al que se vendería el proyecto al final del horizonte planificado, sin considerar deudas por préstamos de terceros; este se determina en el balance general proyectado correspondiente al último año, siendo igual al activo total (sin caja – banco) menos el pasivo total (sin préstamo).



EVALUACION FINANCIERA

La evaluación financiera es aquella que toma en consideración la manera como se obtengan y se paguen los recursos financieros necesarios para el proyecto, sin considerar el modo como se distribuyen las utilidades que genera.

Los costos y beneficios constituyen el flujo financiero; y su valor residual es igual al valor residual de la evaluación económica.

EVALUACION DEL ACCIONISTA

La evaluación del accionista es aquella que toma en consideración la manera como se distribuyen las utilidades a los accionistas, generados por sus aportes propios.

Los costos lo constituyen los aportes propios y los beneficios lo constituyen los dividendos recibidos; y su valor residual es igual al patrimonio de la empresa del último año.

¿QUIEN PUEDE ESTAR INTERESADO EN UTILIZAR LA EVALUACION EMPRESARIAL PARA ANALIZAR LA VIABILIDAD DE PROYECTOS DE INVERSION?

- Empresas de cualquier tamaño y en cualquier sector. La evaluación empresarial contribuye a evaluar la rentabilidad de un proyecto de inversión realizado por cualquier tipo de empresa.
- Empresas de servicios profesionales y financieros. Bancos comerciales y de inversión, empresas de capital riesgo, asesores económico-financieros, bufetes de abogados, etc.
- Promotores de nuevos negocios. Para una evaluación inicial del proyecto de inversión antes de incurrir en más gastos. También como apoyo numérico de calidad a la hora de buscar financiación.

¿QUE VENTAJAS TIENE EL UTILIZAR UNA EVALUACION EMPRESARIAL PARA ANALIZAR LA VIABILIDAD DE PROYECTOS DE INVERSION?

- Estos modelos son aplicables a multitud de productos y sectores. Pueden ser adaptados a las características específicas de un determinado sector o producto.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

- Ahorro de tiempo y dinero. Una evaluación empresarial le ahorra su tiempo o deja tiempo libre a sus empleados para dedicarse a otras tareas más importantes.
- Concentración en los aspectos básicos de su negocio. Una evaluación empresarial le permite dedicar su atención a tomar la decisión de si invertir o no en el proyecto, o de concentrarse en mejorar aquellos aspectos que lo puedan hacer más rentable. En lugar de perder el tiempo en diseñar complejos modelos financieros, usted se limita a utilizarlos.
- Mejora en el proceso de toma de decisiones. Cuando sus decisiones vayan a tener una alta repercusión financiera, una evaluación empresarial le permite cambiar los puntos claves de su inversión y evaluar múltiples escenarios. Usted verá inmediatamente los efectos de sus decisiones, y podrá, llegar a decisiones óptimas de una forma rápida y sencilla.

EVALUACION ECONOMICA DE LA TORRE SOLAR

Para realizar la evaluación económica de la torre solar, previamente se ha recopilado información de la Empresa Electro Oriente S.A, quienes nos proporcionaron los datos de los estados financieros de las principales ciudades de la Región Loreto, entre ellas la zona de interés del presente estudio, es decir la ciudad de Nauta.

Para realizar la evaluación económica de la torre solar se ha considerado dos (02) alternativas y se ha desarrollado un flujo de caja proyectado en Nuevos Soles en un periodo de tiempo de 30 años para cada alternativa, cabe señalar que el presente proyecto tiene una vida útil de 50 años, a continuación se detalla cada una de las alternativas consideradas:

ALTERNATIVA N° 01:

La primera alternativa consiste el mantenimiento y la reparación de los equipos existentes en la Zonal Nauta, para lo cual se requiere un monto de inversión de S/. 750,000.00 (SETECIENTOS CINCUENTA MIL Y 00/100 NUEVOS SOLES), dicha inversión se realizara durante el primer año del flujo de caja planteado, los ingresos y egresos considerados en el flujo de caja proyectado, son los mismos que aparecen en los estados financieros proporcionados por Electro Oriente S.A.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

ELECTRO ORIENTE S.A.
 ZONA I - LORETO

ESTADO DE GANANCIAS Y PERDIDAS AL 31.12.2009.
 POR NATURALEZA DEL GASTO
 (En Nuevos Soles)

	LOCALIDADES						Total Loreto
	Iquitos	Requena	Caballo Cocha	Nauta	Contamana	Tamshiyacu	
KWH Producidos							-
Total KWH Producidos	-	-	-	-	-	-	-
KWH Facturados al consumidor	184,969,460	2,879,683	1,770,705	2,093,395	2,666,433	335,891	194,715,566
Total KWH Facturados al Consumidor	184,969,460	2,879,683	1,770,705	2,093,395	2,666,433	335,891	194,715,566
INGRESOS							
Venta de energía a usuarios	77,711,858	1,295,335	803,698	924,738	1,223,707	143,827	82,103,163
Venta de energía en Barra	-	-	-	-	-	-	-
Por FOSE - Transferencias Recibidas	3,391,224	175,365	86,768	117,628	147,315	31,996	3,950,296
Compensación por Sistema Aislado	21,285,926	1,366,510	854,829	1,072,839	1,295,877	170,655	26,046,636
Venta de Otros Productos	1,835,068	58,311	43,626	44,493	40,237	11,057	2,032,792
TOTAL INGRESOS	104,224,076	2,895,521	1,788,921	2,159,698	2,707,136	357,535	114,132,887
COSTOS							
Combustibles	64,804,237	2,076,282	1,227,942	1,499,257	1,849,755	303,880	71,761,353
Lubricantes	1,574,355	-	-	6,559	8,564	373	1,589,851
Suministros Diversos	6,642,311	80,523	60,595	38,630	92,172	5,553	6,919,784
Cargas de Personal	7,335,116	322,032	209,454	278,674	260,063	-	8,405,339
Servicios Prestados por Terceros	6,448,035	319,880	237,552	197,105	383,519	119,335	7,705,426
Tributos	1,654,136	28,351	18,787	23,485	27,765	3,348	1,755,872
Cargas Diversas de Gestion	1,754,605	26,973	19,789	10,274	23,137	3,016	1,837,794
Depreciacion de Inm. Maq. y Equipo	6,732,398	200,730	77,203	82,380	264,935	29,747	7,387,393
Comp. por Tiempo de Servicio	474,842	21,174	12,488	17,115	16,425	-	542,044
Prov. de Ctas de Cobranza Dudosa	27,217	12,065	3,864	978	-	751	44,875
Otras Provisiones	829,605	-	-	-	-	-	829,605
TOTAL COSTOS	98,276,857	3,088,010	1,867,674	2,154,457	2,926,335	466,003	108,779,336
RESULTADO DE OPERACIÓN	5,947,219	(192,489)	(78,753)	5,241	(219,199)	(108,468)	5,353,551
OTROS INGRESOS - EGRESOS							
Ingresos financieros	1,657,743	10,278	5,282	5,630	8,816	1,223	1,688,972
Gastos financieros	(935,396)	-	-	-	(22)	-	(935,418)
Ingresos Diversos	1,504,708	1,352	2,500	2,353	469	307	1,511,689
Otros Ingresos	194,297	20,448	610	2,166	2,832	928	221,281
Otros Gastos	(458,984)	-	-	-	-	-	(458,984)
TOTAL OTROS INGRESOS (EGRESOS)	1,962,368	32,078	8,392	10,149	12,095	2,458	2,027,540
RESULTADO DEL EJERCICIO	7,909,587	(160,411)	(70,361)	15,390	(207,104)	(106,010)	7,381,091
REI del ejercicio							
Utilidad (Perdida) del ejercicio	7,909,587	(160,411)	(70,361)	15,390	(207,104)	(106,010)	7,381,091

ALTERNATIVA N° 02:

La segunda alternativa consiste en la construcción de la Torre Solar, con un monto de inversión de S/. 30, 238,815.00 (TREINTA MILLONES DOSCIENTOS TREINTA Y OCHO MIL SETECIENTOS QUINCE Y 00/100 NUEVOS SOLES), dicha inversión se realizará durante el primer año y medio (18 meses) del flujo de caja proyectado, en esta segunda alternativa, se considera como egresos los mismos que aparecen en los estados financieros, reduciendo lógicamente el costo de los combustibles y algunos conceptos que no son necesarios en el proyecto de la Torre Solar, como son los combustibles, lubricantes, etc. En esta alternativa se ha considerado como ingresos por venta de energía los mismos que aparecen en los estados financieros, adicionándole los ingresos por los otros usos que proporciona la Torre solar como son:



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

INGRESOS POR USO DEL MIRADOR TURISTICO

Para evaluar este tipo de ingreso se ha tomado en cuenta el número de turistas nacionales y extranjeros que visitan la Región Loreto, siendo el caso que en el año 2009, la cantidad de turistas ha sido de 130,000 visitantes. Debido a la ubicación de la Torre Solar, es decir cerca a la unión de los ríos Marañón y Ucayali, donde nace el río Amazonas, frente a la reserva nacional del Pacaya Samiria y debido a la gran altura del mirador (única en su género), es muy probable que la concurrencia sea mayoritaria, sin embargo se está proyectando porcentajes de visita que van desde el 30% al 70% en forma gradual. El precio del ticket de ingreso al mirador se ha considerado de S/. 50.00, tomando como referencia el ticket de ingreso a la reserva nacional del Pacaya Samiria, que es de S/ 65.00, con esta proyección resultan ingresos anuales que van desde S/. 1, 950,000.00 hasta S/. 4,550,000.00, sin tomar en cuenta el incremento de turistas por año, con lo que resultaría mayores ingresos.

INGRESOS POR USO DEL INVERNADERO AGRICOLA

El área útil para uso de invernadero agrícola es de 7.3 hectáreas, siendo la producción promedio anual de 300 toneladas por hectárea, con una utilidad promedio de S/. 600.00 por tonelada, con lo que resultan ingresos anuales de S/. 1,314,000.00.

INGRESOS POR BONOS DE CARBONO

Las reducciones de emisiones de GEI se miden en toneladas de CO₂ equivalente, y se traducen en Certificados de Emisiones Reducidas (CER). Un CER equivale a una tonelada de CO₂ que se deja de emitir a la atmósfera, y puede ser vendido en el mercado de carbono a países industrializados, de acuerdo a la nomenclatura del protocolo de Kyoto.

De acuerdo a los datos proporcionados por la empresa Electro Oriente S.A., sobre la Zonal Nauta respecto al año 2009, se ha facturado un total de 4,638,179 kWh. Por otro lado la cantidad de kilogramos de dióxido de carbono (CO₂) que se generan por cada kWh de generación de electricidad utilizando combustibles fósiles es de 0.358 kg / kWh, con lo que dicha zonal esta generando un total de 1,660 ton de CO₂ al año, siendo el precio promedio de los Certificados de Emisiones Reducidas (CER) de US\$ 12.93 por tonelada de CO₂, con lo que resultaría un ingreso por dejar de emanar 1,660 ton de CO₂ equivalente a S/. 61,815 nuevos soles al año.



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS:

INDICADORES FINANCIEROS DEL PROYECTO ADI:

	VAN al 8% anual	TIR
ALTERNATIVA N° 01	S/. -106,788.43	6.4%
ALTERNATIVA N° 02	S/. 37,017,368.02	17.9%

INDICADORES FINANCIEROS DEL PROYECTO DDI:

	VAN al 8% anual	TIR
ALTERNATIVA N° 01	S/. -393,745.26	-2.5%
ALTERNATIVA N° 02	S/. 3,675,025.32	9.8%

Como se aprecia de los resultados de la evaluación económica del proyecto, la segunda alternativa es la más rentable y conveniente, contando con indicadores financieros muy favorables, mientras que la primera alternativa tiene indicadores negativos, lo que conlleva a rechazar dicha alternativa, ya que ni siquiera se podría pagar el financiamiento de los S/. 750,000 en el lapso de los 30 años de evaluación.

A pesar de que el monto de inversión en la segunda alternativa es muy elevado en comparación con la primera alternativa (40 veces mayor), la rentabilidad es muy elevada y no tiene punto de comparación con la primera alternativa, y si a eso le añadimos el beneficio social que genera dejar de contaminar el medio ambiente, se convierte en un proyecto muy favorable, que permitiría generar el desarrollo en la Región Loreto. Por otro lado el Perú se convertiría en un modelo para los demás países al reducir la emanación de gases efecto invernadero y contribuir con la reducción del calentamiento global, con soluciones técnicas viables como la torre solar.



CAPITULO 6:

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- 6.1.1 Se ha demostrado la viabilidad técnica y económica del proyecto de la torre solar, concluyendo que es una alternativa viable, beneficiosa y muy rentable, que permitiría colocar al Perú como modelo para los demás países, al plantear soluciones técnicas para la generación de electricidad con energías renovables, reduciendo la emanación de gases efecto invernadero y contribuyendo con la reducción del calentamiento global.
- 6.1.2 La estructura de la torre solar cumple con todos los requisitos de resistencia y rigidez establecidos en las normas técnicas del Reglamento Nacional de Edificaciones así como en la Norma ACI 307.98.
- 6.1.3 La utilización de métodos analíticos considerando a la chimenea o torre solar como una viga en voladizo, método desarrollado en el curso de Estructuras Especiales de la maestría en Ingeniería Estructural, conllevan a resultados muy favorables, que han sido comparados con un modelo matemático con malla de elementos finitos desarrollado en el programa SAP 2000.
- 6.1.4 Se ha determinado en el presente estudio que los valores obtenidos utilizando la Norma técnica E-020 del Reglamento Nacional de Edificaciones respecto a las cargas de viento, son muy similares a los obtenidos utilizando la Norma ACI 307-98, siendo el caso que dicha norma es la más conservadora respecto a los demás códigos como el código CICIND (Comité Internacional de la industrial de Chimeneas - Comité International Des Cheminees Industrielles) y el IS (Código de la India – Indian Standard Code).
- 6.1.5 A pesar de que toda la bibliografía disponible, respecto al efecto de la interacción suelo estructura (ISE), indica que la fuerza cortante en la base siempre debe reducirse, esto no sucede en algunos casos, ya que para estructuras que tiene gran rigidez en la zona cercana a la base (como en el caso de la presente



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

estructura - torre solar) o en los primeros niveles o sótanos en el caso de edificios, se verifica que tomando en consideración el efecto de la interacción suelo estructura en suelos flexibles, la fuerza cortante en la base aumenta a medida que se incrementa la rigidez en la parte inferior de la estructura.

6.2 Recomendaciones

- 6.2.1 Se recomienda la realización de modelos a escala, a fin de calibrar el modelo matemático desarrollado en el presente estudio.
- 6.2.2 Se recomienda combinar los dos modelos planteados para el diseño de la cimentación de la torre solar, es decir utilizando la platea de cimentación y la utilización de pilotes de mayor diámetro, esto permitirá evaluar una posible reducción de los costos de la cimentación.
- 6.2.3 Es recomendable realizar un estudio de canteras y diseños de mezcla para el concreto a utilizar en la construcción de la torre solar, debido a la carencia de agregado grueso en la zona de interés del presente estudio.
- 6.2.4 Se debe tener en cuenta que en Noviembre del 2008 el ACI, publico un nuevo documento sobre “Código de Requerimientos para Chimeneas de Concreto Armado” (ACI 307-08). Este nuevo documento reemplaza al existente diseño estándar de chimeneas “Diseño y construcción de chimeneas de concreto armado” (ACI 307-98). Uno de los más cambios más significantes es acerca del diseño sísmico, se incluye los efectos de la amplificación del suelo en el diseño modal espectral, usa un factor de modificación (R) de 1.50, considera el efecto P-delta y adiciona criterios sísmicos para chimeneas de concreto tipo torres y para chimeneas lineales tipo domésticas.
- 6.2.5 La tarea de promoción del proyecto es de vital importancia para el sosteniendo del mismo, por lo que se recomienda realizar las coordinaciones del caso con las instituciones involucradas en el presente proyecto.

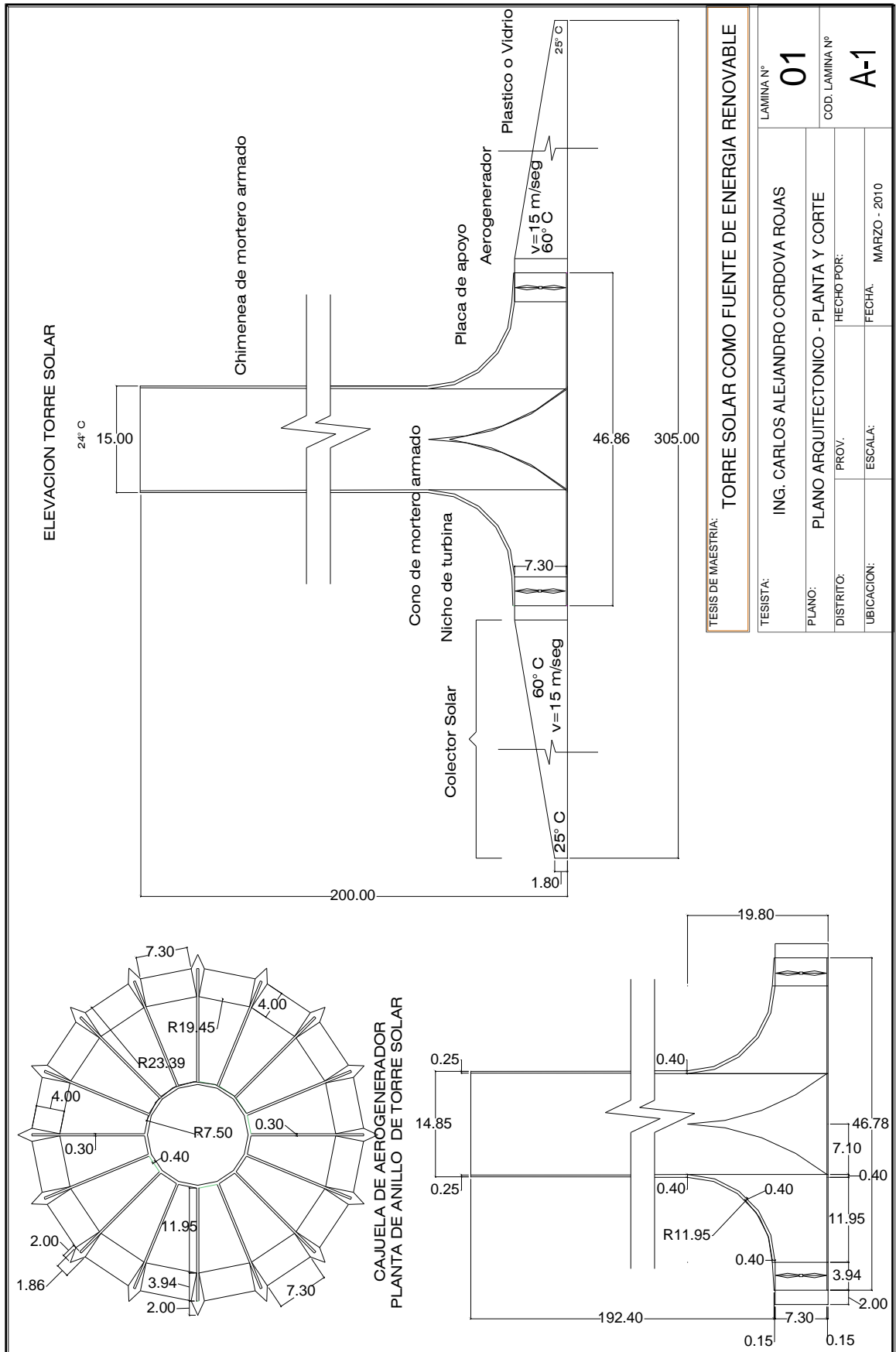
7. ANEXOS



7.1 Planos del Proyecto

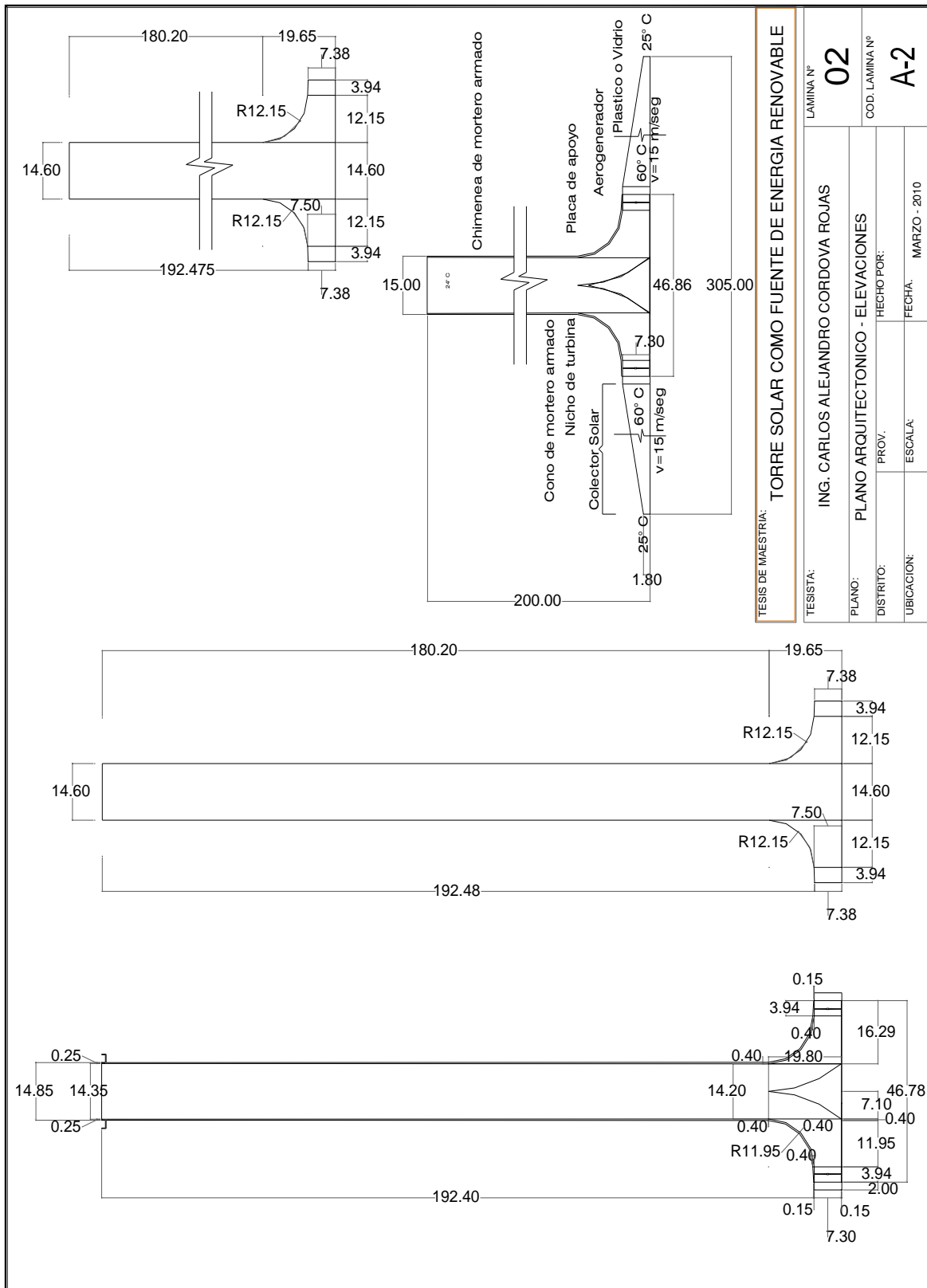


TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas





TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas





TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

ESPECIFICACIONES PILOTES

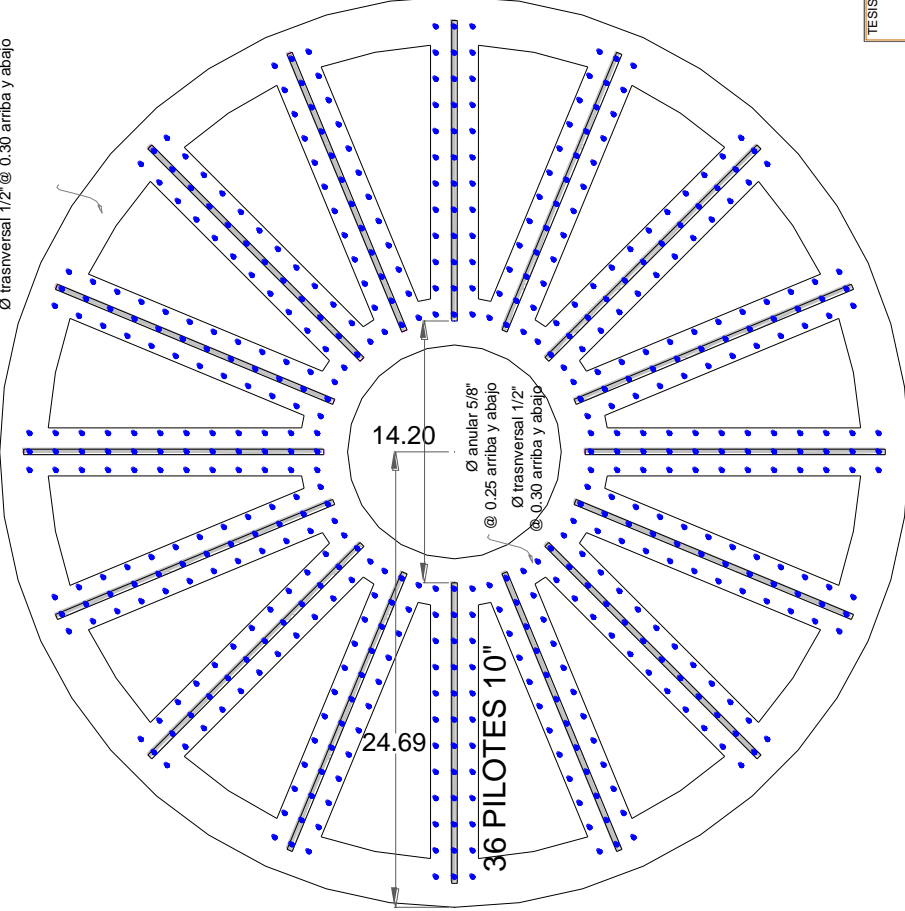
CAP. CARGA ADM. = 47 TONPILOTE
 ACERO PILOTE..... A-36
 ACERO DE PLANCHAS A-36
 SOLDADURA E-60XX
 RECUBRIMIENTOS REFUERZOS : 4 cm.
 REALIZAR POR LO MENOS UNA PRUEBA DE CARGA (CARGA MAXIMA = 94 TON).
 LONGITUD (L) : MINIMA DE ACUERDO A ESTUDIO DE MECANICA DE SUELOS.

ESPECIFICACIONES GENERALES

CONCRETO PAREDES..... $f_c = 210 \text{ Kg./cm}^2$.
 CONCRETO PLACAS Y CIMENTACIÓN..... $f_c = 210 \text{ Kg./cm}^2$.
 ACERO $f_y = 4200 \text{ Kg./cm}^2$.
 SOBRECARGA $S/C = 400 \text{ kg./m}^2$ en mirador
 RECUBRIMIENTOS LIBRES
 LOSAS (NO EN CONTACTO CON AGUA) 2.0 cm.
 CHIMENEA CIRCULAR 3.0 cm.
 PLACAS DE APOYO 3.0 cm.
 CARAS VACEADAS CONTRA EL SUELO 7.0 cm.
 CARAS VACEADAS CONTRA SOLADO 5.0 cm.
 CONSIDERACIONES SISMORRESISTENTES
 SISTEMA ESTRUCTURAL..... MUROS Y LOSAS DE CONCRETO ARMADO
 PARAMETROS DE FUERZA SISMICA..... $Z=0.30, U=1.50, S=1.2, T_p=0.6\text{seg.}$
 $R=3$

NOTAS:
 1. TODAS LAS ARMADURAS DEBERAN TRASLAPAR 50 VECES SU DIAMETRO.
 NO SE TRASLAPARA MAS DEL 20% DEL REFUERZO EN UNA MISMA SECCION.

Ø anular 5/8" @ 0.25 arriba y abajo
 Ø trasversal 1/2" @ 0.30 arriba y abajo

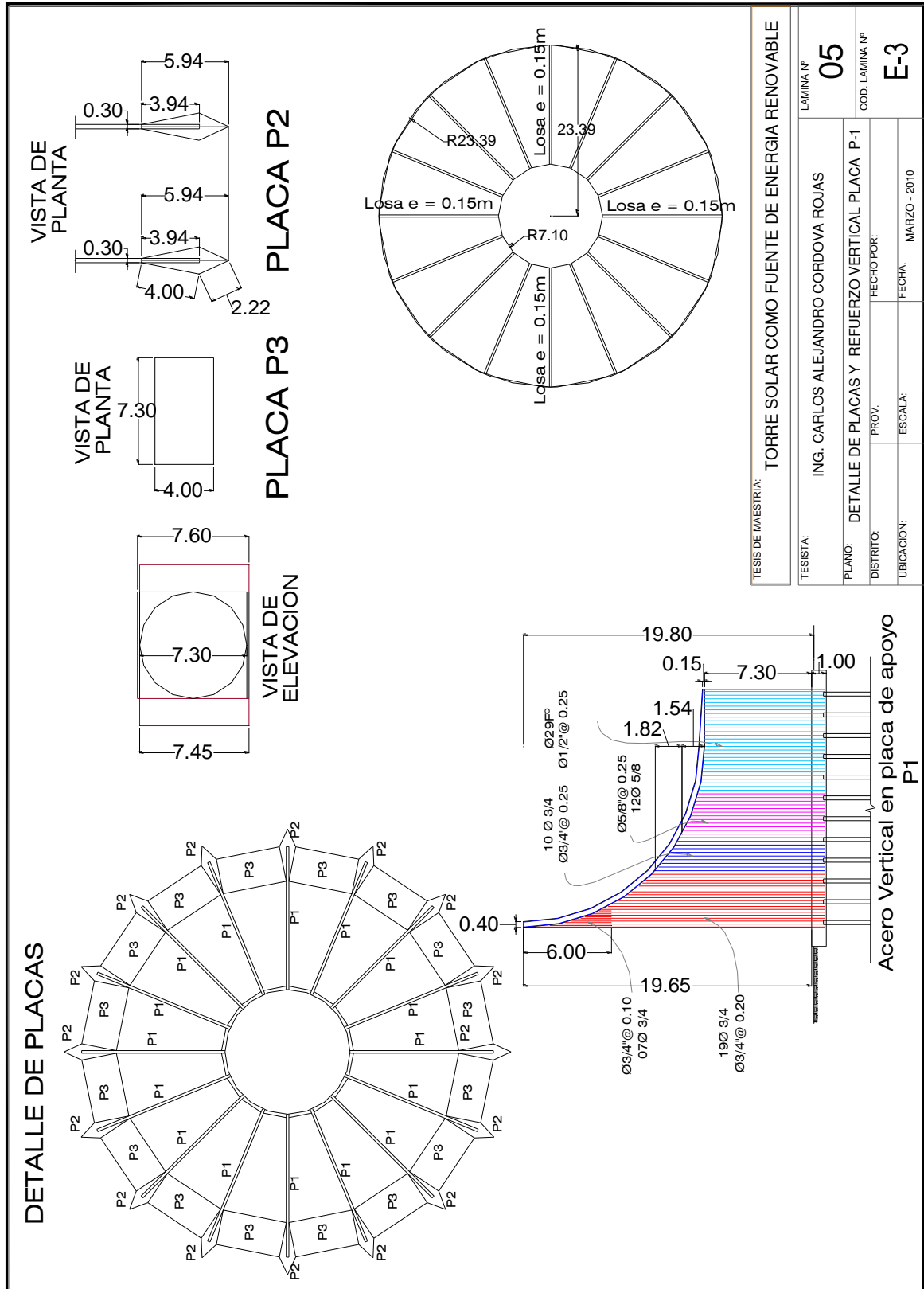


TESIS DE MAESTRIA:		TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE	
TESISTA:	ING. CARLOS ALEJANDRO CORDOVA ROJAS		
	LAMINA Nº	03	
PLANO:	ESTRUCTURA DE CIMENTACION - DETALLE DE PILOTES		
DISTRITO:	PROV.	HECHO POR:	COD. LAMINA Nº
UBICACION:	ESCALA:	FECHA:	E-1
		MARZO - 2010	

PLANTA DE ANILLO DE CIMENTACION

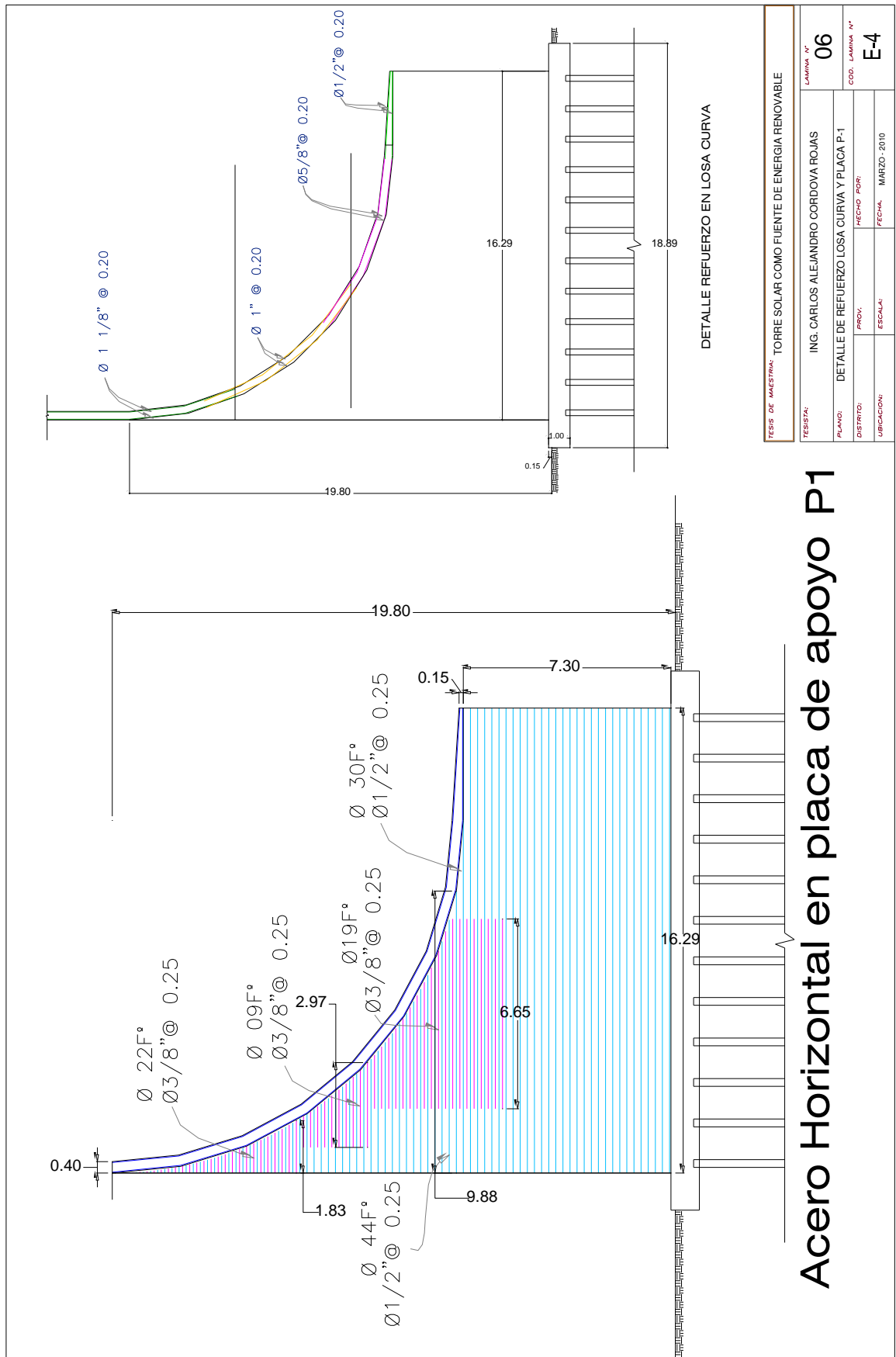


TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas





TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

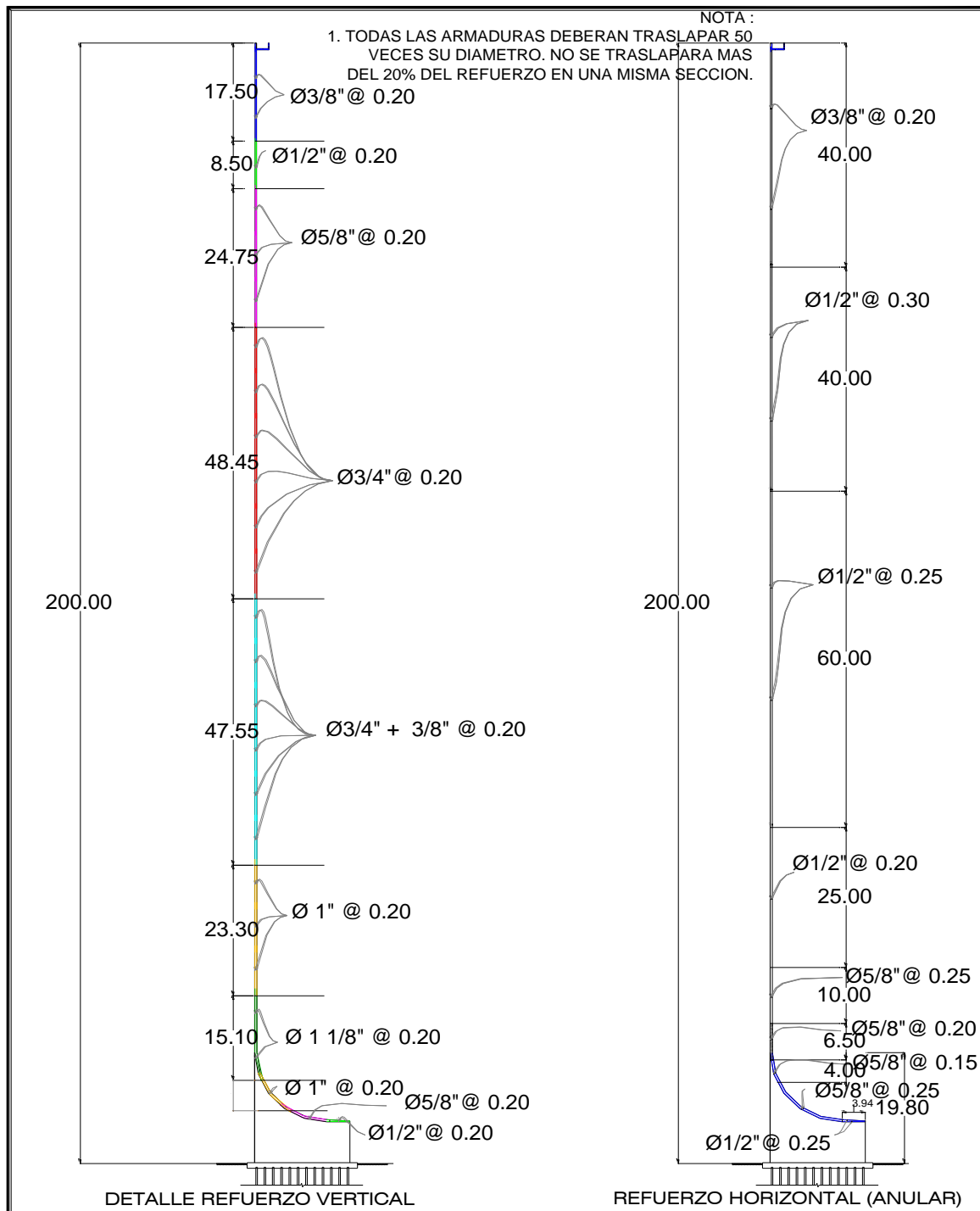


Acero Horizontal en placa de apoyo P1

TESIS DE MAESTRIA - TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE	
TESISTA: ING. CARLOS ALEJANDRO CORDOVA ROJAS	LAMINA N° 06
PLANO: DETALLE DE REFUERZO LOSA CURVA Y PLACA P-1	COD. LAMINA N° E-4
DISTRITO:	HECHO POR:
UBICACION:	FECHA: MARZO - 2010
PROY.:	ESCALA:



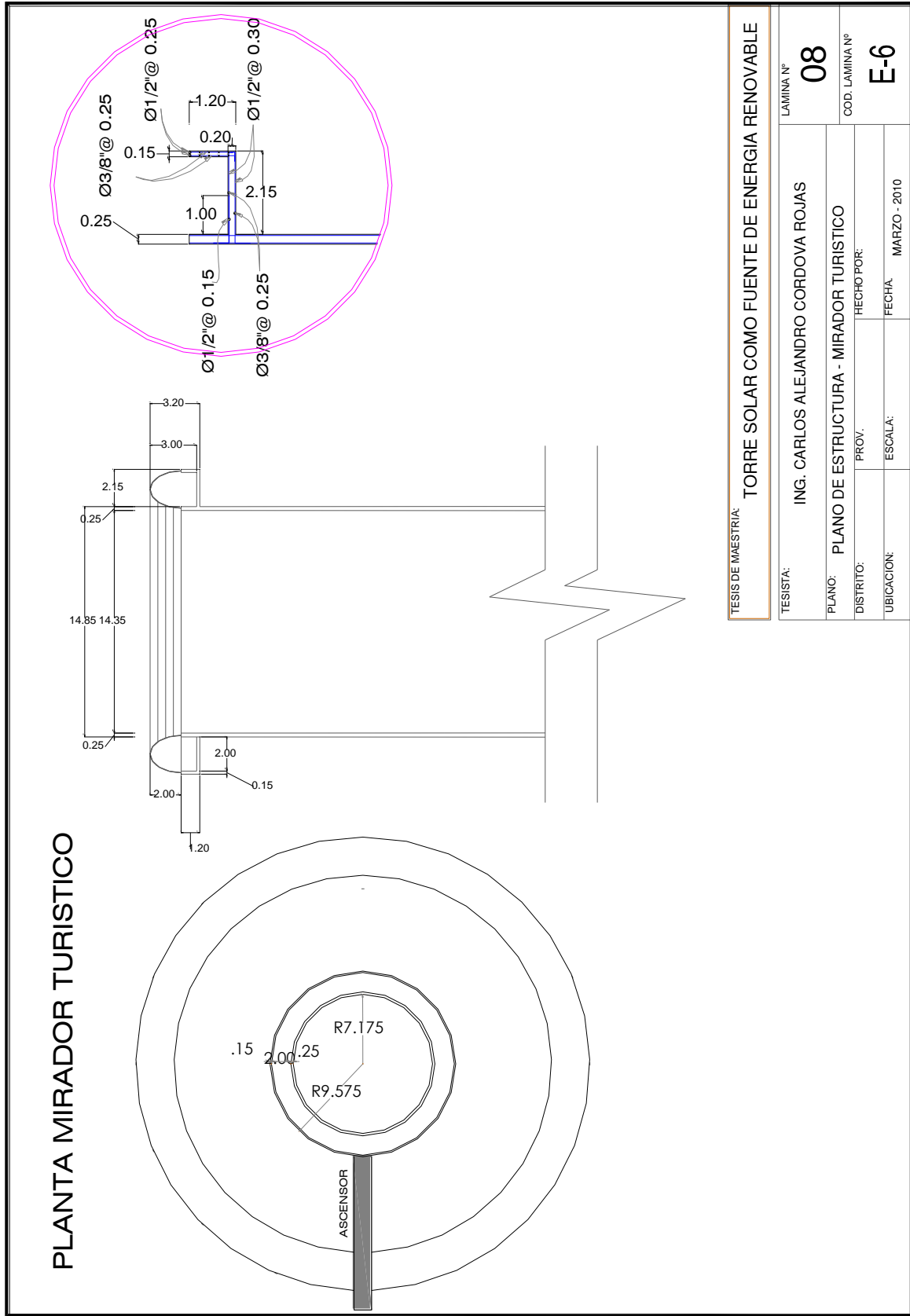
TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas



TESIS DE MAESTRIA:			TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE	
TESISTA:		ING. CARLOS ALEJANDRO CORDOVA ROJAS		LAMINA N°
				07
PLANO:			PLANO DE ESTRUCTURA - REFUERZO EN CHIMENEA	
DISTRITO:	PROV.	HECHO POR:		COD. LAMINA N°
				E-5
UBICACION:	ESCALA:	FECHA:		
		MARZO - 2010		



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

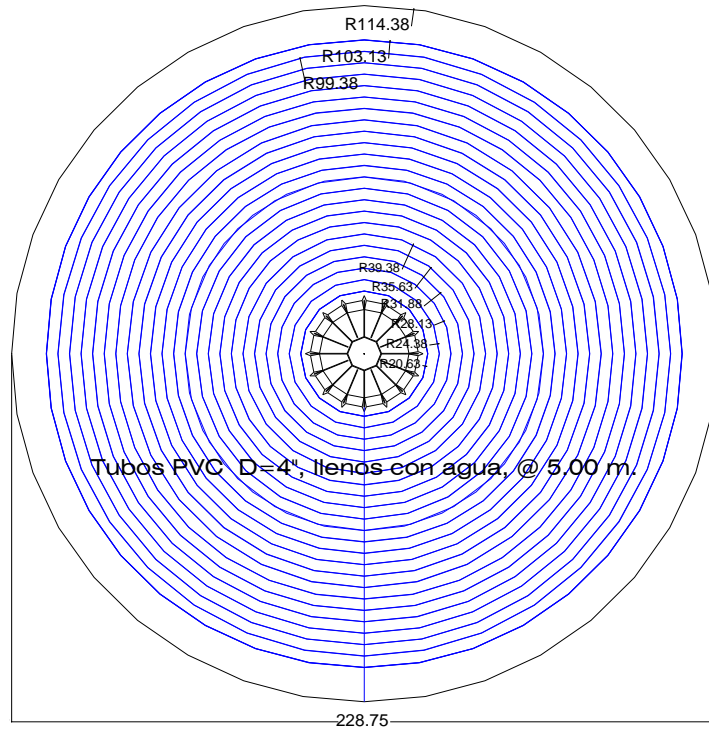


TESIS DE MAESTRIA: TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE	
TESISTA: ING. CARLOS ALEJANDRO CORDOVA ROJAS	LAMINA Nº 08
PLANO: PLANO DE ESTRUCTURA - MIRADOR TURISTICO	COD. LAMINA Nº
DISTRITO: _____	HECHO POR: _____
UBICACION: _____	FECHA: MARZO - 2010
	E-6

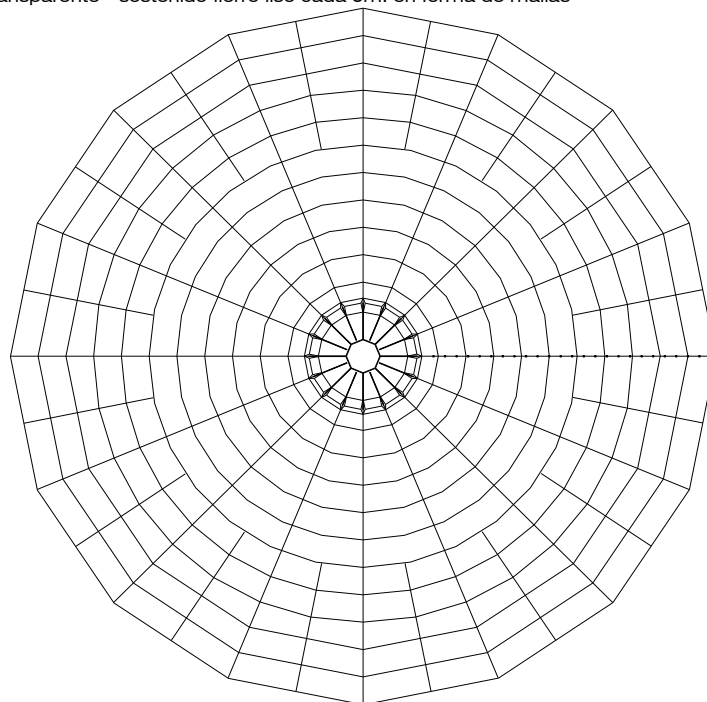


TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE
 Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

DETALLE DE TUBERIAS DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA



Estructura principal de tubos de D=4" SCH. 40 / ASTM A-53 - G° B
 Techo de plastico transparente - sostenido fierro liso cada 5m. en forma de mallas



DETALLE ESTRUCTURA DE TECHO DEL COLECTOR SOLAR

TESIS DE MAESTRIA: TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE		
TESISTA: ING. CARLOS ALEJANDRO CORDOVA ROJAS		LAMINA N° 09
PLANO: SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE NERGIA		
DISTRITO:	PROV.	HECHO POR:
UBICACION:	ESCALA:	FECHA: MARZO - 2010
		COD. LAMINA N° CS-1



7.2 Cuadro en Excel sobre el cálculo del acero de refuerzo en chimenea



CALCULO DEL MOMENTO RESISTENTE NOMINAL

r	= 730.00	cm	
t	= 40.00	cm	
f _y	= 4,200.00	kg/cm ²	
E _s	= 2,100,000.00	kg/cm ²	
f' _c	= 210.00	kg/cm ²	
e _m	= 0.0342	0.003	e _m ≤ 0.003
β ₁	= 0.85		
β	= 0.00	rad	
γ	= 0.00	rad	
n ₁	= 0.00	und	
P _u	= 9,243,000	kg	
M _u	= 5,620,000,000	kg-cm	
Φ	= 0.70		

ρ_t = 0.006068	
α = 69.941	1.22070073

τ	= 1.113482602	
Ψ	= 1.665960558	≥ -1
μ	= 0.674537523	≤ 1
λ	= 1.113482602	
λ ₁	= -0.801094572	
Q ₁	= 0.047020875	
K _e	= 500.00	

K₁ = 1.50734

ω_t = 0.1214

K₁' = 1.50738

Q₂ = 0.203078455

K = 1.894776982

R = 0.515331099

K₂ = 1.276564624

K₃ = 1.189887343

M_n = 8,028,633,956.05

Valores de α	Q
α ≤ 5°	1.16287288
5° < α ≤ 10°	0.64414496
10° < α ≤ 17°	0.09665005
17° < α ≤ 25°	0.86428481
25° < α ≤ 35°	0.81643823
α > 35°	0.89

ΦM_n = 5,620,043,769.24	M_u = 5,620,000,000.00
--	---



TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1.- Schlaich, J. (1995). The solar chimney: Electricity from the sun. Recuperado el 15 de Abril del 2008 de <http://www.boooks.google.com.pe/>
- 2.- Erenovable (2008), Blog de energía renovable: Torre Solar. Recuperado el 16 de Abril del 2008 de <http://erenovable.com/>
- 3.- Repsol (2008), Torres solares: Energía horizontal. Recuperado el 16 de Abril del 2008 de <http://www.repsol.com/>
- 4.- Wikipedia (2008), Gas de efecto invernadero. Recuperado el 18 de Octubre del 2008 de http://es.wikipedia.org/wiki/Gas_de_efecto_Invernadero
- 5.- Portal planeta sedna (2009), Efecto Invernadero. Recuperado el 18 de Octubre del 2008 de http://www.portalplanetasedna.com.ar/efecto_invernadero1.htm#efe
- 6.- Monografias.com (2003), Efecto Invernadero. Recuperado el 18 de Octubre del 2008 de <http://www.monografias.com/>
- 7.- Erenovable (2009), Blog de energía renovable: Protocolo de Kyoto. Recuperado el 05 de Marzo del 2009 de <http://erenovable.com/>
- 8.- Wikipedia (2009), Protocolo de Kyoto. Recuperado el 05 de marzo del 2009 de http://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_Kioto_sobre_el_cambio_climatico
- 9.- Wikipedia (2009), Bonos de Carbono. Recuperado el 05 de marzo del 2009 de http://es.wikipedia.org/wiki/Bonos_de_carbono
- 10.-Wikipedia (2009), Energía Renovable. Recuperado el 05 de Marzo del 2009 de http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_renovable
- 11.-Blog puerta estelar (2009), Evolución histórica de las energías renovables. Recuperado el 05 de Marzo del 2009 de <http://puertaestelar.mforos.com/1247107>
- 12.-Diario Hoy (2009), Informe de Greenpeace. Recuperado el 10 de Abril del 2009 de <http://www.hoy.com.ec/>
- 13.-Electro Oriente S.A. (2008), Datos técnicos sobre oferta y demanda de potencia: Entregado por la oficina de Estadística.
- 14.-Ortiz, R. (2001), Pequeñas centrales hidroeléctricas: McGraw - Hill
- 15.-Dubbel, (1965), Manual del constructor de maquinas - tomo 2.
- 16.-Wikipedia (2009), Energía Eólica. Recuperado el 15 de Abril del 2009 de http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%91ica
- 17.-Res & Rue Disseminations (2009), Instalaciones Micro eólicas. Recuperado el 15 de Abril del 2009 de <http://www.cecua.es/campanas/medio%20ambiente/res&rue/html/>



**TESIS DE MAESTRIA EN INGENIERIA ESTRUCTURAL
TORRE SOLAR COMO FUENTE DE ENERGIA RENOVABLE**

Ing. Carlos Alejandro Córdova Rojas

- 18.-Textos científicos.com, Censolar (2009), Turbinas eólicas. Recuperado el 22 de Abril del 2009 de <http://www.textoscientificos.com/energia/tutbinas>
- 19.-Wikipedia (2009), Convección. Recuperado el 22 de Abril del 2009 de <http://es.wikipedia.org/wiki/Convecci%C3%B3n>
- 10.-Moran, M.J. y Shapiro, H.N. (2005), Fundamentos de termodinámica técnica (2da. Edición): Editorial Reverte S.A.
- 21.-Incropera, F. (2000), Introducción a la transferencia de calor (4ta. Edición): Prentice Hall
- 22.-Benites, J. (1998), Estimación de la radiación solar en Iquitos: Universidad Nacional de la Amazonia Peruana - UNAP".
- 23.-Norma ACI 307-98, Design and Construction of Reinforced Concrete Chimneys.
- 24.-Biggs, J. (1964), Introduction to Structural Dynamics: McGraw - Hill Book Company
- 25.-Norma Técnica -E-030 (2003), Diseño Sismo Resistente: RNE
- 26.-Rivera, J. (1989), Apuntes de clase: Estructuras Especiales: Posgrado FIC UNI
- 27.-Arkady, A. (2009), Concrete Chimney Analysis and Design. Recuperado el 15 Mayo del 2009 de <http://www.israel-electric.co.il/docs/>
- 28.-American Society of Civil Engineers - ASCE 7 – 05, Wind Loads.
- 29.-Anarchius, (2009), Estimation of Wind Load Effects in chimneys. Recuperado el 15 de mayo del 2009 de <http://anarchies.org/data/pdf/08-Chapter2.pdf>
- 30.-Norma ISO 2631, Vibraciones aplicadas al cuerpo entero.
- 31.-Norma IRAM 4078, Guía para la exposición humana del cuerpo entero a vibraciones.
- 32.-Norma BRITISH 7385, Evaluación y medida de las vibraciones en edificios.
- 33.-Norma SN 640312, Criterios de aceptación de vibraciones.
- 34.-American Society of Civil Engineers - ASCE 7 - CAP.19, Soil Structure Interaction for Seismic Design.
- 35.-Valestos, A.S. and Meek, J.W. (1974), Dynamic behaviour of building foundation System.
- 36.-Scaletti, H. (1993), Publicación ACI (2da. Edición): Cimentaciones de Concreto Armado en Edificaciones: Interacción Dinámica de Suelos y Estructuras.
- 37.-Prakash, S. and Srharma, H. (1990), Pile Foundations in Engineering Practice: A Wiley – Interscience Publication.
- 38.- Fuentes, C. (2001), Ingeniería Portuaria (1ra. Edición): Coper Editores
- 39.- Reglamento Nacional de Edificaciones (2009) D.S. N°010-2009-Vivienda, Estructuras (5ta. Edición): ICG Fondo Editorial.
- 40.- Morales, R. (2000), Publicación ACI (1ra. Edición): Diseño en Concreto Armado.