

Trabajo Final

“Evaluación del recurso eólico en la región. Disposiciones, cálculo y verificación de la fundación de un aerogenerador”

Alumno: Sauré, Eugenio

Tutora: Dra. Viviana Rougier

Profesor Titular: Ing. Fabián A. Avid

Profesor Adjunto: Ing. Leonardo Voscoboinik

Año: 2020

Contenido

Memoria descriptiva	7
Memoria Técnica.....	7
1. Marco teórico. Introducción a la energía eólica.	8
1.1 Historia del Aerogenerador.....	8
1.2 Aerogeneradores. Generalidades	10
1.3 Tipos de aerogeneradores. Clasificación.....	11
1.3.1 Por el tipo de eje	11
1. De eje vertical.....	11
2. De eje horizontal	12
1.3.2 Por la orientación con respecto al viento	13
A Barlovento.....	13
A Sotavento	13
1.3.3 Por el número de palas	13
1. De una pala.....	13
2. De dos Palas	14
3. De tres palas	14
4. Multipala	14
1.4 Principio de funcionamiento de un aerogenerador	15
2 El Lugar de emplazamiento. Factibilidad.....	17
2.1 Lugar de emplazamiento posible 1	17
2.2. Lugar de emplazamiento posible 2	21
2.3. Lugar de emplazamiento posible 3.	22
2.4 Criterios implantación de Aerogeneradores	26
3- Medición y tratamiento de datos.....	27
3.1 Estación anemométrica.....	27
3.2 Torre	28
3.3 Anemómetros.....	29
3.4 Evaluación del recurso eólico	30
3.4.1. Velocidad media anual	30
3.4.2. Rosa de los vientos.....	30
3.4.3. Distribución de probabilidad del viento	31
3.4.4. Variación del viento con la altura.....	31
3.4.5. Turbulencia.....	32

3.4.6.	Rafagosidad	33
3.4.7.	Temperatura y Presión	33
3.5	Clasificación de un Aerogeneradores conforme a Norma IEC 61400-1	33
4.	Superestructura del Aerogenerador	37
4.1	Generalidades	37
4.1	Aspectos conceptuales sobre el comportamiento de la estructura	37
3.1	Dinámica de sistemas con masa distribuida:	37
3.2	Viga de Flexión con carga transversal	37
4.3	Viga de Flexión con carga transversal y axial:	39
4.4	Viga de Flexión con amortiguamiento viscoso:.....	40
4.5	Estudio de Frecuencias de Vibración:	41
4.6	Viga de flexión con carga concentrada en el extremo libre.....	45
4.7	Efectos de la deformación de corte y la inercia rotacional.....	46
4.8	Vigas de flexión con masa e inercia variables:	48
5-	Componentes de un Aerogenerador	51
5-1	Componentes Mecánicos.....	51
Pala	51	
Buje.....	52	
Nacelle o góndola.....	52	
5-2	Componentes Estructurales.....	55
5-2.1	Torre tubular modular	55
5.3	Montaje: grúas de alta capacidad	56
5.4	Sistema alternativo: Torre telescópica auto-elevable de hormigón prefabricado	57
6	Solicitaciones de Diseño	59
6.1	Aspectos conceptuales.....	59
6.1.1	Acción del Viento.....	59
6.1.2	Acción del viento sobre un cilindro	59
6.1.3	Acción estática del Viento. Presión ejercida por el viento:.....	60
6.1.4	Variación de la velocidad del viento $V(z)$:	61
6.1.5	Variación de la presión del viento con la altura:.....	61
6.1.6	Aumento brusco de la velocidad del viento: <i>Efecto de Ráfagas de viento</i> - Según el CIRSOC 102	62
Efecto de Ráfaga. Según la Norma Americana ACI:	63	
6.2	Especificaciones del Reglamento Argentino	64

6.2.2 Consideraciones de diseño para el método analítico	65
Capítulo 6 (CIRSOC-102). Procedimiento del túnel de Viento	66
7. Estudio de la fundación del aerogenerador: <i>Diseño, Cálculo y Verificación de la Fundación</i>	67
7.1 Disposición en planta: geometría y armado	67
7.2 Disposición de la sección transversal - Unión metálica	69
7.3 Cálculos y verificaciones de la base.....	71
7.3 Cálculos y Verificaciones de la Base en Estado de Servicio.....	71
7.3.1 Verificación de la Tensión admisible del suelo.....	71
7.3.2 Verificación de los asentamientos admisibles	73
7.3.3 Verificación al vuelco.....	78
7.3.4. Verificación al deslizamiento.....	78
7.3.5. Verificación a Fisuración.....	79
7.3.6 Verificación a Fatiga de los materiales: Acero y Hormigón.....	80
7.4 Cálculos y Verificaciones de la Base en Estado Último	82
7.4.1 Cálculo por Punzonado.....	82
7.4.2 Verificación al Corte	83
7.4.3 Verificación a Flexión	84
8. Análisis de la geometría y su incidencia en las variables de diseño.....	87
Resultados	88
Observaciones	91
Conclusiones	92
9. Cálculos y Verificaciones de una base de un aerogenerador de 2 MW	93
Pasos a seguir en el dimensionado y cálculo de la base de un aerogenerador:	93
10. Consideraciones sobre el Hormigón y sus componentes	109
10.1 Cemento	109
Cementos de bajo calor de hidratación:	109
Cemento portland puzolánico.....	109
Cemento Portland con escorias	110
Cemento de Alto Horno	110
10.2 Agregados.....	110
<i>Propiedades térmicas</i>	111
10.3 Agua.....	111
10.4 Aditivos.....	111
11. Evaluación económica de la obra.....	113

12. Estudio del Impacto Ambiental y medidas de mitigación	125
13. Producción anual de energía. Beneficios	132
Anexo 1 - Ficha Técnica de Aerogenerador Vestas V90- 2.0 MW – IEC II A/ IEC S.....	136
Anexo 2 –Deformada de la estructura	138
Anexo 3 – Información sobre el cálculo estructural mediante el programa Cypecad	140

Memoria descriptiva

Se construirá un aerogenerador en la Provincia de Entre Ríos en la Ciudad de Concordia. El lugar de emplazamiento cuenta con una gran superficie libre de obstáculos, generada por el embalse de la Represa Salto Grande. También se evaluó la posibilidad de implantar la base en la ciudad de Oro Negro, cercana al Delta del Río Paraná, el cual genera un gran potencial para el desarrollo de la energía eólica.

En la ciudad de Concordia, se han evaluado diferentes lugares posibles de emplazamiento. Debido a restricciones del espacio aéreo se definió un lugar por fuera del radio restrictivo. La ubicación será en la intersección entre la Ruta Nacional 14 y la Ruta Provincial 28.

El proyecto tiene como objetivo principal introducir el concepto de energías renovables en la región, por lo cual se evaluará las disposiciones para los estudios previos así como para la construcción del mismo.

Se hará una descripción de las partes que constituyen un molino de viento: componentes mecánicos y estructurales; así como su comportamiento estructural.

Memoria Técnica

El proyecto empezará a desarrollarse el lunes 3 de febrero del año 2020, y tendrá una duración total aproximada de 3 meses.

El ante proyecto consiste en evaluar el recurso que se estudia, el viento. Para lo cual es necesario instalar estaciones de medición del viento, y tomar valores durante 3 a 5 años. Con ello se puede establecer la probabilidad de ocurrencia de las velocidades medias, su frecuencia, dirección predominante así como otros factores que afectan la elección del aerogenerador que son la turbulencia, a la cual estará expuesto.

También es parte del trabajo la evaluación geotécnica del suelo donde se construirá el aerogenerador. Para lo cual se extraerán muestras testigos del suelo del lugar. Se lo evaluará conforme a los requerimientos de la Norma DNVGL 0126 para estudios del suelo.

En la etapa de la construcción de la torre, se empieza con los trabajos de excavación, armado y hormigonado de la base, instalación de la torre, etc.

Considerando las velocidades medias registradas por el INTA, y la ley de distribución de la velocidad en altura, se evaluará el cálculo de un aerogenerador de 2 MW de potencia de la marca Vestos modelo V90/ 2MW según la Norma europea: IEC IIA. El mismo tiene 80 metros de altura de la torre, y 90 metros del Rotor.

En el presente trabajo se hará una revisión de las consideraciones del hormigón: cementos a usar; consideraciones de los agregados; los aditivos que ayudan a una mayor trabajabilidad y llenado; así como las consideraciones del agua a usar.

1. Marco teórico. Introducción a la energía eólica.

1.1 Historia del Aerogenerador

A través de la historia, se ha considerado que el viento es útil: los egipcios fueron los primeros en utilizar este tipo de energía, ellos construyeron un molino para darle aire a una clase de órgano musical. Por otra parte se considera que la primera máquina eólica fue construida por Herón de Alejandría, en el siglo II a. C.

A partir de los siglos XII y XIII empieza a propagarse el uso de molinos de viento, para la elevación de agua y la trituration del grano. Las más antiguas máquinas aparecieron en Turquía, Irán y Afganistán, a principios del siglo XX. En Europa se propagaron los molinos de viento, primordialmente en Bélgica y los Países Bajos. Las características de los molinos cambian de país en país, por ejemplo en Holanda tenían molinos de 4 aspas, mientras que Portugal construía de 6 aspas y Grecia de 12. Los molinos de mayor cantidad de aspas dan mayor rendimiento a velocidades menores del viento.

Cuando llega la Revolución Industrial se interrumpe el desarrollo de los molinos de viento, a causa del uso de energía suministrada por el vapor, la electricidad y los combustibles fósiles. A mitad del siglo XX aparece el popular modelo multipala americano, que fue utilizado para el bombeo de agua a través de todo el mundo y cuyos estudios fueron la base para el diseño de modernos generadores eólicos.

Las guerras mundiales propician el desarrollo de aerogeneradores eólicos, esto se debe a que hubo progresos técnicos en las hélices de los aviones, y en consecuencia, en los proyectos de aerogeneradores de dos y tres palas. Se construyó únicamente la máquina de dos palas ya que eran más económicas, inclusive se consideró construir con una sola aspa y un contrapeso. Actualmente predominan los molinos tripala. Estos aerogeneradores giran más rápidamente que los multipalas, lo que constituye una ventaja cuando se trata de alimentar máquinas de gran velocidad de rotación, como los alternadores eléctricos.

Los aerogeneradores de eje vertical tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección del viento. Por ello se los llama penémons, que trabaja con todos los vientos. No utilizan dispositivo de orientación. El ingeniero francés Darrieus fue el inventor de este tipo de aerogenerador, en el año 1925. Actualmente las máquinas pequeñas de 1 a 60 kW, pueden ser construidas a un precio muy inferior que los clásicos molinos de viento de eje horizontal. En EEUU los laboratorios Sandia, en Albuquerque (Nuevo México), estudian y comercializan los molinos de viento Darrieus.

El primer aerogenerador fue construido en Francia en 1929, se rompió a causa de una tormenta violenta. La compañía electromecánica construyó e instaló, en Bouget, un aerogenerador de dos palas, de 20 metros de diámetro.

En 1941, la NASA construyó un bipala de 53 m de diámetro, previsto para una potencia máxima de 1250 KW, que se instaló en Vermont, en el nordeste de EEUU. Las primeras pruebas, iniciadas en octubre de 1941, continuaron durante 15 meses. En 1943 un pequeño incidente bloqueó la máquina durante dos años, ya que las dificultades ligadas a la guerra retrasaron la fabricación de piezas nuevas. Vuelto a poner en marcha el

aerogenerador proporcionó corriente al sector durante veintitrés días, luego se rompió una de las palas y se abandonó el proyecto.

En 1975 se puso en servicio los aerogeneradores Mod. 0 (modelo) con palas de metal de un diámetro de 38 metros, que producían 100 kW. En 1977, se construyó el Mod. 0 A que tenía 200 kW. La GENERAL ELECTRIC termina el bipala Mod. 1 en 1978, que con un diámetro de 60 metros acciona un alternador de 2 Mw. Mientras la BOEING estudia el Mod. 2 ideal para los vientos medios de las grandes llanuras, que con 91 metros de diámetros produce 2,5 Mw, con palas de acero.

La ELECTRICITÉ de Francia realizó un estudio en las diferentes regiones del país y construyó varios aerogeneradores experimentales. El aerogenerador "Best, Romani" tripala de 30 m de diámetro fue instalado en Nogent-le-Roy en Beauce. Podía proporcionar 800 kW, con un viento de 60 km/h. Este prototipo aportó, entre 1958 y 1962, información sobre el funcionamiento en condiciones reales. La empresa Neyrpic instaló en Saint-Remy-des-Landes dos aerogeneradores de tres palas. Uno de 21 metros de diámetro que producía 130 kW; el otro de 35 m y previsto para producir 1.000 kW.

Durante los años 1955 y 1957 se construye en Alemania un aerogenerador de dos palas con un diámetro de 34 m, al este de Stuttgart. Esta máquina funcionó hasta 1968.

Dinamarca construye en 1957 el Gedser Mil, con tres hélices de 24 m de diámetro que funcionó hasta 1968. Este producía 200 kW con una velocidad del viento de hasta 15 km/h.

El petróleo fue el causante de que se suspendieran los grandes proyectos de aerogeneradores en el mundo, debido a que era más económico generar energía eléctrica por medio de este combustible. En la década de los 70's, se inicia una nueva etapa en el aprovechamiento de la energía cinética originada por el viento. Además, con las nuevas tecnologías, y el desarrollo del campo de aviación, se da por hecho la aparición de una nueva generación de máquinas eólicas con mayor eficiencia que las anteriores y al mismo tiempo se permite su explotación bajo criterios de rentabilidad económica, en zonas de potencial eólico elevado.

En la misma década, los estadounidenses se enfrentaron a un déficit de suministro de energía eléctrica; ellos empezaron un programa para explotar la energía eólica. En aquel momento se estimaba que esta energía renovable podría, aparte de sus aplicaciones tradicionales, proporcionar potencia a las redes eléctricas a un precio igual o inferior que el de las centrales térmicas. Esto se haría realidad con la puesta en servicio de grandes aerogeneradores que proporcionan potencias eléctricas entre 2 y 5 mW. EEUU cuenta con numerosos proyectos para la utilización de la energía del viento, incluso, en combinación con otras centrales, como las hidroeléctricas.

Los primeros aerogeneradores de grandes magnitudes se construyeron en EEUU, allí en 1941, había un aerogenerador y su hélice pesaba 7 toneladas y tenía un diámetro de 53 metros. Desde 1973, y bajo la responsabilidad de la NASA, los Estados Unidos han reanudado la construcción de máquinas eólicas gigantescas.

1.2 Aerogeneradores. Generalidades

Los aerogeneradores son generadores eléctricos movidos por el viento. Los actuales aerogeneradores son prototipos derivados de aquellos molinos de viento utilizados para la trituration y obtención de la harina.

La energía eólica, es decir la energía cinética del viento en movimiento, suministra energía mecánica a un rotor de hélice que por medio de una transmisión mecánica hace girar el rotor de un aerogenerador que normalmente es un alternador trifásico, que convierte la energía rotacional en energía eléctrica.

En la actualidad existen diferentes tipos de aerogeneradores, estos pueden clasificarse dependiendo de su potencia, de la posición de su eje, del tipo de generador, etc.

Los aerogeneradores pueden trabajar de manera individual o agrupados en parques eólicos o plantas de generación de energía eólica, que deben estar a una distancia prudente, para evitar un impacto ambiental por las turbulencias generadas por el movimiento de las palas.

En Europa los aerogeneradores se encuentran en las afueras de ciudades: en Alemania, España, Suecia; formando así grandes núcleos preferentemente en zonas montañosas, en donde se aprovechan las diferencias de alturas. Normalmente se encuentran alejados de las áreas más pobladas.

En la actualidad la energía eólica es muy popular y demuestra la viabilidad en su implementación en la industria y en la búsqueda de nuevas fuentes de energías no contaminantes.

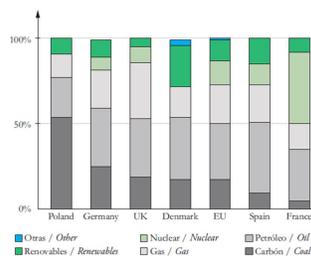


Fig. 1. Porcentaje de diferentes fuentes de energía en Europa en 2013 (Eurostat)

Fig n°1: imagen de uso de diferentes tipos de energía.

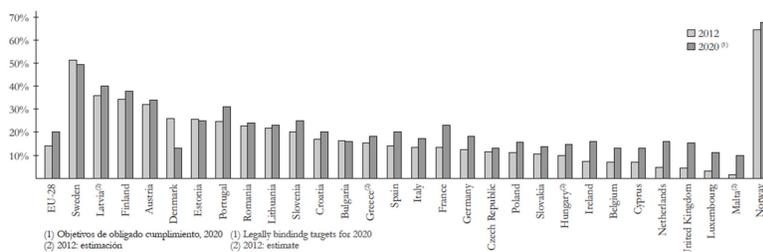


Fig n°2: energía eólica en el 2012 y en el 2020

1.3 Tipos de aerogeneradores. Clasificación

Los aerogeneradores se pueden clasificar de acuerdo a su tipo de eje, a la orientación con respecto al viento, al número de palas, por el control de la potencia y por la regulación activa por pérdida de potencia aerodinámica.

1.3.1 Por el tipo de eje

Pueden ser de eje vertical o de eje horizontal:

1. De eje vertical

Son conocidos como VAWT que proviene de las siglas en inglés (*vertical axis wind turbine*) se caracterizan porque su eje está en posición perpendicular al suelo y a la dirección del viento.

La mayor ventaja que pueden brindar estos aerogeneradores es la de eliminar los complejos mecanismos de direccionamiento y las fuerzas a la que son sometidas las palas por los cambios de orientación del rotor, además, no es necesario desconectarse a altas velocidades del viento.

Su desventaja es que tiene baja capacidad de generar energía.

Los aerogeneradores de eje vertical pueden clasificarse en:

- Darrieus: consiste en dos o tres arcos que giran alrededor del eje.
- Sabonius: Dos o más filas de semicírculos, colocados opuestamente alrededor del eje.
- Panemonas: cuatro o más semicírculos unidos al eje central.



Fig n° 3 : Aerogenerador de eje vertical Darrieus



Fig n° 4: Imágenes de aerogeneradores de eje vertical de pala recta

2. De eje horizontal

Se conocen como HAWT, que proviene de las siglas en inglés (horizontal axis wind turbine) son los aerogeneradores más comunes y en ellos se han centrado el diseño y la investigación en los últimos años. Estos aerogeneradores se caracterizan porque su eje rotacional se encuentra paralelo al suelo y a la dirección del viento. Su mayor ventaja es cuando se encuentran a una altura de entre 40 y 60 metros del suelo, estos pueden aprovechar mejor la velocidad del viento, además los mecanismos que se utilizan para convertir la energía del viento en otro tipo de energía se encuentran ubicados entre la torre y la góndola; también se caracterizan por tener una eficiencia muy alta.

Su desventaja es su transporte, a causa de su gran dimensión (torres de 80 m de altura y palas de 40 m de longitud). Además las palas deben resistir altas velocidades de más de 100 km/h donde deben ser detenidas para evitar daños en la estructura.



Fig n° 5: Imágenes de aerogeneradores de eje horizontal (izq). Aerogenerador de eje horizontal offshore (der)



Fig n° 6: Parque eólico instalado en el mar de Noruega. Instalado en forma de arco para evitar la perturbación del viento

1.3.2 Por la orientación con respecto al viento

A Barlovento

La mayoría de los aerogeneradores utilizan este tipo de diseño, que consiste en colocar el rotor de cara al viento.

Como desventaja es necesario instalar un mecanismo de orientación del rotor y además este debe ser instalado a una cierta distancia de la torre

A Sotavento

En este diseño la orientación del rotor le da la espalda a la dirección del viento. Su mayor ventaja es que permite una mayor flexibilidad del rotor y este no necesita ningún mecanismo de orientación.

Su mayor desventaja es la variación de la potencia eólica, debido al paso del rotor detrás de la torre, creando cargas de fatiga considerables en la turbina.

1.3.3 Por el número de palas

1. De una pala

Por ser de una sola pala necesita de un contrapeso en su extremo opuesto. Por ello la velocidad de giro es muy elevada, lo que induce en el eje esfuerzos variables. Esto acorta la vida del aerogenerador.

2. De dos Palas

Son aerogeneradores de bajo costo; muy livianos. Su inconveniente es que necesitan una velocidad de giro más alta, para producir la misma cantidad de energía que un aerogenerador convencional de tres palas o más.

3. De tres palas

Son los aerogeneradores más utilizados en la actualidad y funcionan con el rotor a barlovento. Este tipo de aerogenerador utiliza motores eléctricos para su mecanismo de orientación. Los aerogeneradores de tres palas son un 4 % más eficiente que los de dos palas y un 10 % más eficientes que los de una pala.

4. Multipala

Se los conoce como el modelo americano, porque contiene multitud de palas, y es utilizado para la extracción de agua en pozos. Funcionan a menores velocidades de viento.



Fig n° 7: Imagen de un aerogenerador bipala (izq.) y mono pala (der.)



Fig n° 8: Aerogenerador bipala "Naukas" elaborado por la NASA

1.4 Principio de funcionamiento de un aerogenerador

Los aerogeneradores son mecanismos que transforman la energía cinética del viento en energía mecánica. La obtención de esta energía se hace por medio de la interacción del viento sobre las aspas. El principio aerodinámico, por el cual el conjunto de palas gira, es que el aire es forzado a fluir por las caras superior e inferior de un perfil inclinado que genera en el aspa una diferencia de presiones entre las caras, y arroja una fuerza resultante que actúa sobre el perfil.

Si se descompone esta fuerza en dos direcciones, obtenemos:

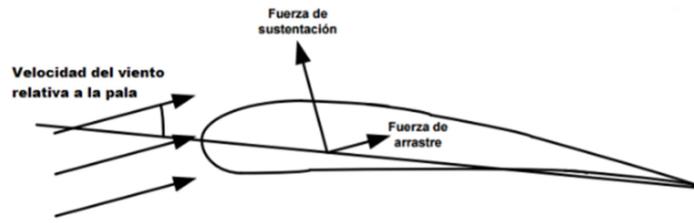


Fig n° 9: Esquema de fuerzas incidentes en la pala del aerogenerador

La fuerza de sustentación, perpendicular a la dirección del viento.

La fuerza de arrastre del viento, paralela a la dirección del viento.

La variación de dichas fuerzas puede regularse con la inclinación del ángulo de ataque, según como estén montadas las alas en cuanto a la dirección del viento y al eje de rotación.

Para poner en marcha un aerogenerador se necesita un valor mínimo de esta fuerza, para vencer la resistencia inicial y comenzar a producir trabajo útil. Este valor mínimo de rozamiento se denomina velocidad de conexión que está comprendida entre **3 y 5 m/s**.

Cuando se alcance la velocidad de conexión el sistema comenzará a rotar y convertirá la energía cinética en mecánica, hasta que alcance la máxima potencia que el aerogenerador pueda entregar. En este punto los mecanismos de regulación comienzan a actuar para evitar que el sistema trabaje en condiciones para las que no fue calculado, y evitar así un daño en la estructura. La velocidad para la cual se activa dicho mecanismo se encuentra en los 25 m/s.

2 El Lugar de emplazamiento. Factibilidad

Existen diversos factores que deben ser considerados cuando se elige el lugar donde se instalará el aerogenerador. Algunos son:

- La superficie necesaria
- Las estructuras y edificaciones de los alrededores
- La velocidad del viento
- Distancia a la red de distribución de energía más cercana
- Las restricciones del espacio aéreo

La Superficie libre de obstáculos. En general está regulado por ley que para cada aerogenerador es necesario una cantidad de metros cuadrados que forman la superficie de terreno libre de obstáculos, como construcciones, edificios en altura, etc.; permitiendo la libre circulación de las líneas de corriente del viento.

La velocidad del viento. Otra variable a considerar es la velocidad y frecuencia del viento. Esta es probablemente la más importante a la hora de evaluar la factibilidad de instalar un aerogenerador en un determinado lugar. Para aquellos lugares donde la velocidad media del viento sea inferior a los 4 m/ s es poco probable la implementación de estos sistemas.

El costo del transporte. La distancia entre el sitio de instalación de la torre, y la línea de distribución más cercana es otro factor de gran importancia a la hora de evaluar la factibilidad de la obra. Si la distancia es muy grande será poco probable la instalación del aerogenerador, ya que la energía debería viajar largas distancias en su traslado, lo que conllevaría la no-viabilidad económica del proyecto. Solo sería posible en el caso de ser extremadamente necesaria la energía en alguna localidad cercana al sitio de instalación. Lo que obligaría el traslado de la energía directamente a dicha localidad.

Limitaciones del espacio aéreo. Las limitaciones de la zona aérea también deben ser tenidas en cuenta. Especialmente aquellos lugares donde en la cercanía podría existir un aeropuerto. En este caso es probable que exista limitación reglamentadas por ley.

2.1 Lugar de emplazamiento posible 1

Ubicación Concordia, Entre Ríos, Argentina. Al margen de la Ruta Internacional N° 015, camino de acceso a la Represa Binacional Salto Grande entre la Argentina (ARG) y La República Oriental del Uruguay (ROU).

Descripción: El lugar se encuentra cercano al embalse de la Represa, con extensas superficies libres de obstáculos. Se clasifica como categoría C del CIRSOC 102:

Exposición C: Terreno abierto con obstrucciones aisladas que tienen alturas generalmente menores a los 10 m.



*Fig n° 10: Imagen satelital: Ubicación lugar posible de emplazamiento 1 - rectángulo verde.
Concordia, Entre Ríos, Argentina.*

La cercanía del aeropuerto de la ciudad de Concordia es una restricción a tener en cuenta para evaluar la factibilidad.

Restricción por uso del espacio aéreo

Según: La Administración Federal de Aviación, FAA, por sus siglas en inglés:

Especificaciones de altura

En general, la FAA especifica que un objeto no puede exceder de 200 pies (61 m) sobre el nivel del suelo, o AGL, a 3 millas náuticas del punto de referencia establecido en el aeropuerto. Por cada milla náutica adicional desde el aeropuerto, el requisito de la altura se incrementa en 100 pies (30,5 m), hasta un máximo de 499 pies (152 m). La seguridad en los aeropuertos dotados de torres también está garantizada por los funcionarios del aeropuerto que controlan el flujo de tráfico. Otros reglamentos especifican que cuando los pilotos están siguiendo las reglas de vuelo por instrumentos, ciertas áreas debajo y alrededor de los caminos de aproximación por instrumentos también deben ser despejadas por encima de las alturas especificadas.

1 milla náutica equivale a 1.852 m (SI)

Para limitación edificio de 61 m de altura ⇒ Radio 3 millas náuticas.

Para pre dimensionar el molino de viento, es preciso conocer cuáles son las velocidades de viento con que se cuenta.

Para un predimensionado de la altura del aerogenerador en función de la velocidad del viento, se consultó al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA, estación experimental Concordia, el cual cuenta con un registro de velocidades promedio mensual del viento de 20 años:

VELOCIDAD PROMEDIO MENSUAL DEL VIENTO ESTACION EXPERIMENTAL INTA CONCORDIA														
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Annual
1994	Vel.Promedio	3,4	4,7	4,7	4,6	3	3,7	3,6	4,5	4,5	4,3	5,1	3,1	4,1
1995	Vel.Promedio	3	3,3	2,9	4	2,4	3,2	4,5	5	6,8	6,3	4,3	6,7	4,4
1996	Vel.Promedio	6	3,6	2,5	2,8	2,8	3,2	4	4	6,5	5,3	5,2	4,9	4,2
1997	Vel.Promedio	4,8	5,6	4	3	3,6	5,1	4,5	4,1	5,4	6,6	6,1	5,3	4,8
1998	Vel.Promedio	4,6	5	4,1	4,6	3,3	3,3	3,2	4,1	4,5	5	4,5	4,7	4,2
1999	Vel.Promedio	5,3	4,2	4,5	4,8	3,1	3,3	3,9	4,7	5,6	6,3	5,4	6,2	4,8
2000	Vel.Promedio	5,1	4,9	4,4	4,1	4,4	3,6	4,3	3,6	4,8	6,2	5,6	4,7	4,6
2001	Vel.Promedio	4,3	4,8	4,2	4,9	3,9	4,2	4,7	4,2	6,3	5,6	5,6	5,2	4,8
2002	Vel.Promedio	4,2	3,1	3,1	2,3	2,3	2,2	2,7	3,5	3,8	4,2	4,2	4,2	3,3
2003	Vel.Promedio	2,9	3,1	3,4	3,6	3,0	2,9	3,3	3	4,3	5	5,1	5,1	3,7
2004	Vel.Promedio	5,2	5,3	5,2	4,1	4,5	3,8	4,8	4,4	6,2	5,7	5,6	5,7	5,0
2005	Vel.Promedio	5,3	4,9	3,9	2,8	2,2	2	2,7	4,4	3,8	4,6	3,4	4,2	3,7
2006	Vel.Promedio	4,1	3,1	3,4	3,7	3,4	3,7	3,9	3,9	4,5	4,8	5,1	4,1	4,0
2007	Vel.Promedio	4,5	4	4,2	3,5	3,5	3,3	3,6	5,3	4,9	3,8	2,8	3	3,9
2008	Vel.Promedio	2,8	2,5	3,8	4,1	3,8	4,4	4,7	4,6	5,7	5,5	5,1	5,8	4,4
2009	Vel.Promedio	6	4,7	4,2	3,9	3,9	4	4,2	4,7	6	5,8	5,3	5,8	4,9
2010	Vel.Promedio	4,1	4,5	4	4,4	4,4	4,2	4,3	4,7	5,5	4,6	4,3	4,4	4,5
2011	Vel.Promedio	2,6	3,4	4,7	4	3,9	4,3	4,6	9	5,1	5,9	7,7	5,4	5,1
2012	Vel.Promedio	3,1	2,4	3,9	5,1	3,5	4,3	3,4	8,1	7	5,2	3,1	3,6	4,4
2013	Vel.Promedio	3,2	3,1	2,3	2,8	2,6	2	2,2	2,6	6,1	4,5	3,2	2,1	3,1
2014	Vel.Promedio	2,4	2,7	1,9	1,9	1,4	1,7	1,5	1,8	3,2	3,1	-	-	-
	NORMAL	4,2	4,0	3,9	3,9	3,4	3,5	3,9	4,6	5,4	5,3	4,8	4,7	4,3

Fig n° 11: Registro de velocidades de viento anuales de la Estación Experimental INTA Concordia

		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	X/TOTAL
1994	Vto dir Prevalente	SE	SE	E	E	NE	SSE	SSE	ESE	SE	SE	SE	ESE	SE
1995	Vto dir Prevalente	SE	SE	E	E	NW	SSE	SSE	ESE	SE	SE	SE	ESE	SE
1996	Vto dir Prevalente	SE	E	SE	ESE	SE	SSE	SE	ENE	SE	SE	SE	SE	SE
1997	Vto dir Prevalente	E	SE	ESE	E	E	SE	SE	SE	SE	SE	SE	ESE	SE
1998	Vto dir Prevalente	SE	SE	SE	SE	SE	E	E	SE	SE	SE	ESE	SE	SE
1999	Vto dir Prevalente	SE	SE	ESE	ESE	ESTE	ESE	SE	ENE	SSE	SE	SSE	SE	SE
2000	Vto dir Prevalente	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ENE	WSW	E	SSE	ESE	ESE	ESE	ESE
2001	Vto dir Prevalente	ESE	ESE	ESE	ESTE	E	E	ESE	ESE	SSE	WSW	SSE	SE	ESE
2002	Vto dir Prevalente	SE	SSE	ESE	SSE	NNE	SSE	SSE	NNE	ESE	ESE	E	SSE	SSE
2003	Vto dir Prevalente	SE	SE	ESE	SE	ESE	SSE	SSE	ESE	ESE	SSE	E	ESE	-
2004	Vto dir Prevalente	SE	S	ESE	SE	SSE	S	ENE	ESE	SE	ESE	ESE	E	-
2005	Vto dir Prevalente	ESE	ESE	ESE	ESE	SSE	ESE	ESE	ESE	E	SE	ESE	ESE	ESE
2006	Vto dir Prevalente	ESE	ESE	SSE	ESE	ESE	SSE	ESE	ESE	ESE	E	SE	E	ESE
2007	Vto dir Prevalente	ESE	ESE	ESE	E	ESE	ESE	ESE	SE	ESE	SE	ESE	SSE	ESE
2008	Vto dir Prevalente	ESE	ESE	ESE	NNW	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	SE	E	ESE	ESE
2009	Vto dir Prevalente	ESE	SE	SE	ESE	ESE	ESE	ESE	NNE	SE	ESE	ESE	SSE	-
2010	Vto dir Prevalente	ESE	SE	ESE	SE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	-
2011	Vto dir Prevalente	SE	ESE	ESE	SE	ESE	ESE	SE	SE	ESE	ESE	ESE	ESE	-
2012	Vto dir Prevalente	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	SE	SE	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	-
2013	Vto dir Prevalente	ESE	ESE	ESE	ESE	ESE	SE	ESE	ESE	SE	ESE	SE	SE	-
2014	Vto dir Prevalente	ESE	SE	SE	SE	SE	SSE	ESE	NE	SE	ESE	-	-	-

Fig n° 12: Registro de las direcciones de viento anuales de la Estación Experimental INTA Concordia

Observaciones:

- La velocidad Anual Normal es de **4,3 m/s de intensidad**, para una muestra tomada a 2m de altura. Considerando la distribución exponencial del viento, a la altura de las aspas (aprox. 80 m), la velocidad es por lo menos el doble.
- Durante los meses de marzo, abril, mayo y junio el promedio de la velocidad es menor que la media anual. Consecuentemente disminuirá la producción de energía.
- La dirección del viento que predomina es la **ESE**.

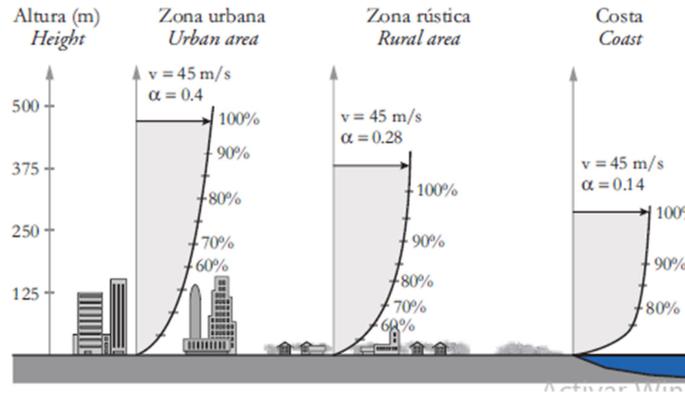


Fig n° 13: Variación del viento con la altura para diferentes exposiciones.

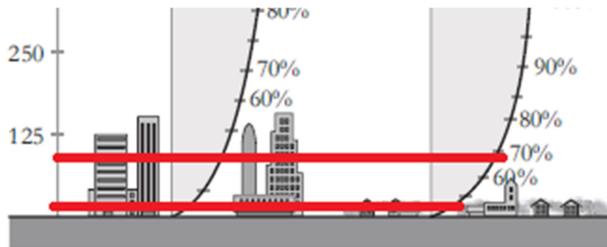


Fig n° 14: Comparación de la velocidad del viento a 2m y a 100m de altura respectivamente.

Puede apreciarse que la velocidad del viento aumenta con la altura. Los registros de viento son tomados a 2 m de altura, lo que nos permite pensar que la velocidad del viento a 90 m de altura, altura del buje, puede llegar por lo menos a duplicarse. Entonces las velocidades medias pueden llegar a ser de 9 m/s. Luego se estima un aerogenerador para dicha velocidad media utilizando una curva que relaciona la Velocidad con la Potencia generada:

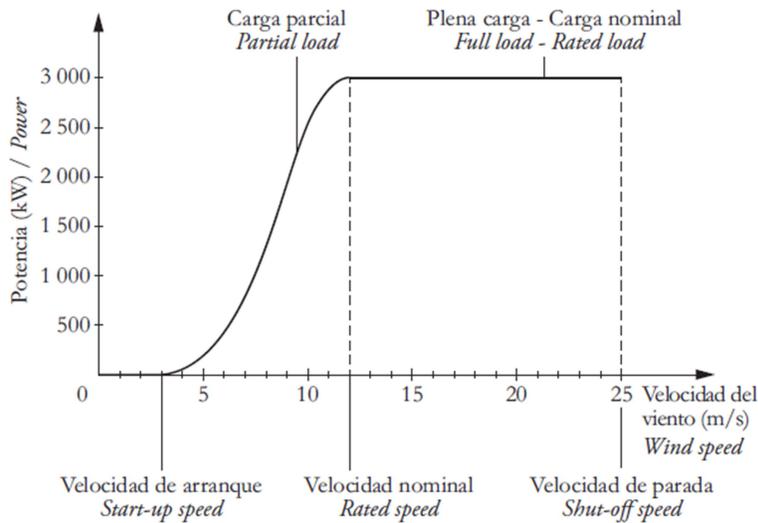


Fig n° 15: Imagen de curvas de velocidad de viento vs potencia obtenida, para diferentes modelos de aerogeneradores.

Por la velocidad del viento se adopta un modelo de la marca **Vestos V110**, de 80 m de altura del buje y 90 m diámetro del rotor, medida desde el baricentro del buje, entonces:

$$H_t = h_1 + h_2$$

Siendo:

ht: altura total desde el nivel del terreno al extremo del aspa.

h1: altura de la torre, del nivel del terreno al baricentro del buje. $h_1 = 80 \text{ m}$.

h2: longitud de un aspa, del baricentro del buje al extremo libre: $h_2 = 45 \text{ m}$

$$H_t = 80 \text{ m} + 45 \text{ m} = 125 \text{ m}$$

⇒ si para un edificio de 61 m de altura se restringen 3 millas $\equiv 5.556 \text{ m}$

⇒ para una altura de 125 m se deben restringir un radio de: **R= 11.385,14 m**

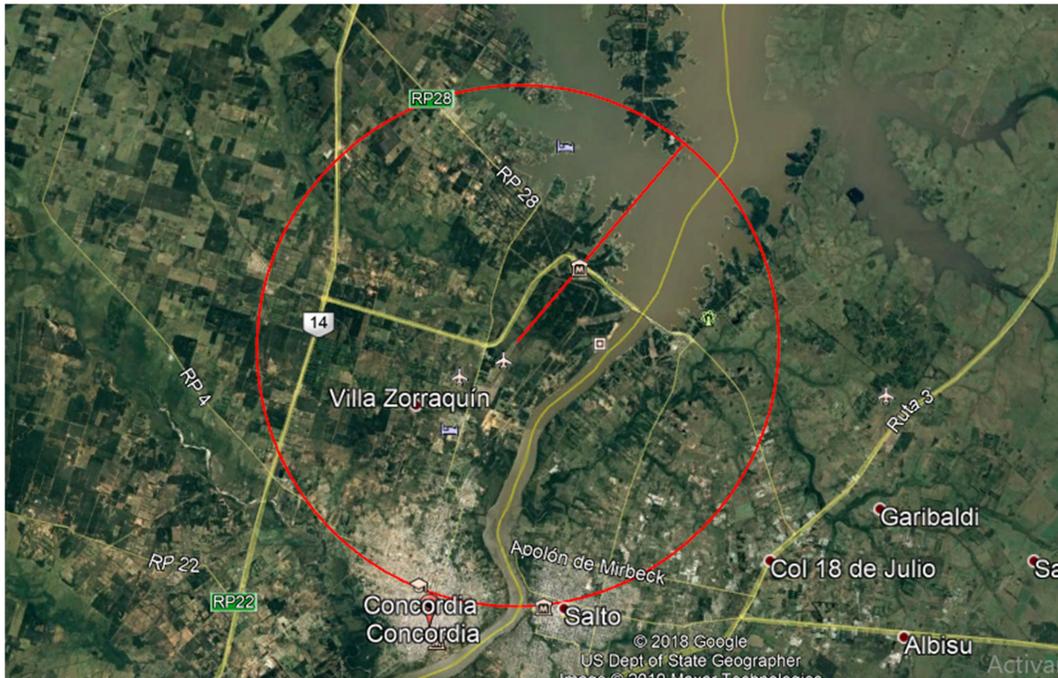


Fig n° 16: Imagen satelital – se aprecia el radio de restricción por uso del espacio aéreo.

La restricción del espacio aéreo rechaza la hipótesis del lugar de emplazamiento 1.

2.2. Lugar de emplazamiento posible 2

Ubicación: Departamento de Concordia, Entre Ríos, Argentina. Fuera del radio restrictivo del aeropuerto. Se encuentra en las márgenes de la intersección de las rutas Nacional N° 014 y la Ruta Provincial N° 028.

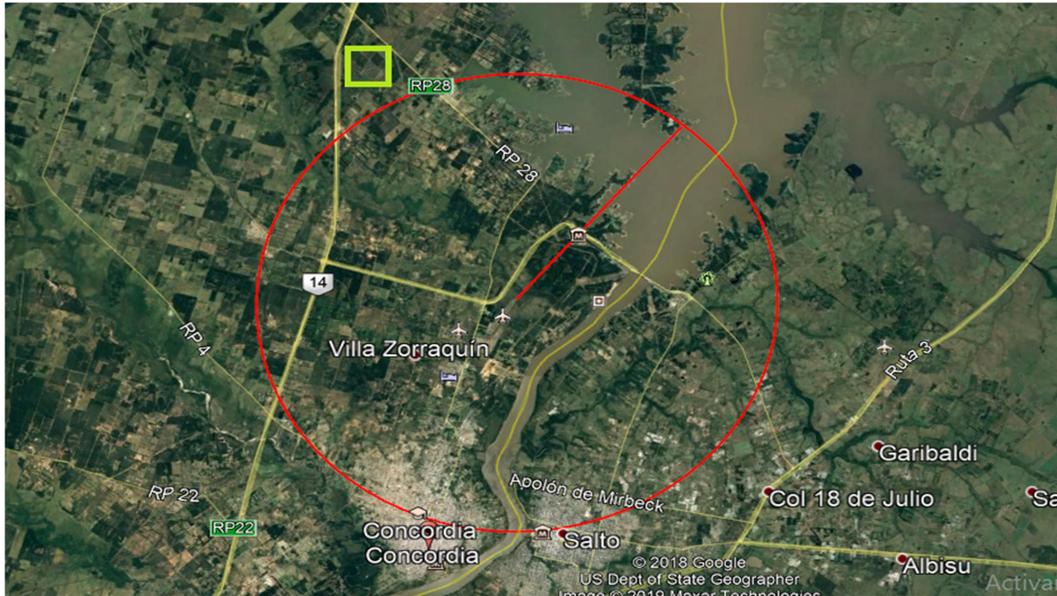


Fig n° 17: Imagen: En la imagen se aprecia por medio de un rectángulo verde el lugar posible de emplazamiento 2

Descripción: El lugar es cercano al embalse de la represa Salto Grande y cuenta con extensas superficies libres de obstáculos. Se clasifica como categoría C, según el CIRSOC 102.

Exposición C: Terreno abierto con obstrucciones aisladas que tienen alturas generalmente menores a los 10 m.

2.3. Lugar de emplazamiento posible 3.

Ubicación: Estación Experimental Agropecuaria Paraná del INTA (*Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*). Ubicada en la ruta de la provincia de Entre Ríos N° 11, en las cercanías de la ciudad de Oro Verde.

Descripción: Se encuentra en el predio del INTA Paraná, sobre la Ruta Provincial N° 028. El lugar es un descampado, cercano al Delta del río Paraná. Se clasifica como categoría C, según el CIRSOC 102:

Exposición C: Terreno abierto con obstrucciones aisladas que tienen alturas generalmente menores a los 10 m.

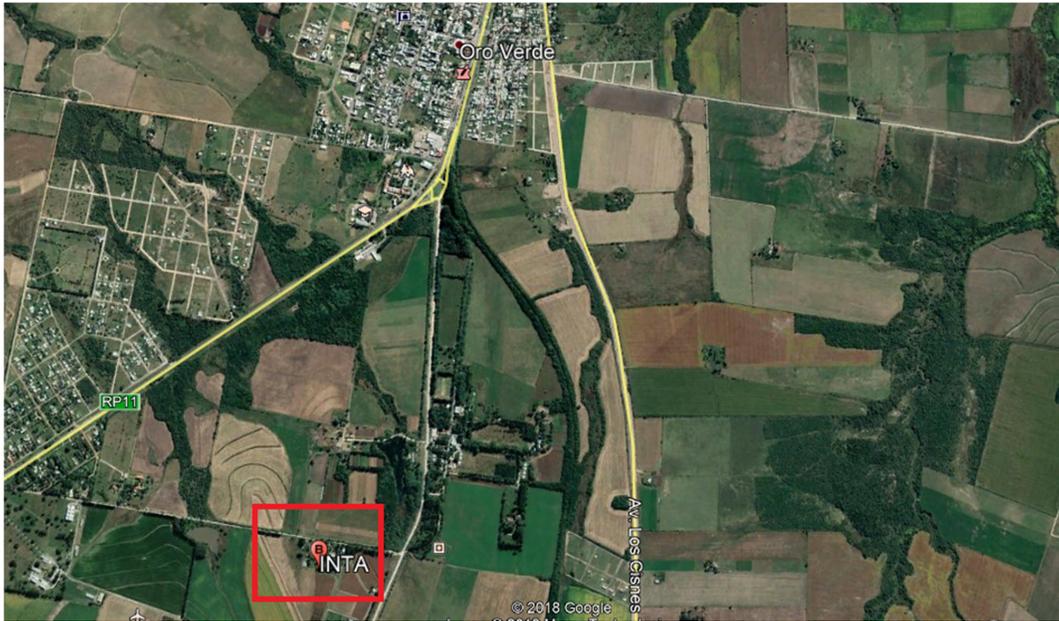


Fig n° 18: Imagen: lugar posible de emplazamiento 3: Ruta Provincial N° 011, Oro Verde, Entre Ríos, Argentina.

Los registros de la estación del INTA indican velocidades medias mayores a los 8 m/s para muestras tomadas a 2 metros de altura.

VIENTO A 2 m (km/h)			
1967/2014			
Mes	Media	Media Máxima	Media Mínima
enero	7,3	10,5	5,3
febrero	7,1	10,4	5,5
marzo	7,1	9,8	4,9
abril	7,2	9,8	4,8
mayo	7,7	11,5	4,9
junio	8,0	11,8	5,3
julio	8,9	13,7	6,9
agosto	9,2	14,4	6,6
setiembre	9,5	13,6	7,6
octubre	9,2	14,0	7,2
noviembre	8,6	12,6	6,4
diciembre	7,8	12,4	5,6
media.anua	8,1	14,4	4,8

Fig n° 19: Tabla: Registro de vientos anuales registrados en la Estación Experimental INTA de Oro Verde

La siguiente imagen muestra un mapa de las intensidades de vientos de la República Argentina:

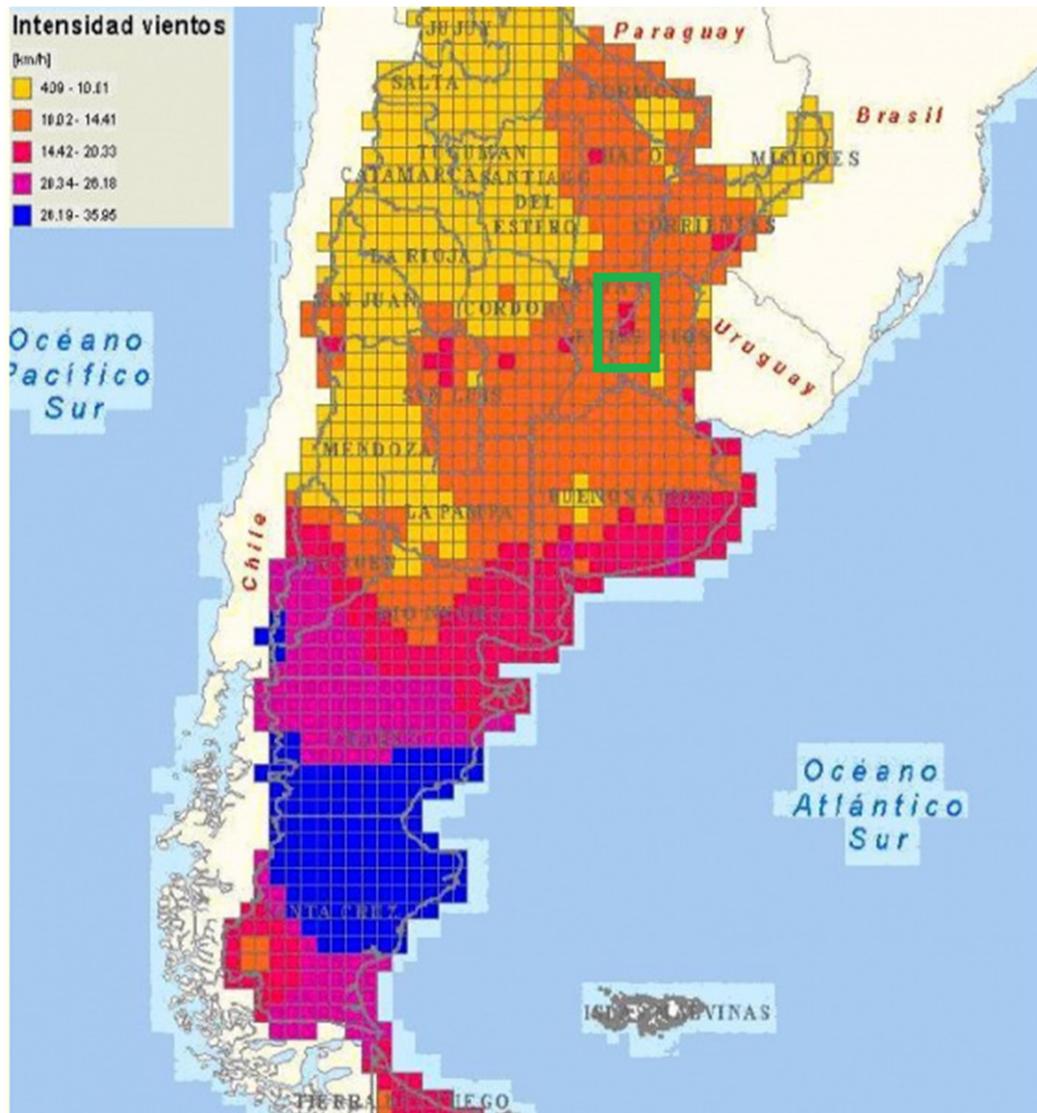


Fig n° 20: Imagen: Mapa de intensidades de vientos de la República Argentina

Se observa que los vientos de la Región de la Patagonia tienen valores altos y permanentes. Formándose corredores de vientos, que conllevan un elevado potencial para desarrollar la energía eólica de elevada potencia.

Podemos apreciar, dentro del rectángulo verde con color violeta, un corredor de vientos con velocidades entre 20 y 26 m/s. Lo que hace posible pensar en desarrollar la energía eólica de elevada potencia en la provincia de Entre Ríos.

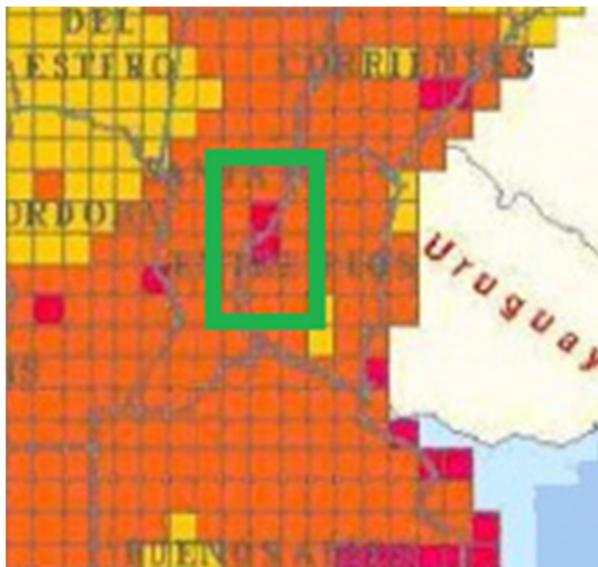


Fig n° 21: Imagen: Aproximación de la zona en estudio

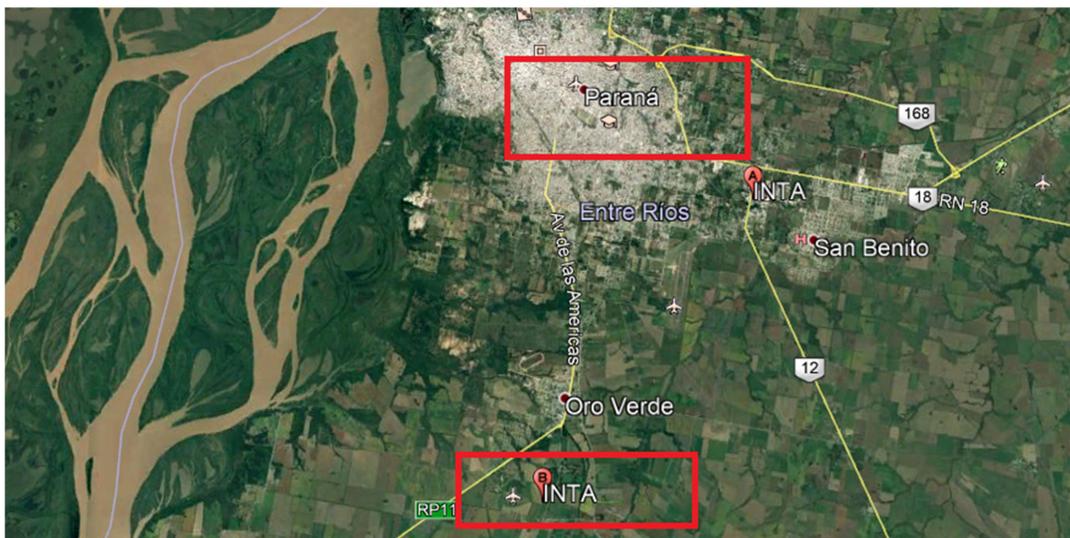


Fig n° 22: Imagen: Estación experimental INTA Paraná, de donde se cuentan los registros de vientos, con referencia a la ciudad de Paraná y al Delta del Rio Paraná

2.4 Criterios implantación de Aerogeneradores

Una vez determinado el lugar del emplazamiento es necesario seleccionar la ubicación precisa de cada una de los aerogeneradores. En principio no hay reglas definidas a priori, sino que se tratará de encontrar las zonas de mayor potencial eólico del emplazamiento – que suelen coincidir con las de mayor altitud- siguiendo la orografía del terreno. Algunas disposiciones son:

Los aerogeneradores se distancian entre sí al menos 3 veces el diámetro dentro de la misma alineación, que suele situarse perpendicularmente a la dirección dominante de energía.

La distancia entre alineaciones será aproximadamente 10 veces el diámetro, adoptando como valor mínimo 7 veces el diámetro.

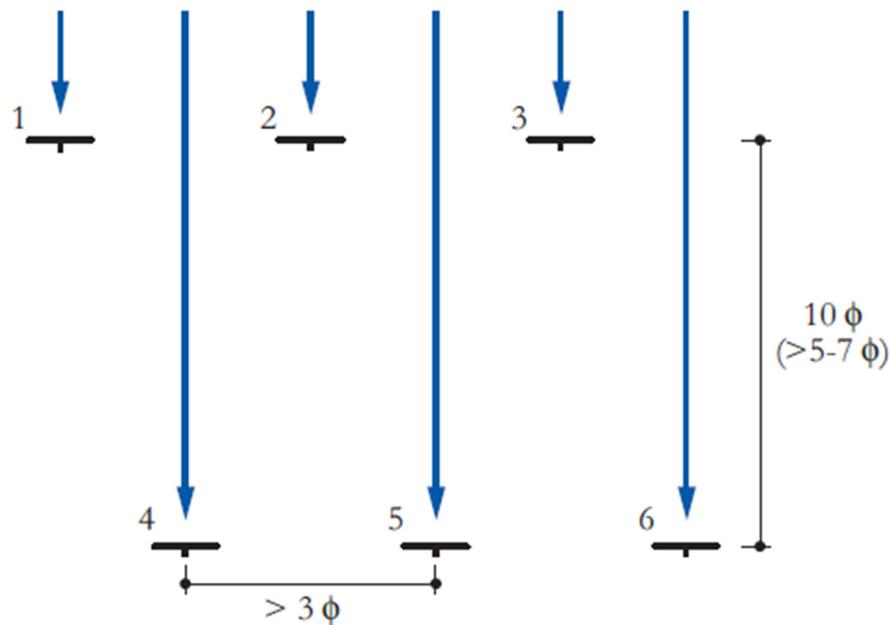


Fig n° 23: Esquema de distribución de aerogeneradores

El cumplimiento de estas disposiciones llevará al aprovechamiento del viento, disminuyendo la pérdida de producción por estela, interacción entre unos aerogeneradores con otros que provoca una desaceleración del flujo del viento, además de convertirlo en turbulento, tanto en los aerogeneradores adyacentes como en los que están detrás, según la dirección del viento incidente.

3- Medición y tratamiento de datos

El recurso eólico se caracteriza por las siguientes variables:

- Velocidad: valores medios, máximos, mínimos y su variación temporal.
- Dirección: rosa de los vientos
- Rugosidad
- Cizalladura, o variación de la velocidad con la altura
- Densidad del aire
- Turbulencia o variabilidad de la velocidad del viento
- Rafagosidad, o valores máximos

Todo proyecto de parque eólico comienza con la estimación del recurso eólico en el emplazamiento para lo cual hay que realizar una campaña de medición utilizando una estación anemométrica. Dicha estación se encargará de registrar la serie temporal de datos de velocidad y dirección de viento a diferentes alturas sobre el nivel del suelo un período de varios años, entre 3 y 5, con el objeto de obtener la variación estacional y anual del viento (ciclos del viento). Una vez que se disponga de dicha serie se estará ya en disposición de caracterizar el recurso eólico mediante el estudio de las variables anteriormente referidas.

3.1 Estación anemométrica

Es el equipo que se encarga de medir y registrar el vector viento y está formada por los siguientes equipos:

Torre: fabricada en estructura metálica o de hormigón. Sobre la misma se instalan a diferentes alturas los anemómetros y las veletas. La altura de la torre debe ser la altura del buje del aerogenerador (altura desde el suelo hasta el centro del rotor). Se instalarán:

- Anemómetro, se colocarán para medir la velocidad del viento. Normalmente se colocan varios y a varias alturas, para poder registrar el perfil de variación del viento con la altura.
- Termómetro, para medir la temperatura y en base a ella la densidad del aire.
- Barómetro, para medir presión y en base a ella la densidad del aire
- Logger o instrumento que registra y almacena los datos recogidos por los sensores.
- Otros elementos como pararrayos, placas solares para alimentar de energía los loggers, soportes, etc.

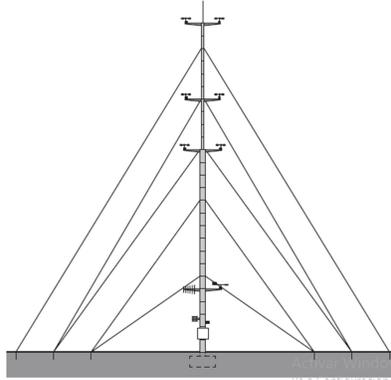


Fig n° 24: Torre de medición



Fig n° 25: Veleta, Anemómetro, Barómetro y Termómetro, respectivamente.

3.2 Torre

La torre para medición del viento, de acuerdo a su estructura pueden ser tubulares o de celosías. Además se pueden instalar arriostradas (con cables atirantados que partiendo de diferentes alturas de la torre la sustentan y la anclan en el suelo) o bien autoportantes. Generalmente las torres arriostradas son más económicas que las autoportantes.

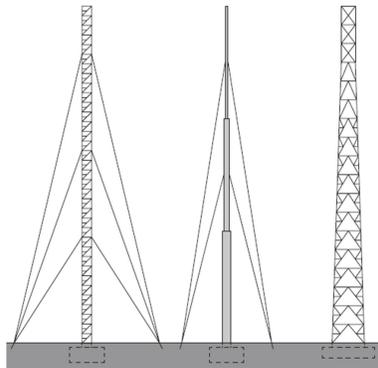


Fig n° 26: Torre arriostrada anclada. Torre tubular anclada. Torre arriostrada auto-portante.

3.3 Anemómetros

La velocidad del viento se mide a través de un anemómetro. Existen diversos tipos de anemómetros pero los más utilizados para la medición del viento son:

1. *Anemómetro de cazoletas*: posee 3 o 4 cazoletas montadas simétricamente alrededor de un eje vertical. La velocidad de rotación es proporcional a la velocidad del viento incidente.
2. *Anemómetro de hélice*: consiste en una hélice montada sobre un eje horizontal. Las características de respuesta de este tipo de anemómetro cuando el viento no es perpendicular al plano de rotación son relativamente bajas, por lo que son menos adecuados que los de cazoletas.
3. *Anemómetros ultrasónicos*: miden la componente horizontal de la velocidad del viento y de la dirección del viento. Requieren una conexión a la red eléctrica debido a su alto consumo. Hasta hoy no están acreditados por la red MEASNET (red internacional de medición del sector eólico) por lo que no se utilizan para la medición del recurso eólico de un emplazamiento en fase de exploración. Sin embargo, si se utilizan en la monitorización del viento de parques eólicos ya que van incorporados en la góndola de los aerogeneradores en tierra o en mar.

3.4 Evaluación del recurso eólico

Una vez registrada la serie temporal de datos de velocidad y dirección del viento durante un período de tiempo comienza la etapa de evaluación del recurso eólico. Esta etapa consiste en un análisis estadístico descriptivo de la serie registrada, que incluirá al menos el estudio de los siguientes parámetros:

1. Valor medio anual de la velocidad
2. Rosa de los vientos.
3. Distribución de la probabilidad de los vientos
4. Valores medio de temperatura y presión
5. Variación del viento con la altura
6. Turbulencia
7. Rafagosidad

En todo caso y antes que nada la primer labor importante será revisar la calidad de los datos registrados con el objetivo de detectar intervalos temporales de posibles datos anómalos, que bien pueden deberse a averías o a otro tipo de incidencias en los sensores.

3.4.1. Velocidad media anual

La velocidad media anual es el principal indicador del recurso eólico disponible en el emplazamiento. La variación mensual de dicho valor determinará la estacionalidad del recurso eólico.

3.4.2. Rosa de los vientos

Para definir la orientación del parque eólico en el terreno es necesario conocer las direcciones predominantes del viento. La representación más utilizada de la distribución direccional del viento es la llamada rosa de los vientos de frecuencia del emplazamiento, en la que se representa el porcentaje del tiempo (o frecuencia) en el que el viento proviene de una determinada dirección espacial.

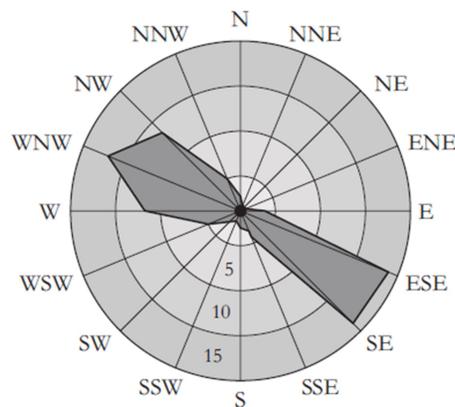


Fig n° 27: Rosa de los vientos de frecuencia

También resultan de interés las rosas de viento de velocidad (que proporcionan la distribución direccional de la velocidad media anual) así como la rosa de energías o distribución de la densidad de energía (W/m² o en %) Esta última rosa tiene en cuenta para cada sector además de la frecuencia la velocidad, por lo que es la que resulta más adecuada para fijar la orientación de los aerogeneradores de un parque eólico.

3.4.3. Distribución de probabilidad del viento

Distribución analítica de la velocidad del viento: distribución de Weibull

La distribución de probabilidades de velocidades se obtiene a partir de las medidas de velocidad tomadas por el anemómetro y nos indica para cada intervalo de velocidad (por ejemplo entre 5 y 6 m/s), la frecuencia del viento sopla con esa velocidad. Puede representarse de forma gráfica – histogramas o diagramas de barras- o en forma de tabla.

La distribución analítica o curva que mejor se adapta al diagrama de barras recibe el nombre de distribución de Weibull y se puede expresar mediante la fórmula:

$$P(v) = (k/c) (v/c)^{k-1} \exp(-v/c)^k$$

En la misma P(v) representa la probabilidad estadística de que ocurra una determinada probabilidad de viento, c es el denominado parámetro de escala (unidades en m/s) – cuyo valor es cercano a la velocidad media del emplazamiento- y k es el denominado factor de forma. Los valores de este factor k varían entre 1 y 2. La distribución de Weibull con un k = 2 recibe el nombre de distribución de Rayleigh.

Función de distribución de Weibull y curva de duración

La función de distribución acumulada de Weibull expresa la probabilidad de que existan velocidades de viento (v) superiores a una determinada velocidad (u):

$$P(v > u) = \exp \left[- \left(\frac{u}{c} \right)^k \right]$$

Si se multiplican los valores proporcionados por dicha función por el número de horas al año – 8700 horas – se obtiene la curva de duración del viento, que proporciona el número de horas que la velocidad del viento supera un valor determinado.

3.4.4. Variación del viento con la altura

La velocidad del viento en un emplazamiento varía con la altura debido al rozamiento del aire en movimiento con la superficie terrestre. Este fenómeno se llama cortadura vertical del viento. La ley potencial es la fórmula empírica que mejor se aproxima a la simulación de este fenómeno:

$$\frac{V}{V_0} = \left[\frac{h}{h_0} \right]^\alpha$$

Donde v es la velocidad del viento (en m/s) a la altura h (en m) y v_0 la velocidad del viento (en m/s) a la altura h_0 (en m) ambas conocidas y α es un factor de cizalladura (o variación del perfil del viento con la altura). Los valores de α varían entre 0,1 y 0,3 dependiendo de la rugosidad o rozamiento del terreno (tipo de vegetación)

Sera preciso, por tanto, que a partir de una serie temporal de datos de viento registrada se analice la variación del viento con la altura, obteniéndose el factor de cortadura y consecuentemente la ley potencial.

3.4.5. Turbulencia

La turbulencia se puede definir como la variación temporal y espacial de la velocidad del viento en el rango de la microescala, es decir para variaciones temporales comprendidas en un rango máximo de 10 minutos y variaciones espaciales de hasta decenas de metros.

La turbulencia es fuente de cargas dinámicas estructurales sobre el aerogenerador y por lo tanto puede disminuir la vida útil de diseño del mismo. Además produce cambios de la potencia suministrada en corto período de tiempo. Por estos motivos es necesario analizar y estudiar esta variable.

El parámetro más utilizado para caracterizar la turbulencia es la intensidad de la turbulencia definida como el coeficiente de variabilidad del viento, es decir, la desviación típica de la velocidad instantánea dividida por la velocidad media $I = \sigma_i / V_i$.

La intensidad de turbulencia se mide en % y se calcula para periodos cortos de 10 minutos. Emplazamientos con intensidades de turbulencias superiores al 30% no son recomendables utilizar desde el punto de vista energético ya que la vida media de los aerogeneradores del parque eólico disminuirá y, por lo tanto, la rentabilidad del parque eólico será menor. El fabricante de la energía eólica será quien determine si su aerogenerador está diseñado para soportar este nivel de turbulencia y cuál será la vida media de su tecnología.

La Norma internacional IEC 61400 – 1 tabula la intensidad de turbulencia (Clase A, B, C y especial) en función de la velocidad media del viento a la altura del buje del aerogenerador.

TABLE 1 / TABLA 1
TURBULENCE INTENSITY
VALORES DE INTENSIDAD DE TURBULENCIA

Wind turbine class	I	II	III	S
V m/s	50	42.5	37.5	Values specified by the designer
A $I_{ref} (-)$		0.16		
B $I_{ref} (-)$		0.14		
C $I_{ref} (-)$		0.12		

Fig n° 28: Tabla de valores de intensidad de turbulencia. Clasificación según Norma IEC 61.400

Dónde:

A: categoría de turbulencia alta

B: categoría de turbulencia media

C: categoría de turbulencia baja

S: intensidad de turbulencia especial

I ref: valor característico de la intensidad de turbulencia a una velocidad de 15 m/s

En general, emplazamientos de orografía compleja - con fuertes pendientes, obstáculos o presencia de estelas de aerogeneradores- suelen estar asociados a la existencia de niveles de turbulencia altos. En estos casos, el perfil de variación del viento con la altura está influenciado por la turbulencia y existirá consecuentemente un transporte vertical de cantidad de movimiento, lo que dará lugar a que el perfil de variación del viento con la altura tienda a ser menos importante.

3.4.6. Rafagosidad

Este parámetro tiene en cuenta los valores máximos del viento – ráfagas o picos – que implican variaciones bruscas de esfuerzo dinámico estructurales. Se caracteriza a través del factor de ráfaga, que se define como el cociente entre la velocidad máxima de registrada v_{max} en el período de tiempo considerado, normalmente de una hora, y la velocidad media (v):

$$Fr = \frac{v_{max}}{v_{med}}$$

Algunos reglamentos lo definen de otra manera. Como el reglamento argentino CIRSOC. Más adelante se detalla su desarrollo.

3.4.7. Temperatura y Presión

Resulta necesario conocer la temperatura y presión medias en el emplazamiento pues estos parámetros físicos influyen en el valor de la densidad del aire. Este último valor, recordemos, intervendrá en el cálculo de la potencia eólica aprovechable.

Dichos valores se obtendrán a partir de los valores instantáneos registrados por el termómetro y el barómetro. En caso de no disponer de estas medidas se podría estimar la temperatura media disponible en un emplazamiento cercano utilizado, por ejemplo, una ley de variaciones de la temperatura con la altitud.

3.5 Clasificación de un Aerogeneradores conforme a Norma IEC 61400-1

La norma IEC 61400 – 1 define la clase de viento de un aerogenerador (I, II, III; IV o S) conforme a la tabla 2, donde:

TABLA 2 / TABLE 2
VALORES DE INTENSIDAD DE TURBULENCIA
TURBULENCE INTENSITY

Class IEC	I	II	III	IV	S
v_{max} (m/s)	50	42.5	37.5	30	Diseños específicos Specified design
v_{gust} (m/s)	70	59.5	52.5	42	
v_{mean} (m/s)	10	8.5	7.5	6	

Fig n° 29: Tabla de clasificación de los Aerogeneradores según la intensidad del viento.
Clasificación según Norma IEC 61.400 - 1

V max: velocidad máxima que se presenta en 50 años (valores promediados en 10 minutos)}

V gust: es la máxima velocidad que se presenta en 50 años (valores promediados en periodos de 5 minutos)

V mean: velocidad media anual del viento.

La clase de viento de un emplazamiento se determina de forma más exacta con el estudio de la V_{ref} (velocidad de referencia a la altura del buje), que se obtiene partiendo de la velocidad media a la altura del buje. La clase de viento en cada una de las posiciones de los aerogeneradores tiene que ser estudiada y validada por el suministrador de la tecnología.

De igual forma, la IEC 61400- 1 define la clase de turbulencia de acuerdo a la tabla 3

TABLA 3 / TABLE 3
CLASE DE TURBULENCIA / TURBULENCE CLASS

	Class IEC	A	B	C	S
Limites de la Turbulencia	I15	>0.12	0.12-0.14	0.14-0.16	>0.16
Turbulence limit	Nivel Turbulencia Turbulence level	Bajo Low	Medio Medium	Alto High	Especial Special

Fig n° 30: Tabla de clasificación de los aerogeneradores según la intensidad de turbulencia.
Clasificación según Norma IEC 61400-1

De este modo un aerogenerador se define entonces por un número romano y una letra que especifica su clase de viento y su nivel de intensidad de turbulencia respectivamente.

Por ejemplo, en un emplazamiento cuya velocidad media sea de 7,3 m/s a la altura del buje podrán instalarse aerogeneradores de clase I, II, y III, pero la clase que optimiza la producción de energía sería la clase III.

A la hora de determinar el aerogenerador más adecuado para un determinado emplazamiento, se partirá de la determinación de la clase del mismo – a través del análisis de las velocidades medias – y el nivel de turbulencia. Una vez conocidos estos parámetros se procede a la selección del modelo de aerogenerador según los catálogos de los fabricantes, seleccionando la mejor opción tecnológica. De todas ellas, desde el punto de vista de la

producción de energía, la mejor será la que más produzca. Para la producción exacta de la producción suele recurrirse a la simulación energética del parque eólico mediante programas informáticos que analizan las distintas alternativas.

4. Superestructura del Aerogenerador

4.1 Generalidades

En los siguientes apartados se hace una revisión de algunos conceptos del análisis estructural para entender el comportamiento dinámico de la estructura.

También se describen las características más relevantes de los componentes mecánicos y estructurales de un aerogenerador tipo.

Por último se hace un análisis conceptual sobre los fenómenos físicos que solicitan un molino de viento y un análisis de cómo evalúa el Reglamento argentino de Viento CIRSOC 202/05 a una estructura de dimensiones similares.

4.1 Aspectos conceptuales sobre el comportamiento de la estructura

3.1 Dinámica de sistemas con masa distribuida:

Un primer aspecto a analizar es la estructura de un aerogenerador, el tipo de comportamiento que tendrá.

Entonces al analizar la estructura el porcentaje de masa total ubicada en su extremo superior, se obtiene que la misma representa el 40% del total de la masa, lo que es inferior al 50% requerido para que sea considerado un péndulo invertido. Por este motivo se deben revisar aquellos aspectos básicos referidos al comportamiento dinámico de sistemas con masa distribuida. Como se demuestra más adelante, los aerogeneradores poseen un comportamiento intermedio entre un péndulo y una estructura con masa completamente distribuida.

3.2 Viga de Flexión con carga transversal

Se muestra a continuación una viga con masa distribuida sometida a una carga transversal también distribuida pero cuya magnitud varía con el tiempo y según la dirección longitudinal de la viga:

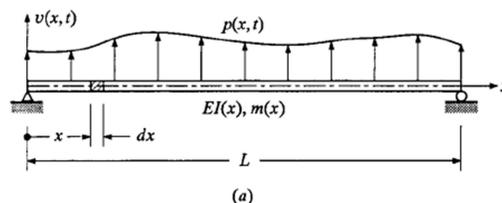


Fig n° 31: Esquema de a flexión con carga transversal

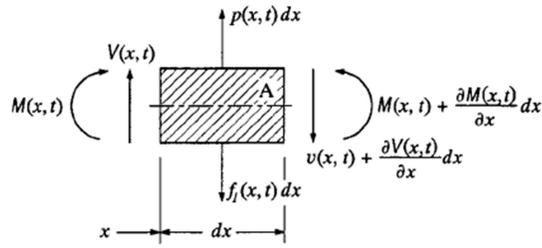


Fig n° 32: Esquema cuerpo en equilibrio

Basados en la figura anterior, planteamos el equilibrio de fuerzas:

$$V(x, t) + p(x, t)dx - \left[V(x, t) + \frac{\delta V(x, t)}{\delta x} dx \right] - f(x, t)dx = 0$$

En donde $V(x, t)$ corresponde al corte, $M(x, t)$ al momento y f a la fuerza inercial resultante, dada por la siguiente ecuación:

$$f(x, t)dx = m(x)dx \frac{\delta^2 V(x, t)}{\delta t^2}$$

Luego la ecuación de equilibrio de fuerza es:

$$\left[\frac{\delta V(x, t)}{\delta x} \right] = p(x, t) - m(x) \frac{\delta^2 V(x, t)}{\delta t^2}$$

Por lo tanto el equilibrio de momentos es:

$$M(x, t) + V(x, t)dx - \left[M(x, t) + \frac{\delta M(x, t)}{\delta x} dx \right] = 0$$

Además, de la teoría de resistencia de materiales sabemos:

$$\frac{\delta M(x, t)}{\delta x} = V(x, t)$$

$$M = EI * \frac{\delta^2 u}{\delta x^2}$$

Reemplazando estas dos últimas expresiones en conjunto con aquella de equilibrio de fuerzas en la ecuación de momentos, obtenemos:

$$\frac{\delta^2}{\delta x^2} \left[EI(x) \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} \right] + m(x) \frac{\delta^2 u(x,t)}{\delta t^2} = p(x,t)$$

Esta última expresión, corresponde a la ecuación del movimiento para la viga de flexión.

4.3 Viga de Flexión con carga transversal y axial:

El siguiente paso natural, corresponde a introducir una carga axial variable según x e invariante en el tiempo (lo cual es realista en la práctica), según se muestra en la siguiente figura. Se observa $N(x)$ introduce un momento adicional debido a la deflexión de la viga.

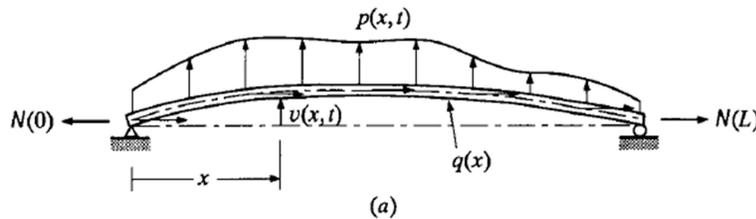


Fig n° 33: Esquema de viga a flexión con carga transversal y axial

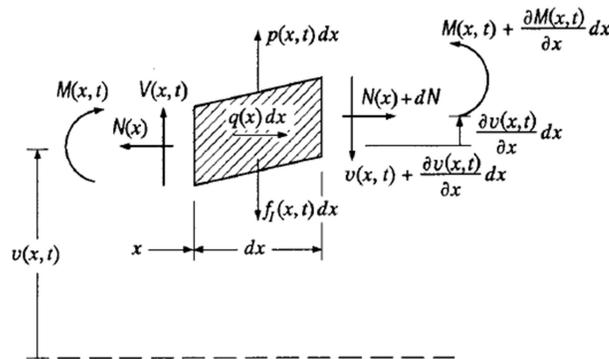


Fig n° 34: Esquema de cuerpo en equilibrio

Luego el equilibrio de momentos es ahora:

$$M(x, t) + V(x, t)dx + N(x) \frac{\delta v(x, t)}{\delta x} dx - \left[M(x, t) + \frac{\delta M(x, t)}{\delta x} dx \right] = 0$$

En donde el corte viene dado por la variación del momento flector y la variación del momento asociado a la carga excéntrica $N(x)$:

$$V(x, t) = -N(x) \frac{\delta v(x, t)}{\delta x} + \frac{\delta M(x, t)}{\delta x}$$

Introduciendo esta última expresión de $V(x, t)$ modificada en la ecuación aun válida para el equilibrio de fuerzas transversales, obtenemos:

$$\frac{\delta^2}{\delta x^2} \left[EI(x) \frac{\delta^2 u(x, t)}{\delta x^2} \right] - \frac{\delta}{\delta x} \left[N(x) \frac{\delta u(x, t)}{\delta x} \right] + m(x) \frac{\delta^2 u(x, t)}{\delta t^2} = p(x, t)$$

Se puede observar que $N(x)$ adiciona una carga transversal.

4.4 Viga de Flexión con amortiguamiento viscoso:

Hasta ahora, se había definido amortiguamiento viscoso para sistemas discretos. Para el caso de sistemas continuos, se considera un amortiguamiento variable con la posición según se muestra en la siguiente figura:

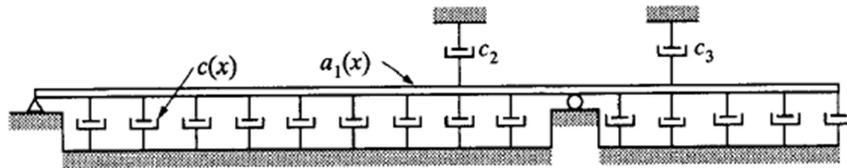


Fig n° 35: Esquema de viga a flexión con amortiguamiento viscoso

Es decir, se desarrollan tensiones adicionales de amortiguamiento en forma proporcional a la velocidad de la deformación unitaria, expresada por la siguiente expresión:

$$\sigma = E [\varepsilon + a\dot{\varepsilon}]$$

En donde E corresponde al módulo de Young y a es una constante de amortiguamiento viscoso. Debido a esta formulación, se modifica la relación entre el momento flector y la segunda derivada de la elástica:

$$M(x, t) = EI(x) [v''(x, t) + a v''(x, t)]$$

Debido a la presencia de $c(x)$, se desarrollan fuerzas externas de amortiguamiento transversales, dadas por la expresión:

$$fd(x, t) dx = c(x) \frac{\delta v(x, t)}{\delta t} dx$$

Realizando el equilibrio de fuerzas y momentos considerando la expresión modificada para $M(x, t)$ así como la incorporación de la fuerza de amortiguamiento $Fd(x, t)$, se llega a la siguiente ecuación final del movimiento:

$$\frac{\delta^2}{\delta x^2} \left[EI(x) \frac{\delta^2 v(x, t)}{\delta x^2} + a \frac{\delta^3 v(x, t)}{\delta x^2 \delta t} \right] + m(x) \frac{\delta^2 v(x, t)}{\delta t^2} + c(x) \frac{\delta v(x, t)}{\delta t} = p(x, t)$$

Además podemos incorporar en esta ecuación el efecto de una carga axial $N(x)$, según lo desarrollado en el punto anterior.

4.5 Estudio de Frecuencias de Vibración:

Para estudiar las frecuencias de vibración de una viga de flexión (infinitas frecuencias), consideremos el caso de vibraciones libres sin amortiguamiento, similar a lo desarrollado para sistemas discretos. Previo a lo anterior, y con el objetivo de obtener una solución analítica de la ecuación del movimiento (de cuarto orden), se debe suponer que las propiedades de masa e inercia permanecen constantes a lo largo de la viga. De esta forma, recordemos la ecuación obtenida en 3.1.1 considerando $p(x, t) = 0$:

$$EI \frac{\delta^4 v(x, t)}{\delta x^4} + m \frac{\delta^2 v(x, t)}{\delta t^2} = 0$$

En donde se ha reemplazado $EI(x)$ por EI , y $m(x)$ por m . Si dividimos por EI y utilizamos notación compacta, se obtiene:

$$\Phi^4(x) Y(t) + \frac{m}{EI} \Phi(x) Y''(t) = 0$$

Como siempre, supondremos una solución del tipo separación de variable de la forma:

$$v(x, t) = \Phi(x) Y(t)$$

Esto último implica que la respuesta de vibraciones libres corresponde a ciertas formas modales o geométricas independientes del tiempo con amplitudes $Y(t)$ dependientes del tiempo.

Reemplazando la solución supuesta en la ecuación del movimiento, obtenemos:

$$\Phi^4(x)Y(t) + \frac{m''}{EI} \Phi(x)Y''(t) = 0$$

Y si se divide por $\Phi(x) * Y(t)$ obtenemos: $\frac{\Phi^4(x)}{\Phi(x)} + \frac{m''}{EI} \frac{Y''(t)}{Y(t)} = 0$

Para que esta ecuación se cumpla para todo valor de (x,t) , tanto la expresión geométrica como la temporal deben ser constantes, es decir:

$$\frac{\Phi^4(x)}{\Phi(x)} = - \frac{m''}{EI} \frac{Y''(t)}{Y(t)} = a^4$$

Lo anterior lleva a las siguientes dos ecuaciones:

$$Y''(t) + \omega^2 Y(t) = 0$$

En donde por conveniencia se ha definido que:

$$\Phi^4(x) - a^4 \Phi(x) = 0$$

$$\omega^2 \equiv \frac{a^4 EI}{m''}$$

Se observa que la primera ecuación temporal corresponde a la expresión de vibraciones libres para un sistema de un grado de libertad, cuya solución es ($A = u_0$ y $B = v_0/\omega$):

$$Y(t) = A \cos \omega t + B \operatorname{sen} \omega t$$

Por otra parte, la segunda ecuación geométrica o modal posee solución del tipo:

$$\Phi(x) = A1 \cos ax + A2 \operatorname{sen} ax + A3 \cosh ax + A4 \operatorname{senh} ax$$

Si se considera ahora el caso particular de vigas cantiléver, es decir, empotrada en un extremo y libre en el extremo opuesto, condiciones de borde que se representan como:

$$\Phi(x) = 0$$

$$\Phi'(x) = 0$$

$$M(L) = EI \Phi''(L) = 0$$

$$V(L) = EI \Phi'''(L) = 0$$

Es decir, en $x=0$ desplazamiento y giros nulos (empotramiento), y en $x=L$ momento y corte nulo (libre). Notar que $M(L)$ y $V(L)$ han sido evaluadas en coordenadas modales, es decir, considerando la función $\Phi(x)$. Reemplazando estas condiciones en la expresión de la solución $\Phi(x)$ y sus sucesivas derivadas, obtenemos:

$$\Phi(0) = A1 \cos 0 + A2 \operatorname{sen} 0 + A3 \cosh 0 + A4 \operatorname{senh} 0$$

$$\Phi'(0) = a(-A1 \operatorname{sen} 0 + A2 \cos 0 + A3 \operatorname{senh} 0 + A4 \cosh 0) = 0$$

$$\Phi''(L) = a^2(-A1 \cos aL + A2 \operatorname{sen} aL + A3 \operatorname{senh} 0 + A4 \cosh 0) = 0$$

$$\Phi(x) = A1 \cos ax + A2 \operatorname{sen} ax + A3 \cosh ax + A4 \operatorname{senh} ax$$

De donde se obtiene que $A3 = -A1$ y $A4 = -A2$

Luego las anteriores expresiones se reducen a encontrar las constantes $A1$ y $A2$, para lo cual expresamos las anteriores ecuaciones en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \cos aL + \cosh aL & \operatorname{sen} aL + \operatorname{senh} aL \\ \operatorname{senh} aL - \operatorname{sen} aL & \cos aL + \cosh aL \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} A1 \\ A2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

La solución no trivial de esta ecuación matricial ($A1$ y $A2$ no nulos) ocurre cuando el determinante de la matriz es nulo, es decir, corresponde a un problema de valores propios.

Desarrollando el determinante nulo se llega a la siguiente ecuación:

$$\cos aL = -(1/\cosh aL)$$

Esta ecuación debe ser resuelta en forma numérica, obteniéndose los siguientes resultados para las primeras cuatro raíces: $(a*L)_n = 1.8751; 4.6941 (n=2); 7.8548$

$(n=3)$; 10.996 ($n=4$). Es posible visualizar gráficamente las expresiones de esta ecuación, las cuales corresponden a la intersección de las gráficas de las ecuaciones a cada lado de la igualdad:

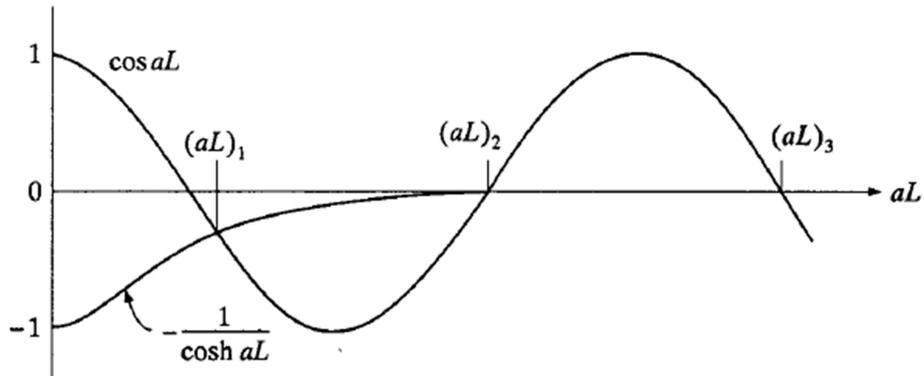


Fig n° 36: Grafica de los resultados de las diferentes soluciones

Se puede observar que los cruces de las gráficas ocurren en las cercanías de los cruces por cero de la gráfica $\cos(a * L)$, con lo cual se puede plantear la siguiente ecuación recurrente:

Si bien se indica que la ecuación es válida para $n \geq 4$, pareciera que la ecuación se aproxima bastante bien para valores $n \geq 2$.

Así: $n = 1$ ($L * a = 1$) = 1.571 vs 1.8751

$n = 2$ ($L * a = 2$) = 4.712 vs 4.6941

$$(a * L)_n = \frac{\pi}{2} (2n - 1)$$

Con: $n=4,5,6 \dots$

Se muestra a continuación la gráfica que describe el comportamiento de la estructura para cada frecuencia de vibración:

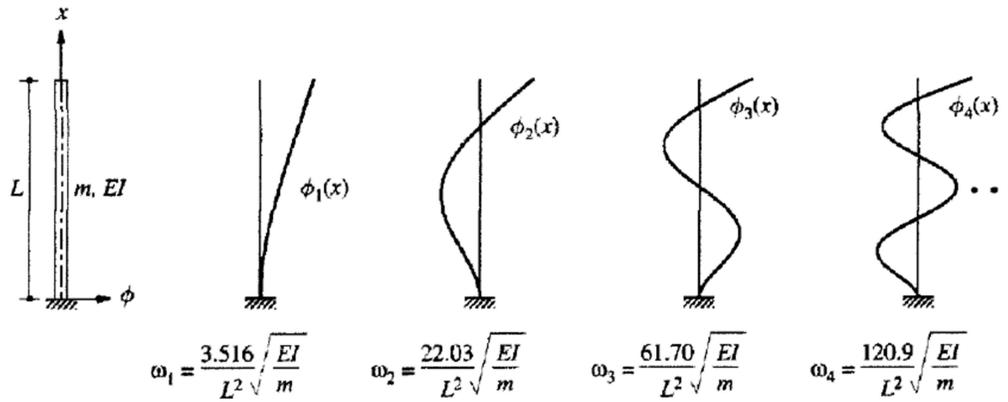


Figure 16.3.2 Natural vibration modes and frequencies of uniform cantilever beams.

Fig n° 37: Gráfica del comportamiento de la estructura para cada modo de vibración

4.6 Viga de flexión con carga concentrada en el extremo libre

Una variación del caso estudiado anteriormente, estudiaremos el caso de una viga cantiléver con masa distribuida, la cual posee en su extremo libre una masa rígida relevante, tal cual es el caso de los aerogeneradores en estudio, aspecto que se muestra en la siguiente figura:

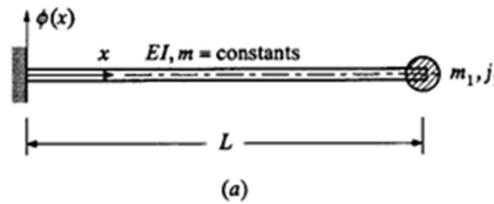


Fig n° 38: Esquema de viga empotrada en un extremo y con carga concentrada en el otro extremo

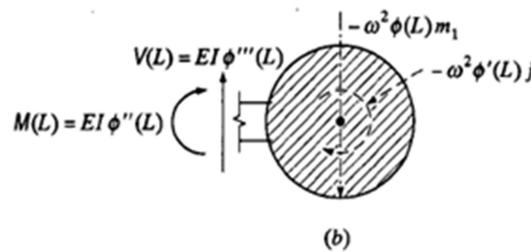


Fig n° 39: Esquema de equilibrio de fuerzas

En este caso las condiciones de borde del extremo empotrado son idénticas a las obtenidas para el caso de viga cantiléver anteriormente estudiado. **Para el extremo libre sin embargo, los esfuerzos de corte y momento son distintos de cero, por haber una carga concentrada.**

En el diagrama de cuerpo libre se muestran las fuerzas actuantes sobre el cuerpo rígido de masa m_1 y momento de inercia j_1 .

La fuerza rotacional es igual a $j_1 * \ddot{\theta}(L, t)$ y la fuerza traslacional es igual a $m_1 * \ddot{u}(L, t)$.

Las ecuaciones para la viga a flexión bajo vibraciones libres son:

$$v(x, t) = \Phi(x) Y(t)$$

$$Y''(t) + \omega^2 Y(t) = 0$$

$$\Phi^4(x) - a^4 \Phi(x) = 0$$

Con estas ecuaciones, podemos evaluar las condiciones de borde para la viga:

$$\ddot{u}(L, t) = \Phi(L) \ddot{Y}(t) = -\omega^2 \Phi(L) Y(t)$$

$$\ddot{\theta}'(L, t) = \Phi'(L) \ddot{Y}(t) = -\omega^2 \Phi'(L) Y(t)$$

Luego el equilibrio de fuerza y momento de la masa rígida requiere que las siguientes condiciones se cumplan:

$$EI \Phi'''(L) = -\omega^2 \Phi(L) Y(t)$$

$$EI \Phi''(L) = \omega^2 \Phi'(L) Y(t)$$

Finalmente, usando estas dos últimas expresiones en reemplazo de las condiciones de borde obtenidas en el extremo libre para una viga de flexión cantiléver [$\Phi''(L) = \Phi'''(L) = 0$] desarrollamos el análisis de vibraciones libres para obtener las frecuencias del sistema como se hizo en el punto anteriormente desarrollado.

4.7 Efectos de la deformación de corte y la inercia rotacional

Si se observan las anteriores ecuaciones, se han despreciado los efectos de la deformación por corte y la inercia rotacional. Si se desarrollan las ecuaciones

considerando la deformación por corte, es decir, se utiliza la teoría de la viga de Timoshenko para una viga con propiedades uniformes, se obtiene la siguiente ecuación de equilibrio:

$$m \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} + EI \frac{\delta^4 u}{\delta x^4} - mr^2 \left(1 + \frac{E}{kG} \right) \frac{\delta^4 u}{\delta x^2 \delta t^2} + \frac{m^2 r^2}{kGA} \frac{\delta^4 u}{\delta t^4} = 0$$

Si consideramos que $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$ y definimos: $\Omega = \frac{\omega_n}{\omega}$, podemos reescribir la ecuación anterior como:

$$(1 - \Omega^2_n) - \Omega^2_n \left(\frac{n\pi r}{L} \right)^2 \left(1 + \frac{E}{kG} \right) + \Omega^4_n \left(\frac{n\pi r}{L} \right)^4 \frac{E}{kG} = 0$$

Si además consideramos que $n * L/r \ll 1$, la ecuación anterior se reduce a:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{n\pi r}{L} \right)^2 \left(1 + \frac{E}{kG} \right)}}$$

Para el caso de la teoría del aerogenerador en estudio, se tiene que: $(E/G)/K = 2.5/2 = 1.25$ y $r/L = 0.019$. Evaluando estos valores en la ecuación anterior para $n=1$ hasta $n=4$, entonces:

$$\omega = \omega_n * \frac{1}{\sqrt{1 + 0.00802 * n^2}}$$

Evaluando:

$$\omega'1 = 0.996 * \omega1$$

$$\omega'2 = 0.984 * \omega2$$

$$\omega'3 = 0.966 * \omega3$$

$$\omega'4 = 0.924 * \omega4$$

Lo anterior se expresa gráficamente en la siguiente figura:

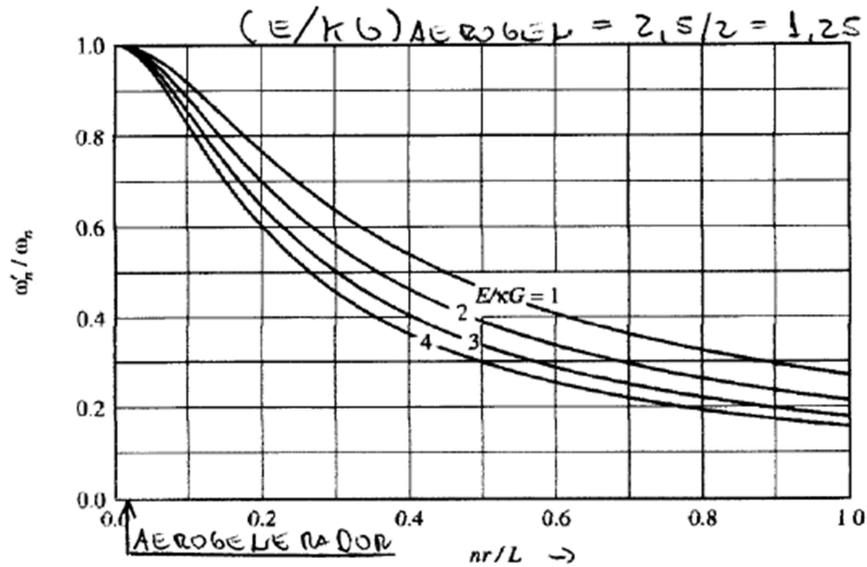


Figure 16.3.3 Influence of shear deformation and rotational inertia on natural frequencies of simply supported beams.

Fig n° 40: Influencia de la deformación por corte y la inercia rotacional para diferentes frecuencias naturales de vibración

Se concluye que la corrección al incluir la deformación por corte e inercia rotacional podría afectar las frecuencias de modos superiores, pero no afecta en forma apreciable los dos primeros modos.

4.8 Vigas de flexión con masa e inercia variables:

Este podría ser el caso habitual de chimeneas, e incluso las torres de **los aerogeneradores son del tipo tronco-piramidales, por lo cual es necesario estudiar el efecto de la variación de la masa y la inercia**. Si recordamos la ecuación geométrica o modal para vibraciones libres de una viga de flexión:

$$EI(x) \Phi^4(x) + 2EI'(x) \Phi^3(x) + EI'' \Phi^2(x) - \omega^2 m(x) \Phi(x) = 0$$

Se observa que la ecuación es de cuarto orden en x, por lo cual es poco factible una solución analítica para ω^2 y $\Phi(x)$. Luego, el enfoque de la teoría de flexión si bien permite acercarse al entendimiento de este tipo de estructuras, es de poca aplicación práctica para problemas en los cuales se tiene $EI(x)$ y $m(x)$.

Para resolver este problema en la práctica, se utilizan el enfoque discreto con un número finito de sistemas de un grado de libertad, que permite aproximarse a la solución exacta. A este respecto, dos métodos aparecen como los más adecuados (A. Chopra, 1995)

- Método Rayleigh
- **Método de elementos finitos (MEF)**

De estos métodos el más difundido es el MEF, el cual posee la ventaja de ser computacionalmente muy eficiente. Al utilizar el método FEM, es necesario tener especial cuidado en los elementos utilizados en la modelación, dado que este aspecto incide fuertemente en la solución, tal como se desprende de la siguiente tabla:

TABLE 17.10.2 NATURAL FREQUENCIES OF A UNIFORM CANTILEVER BEAM: LUMPED-MASS FINITE ELEMENT AND EXACT SOLUTIONS

Mode	Number of Finite Elements, N_e					Exact
	1	2	3	4	5	
1	2.44949	3.15623	3.34568	3.41804	3.45266	3.51602
2		16.2580	18.8859	20.0904	20.7335	22.0345
3			47.0284	53.2017	55.9529	61.6972
4				92.7302	104.436	120.902
5					153.017	199.860

Source: R. R. Craig, Jr., *Structural Dynamics*, Wiley, New York, 1981.

Fig n° 41: Tabla: número de elementos finitos necesarios según el modo

5- Componentes de un Aerogenerador

5-1 Componentes Mecánicos

Pala

Para convertir la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación que alimente al generador eléctrico, el componente más importante es la propia pala. Trabaja como una viga en voladizo conectada al buje con un rodamiento que les permite girar sobre su eje para controlar las fuerzas aerodinámicas. Palas de más de 60 m con un peso del orden de 15 toneladas se fabrican con materiales compuestos de una matriz de resina epoxi, poliéster, que se refuerza con fibra de vidrio o de carbono.

El diseño de una pala consta de tres aspectos a los que hay que prestar atención: la forma exterior, que dará sus prestaciones aerodinámicas, la parte estructural que soporta los esfuerzos mecánicos y la parte de materiales, con efecto tanto en la parte estructural como en el comportamiento de la pala ante agentes externos: erosión, descargas eléctricas, etc.

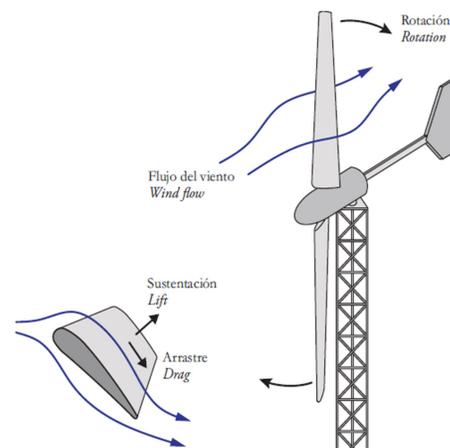
La pala en su forma exterior parte de una zona cilíndrica en su raíz donde se une con el buje, a partir de la cual se apilan perfiles aerodinámicos, buscando la máxima producción de energía, pero teniendo en cuenta las cargas que se van a producir en la propia pala y en el resto de componentes del aerogenerador, así como el ruido aerodinámico que produce.

Al incidir el viento sobre el perfil aerodinámico de la pala se originan unas diferencias de presiones entre la parte superior e inferior de la misma que crean la fuerza de sustentación y de arrastre cuya resultante es el empuje que mueve la pala. Ambas fuerzas dependen del ángulo incidente del viento (ángulo de ataque) y lo que se busca es que la relación entre la sustentación y la fuerza de arrastre sea la máxima posible.

En un aerogenerador, la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre en las palas se transforman en una fuerza que hace girar el eje de la máquina – par mecánico – y que se aprovecha para producir electricidad así como un empuje horizontal sobre el mismo eje de giro. Dicho empuje, además de ser variable en función de las condiciones del viento, no genera energía pero sí esfuerzos mecánicos que deben resistirlos tanto la torre como la cimentación.

Para la fabricación de las palas, al ser materiales compuestos, se utilizan procesos de infusión de resinas o el uso de materiales pre-impregnados que son las dos tendencias más generalizadas actualmente.

Debido a la importancia de las palas en la estabilidad del aerogenerador, han de someterse a ensayos estáticos y de fatiga para su certificación.



Las palas de los aerogeneradores se fabrican en una única pieza. Debido a sus dimensiones y pesos, se transportan sobre plataformas extensibles que requieren de amplios radios de giro. Para zonas con grandes limitaciones en el acceso, se han desarrollado uniones modulares que permiten transportar las palas en dos secciones y unir las en el parque.

Buje

Es la pieza a la que se conectan las tres palas y se une al eje principal de la turbina. Tiene dos misiones: soportar las tres palas y transferir los esfuerzos al eje de giro y alojar el actuador de giro de las palas. Fabricado en hierro nodular para soportar cargas extremas y de fatiga, consta de tres bridas con sus rodamientos para el giro de pala y con los accionamientos correspondientes.

Para controlar el ángulo de ataque de las palas y por lo tanto su eficiencia se dispone dentro del buje de tres actuadores (uno por pala) independientes entre ellos. Dichos actuadores han de estar equipados con 2 sistemas en paralelo, uno para operación normal y otro que garantice que las palas pasan a posición segura en caso de fallo. Hay dos sistemas de actuación muy extendidos:

1. Sistema Hidráulico: son unos cilindros hidráulicos que en su movimiento de entrada y salida consiguen que la pala pivotee unos 90 grados desde la posición de seguridad o mínimo empuje aerodinámico (posición de bandera) hasta la posición de máximo empuje. En acumuladores hidráulicos se almacena la energía suficiente ante cualquier fallo en el sistema de control o corte en el suministro de energía.
2. Sistema electromecánico: el giro de la pala se consigue por medio del engrane de un piñón accionado desde una moto reductora eléctrica sobre uno de los aros dentados del rodamiento de la propia pala. En este caso la energía para llevar la pala a la posición de seguridad se almacena en baterías o en condensadores.

En ambos casos el control de la posición de la pala es crítico ya que con la posición de las palas se define la producción y la carga sobre el aerogenerador.

Todo este conjunto está protegido por una carcasa llamada cono o nariz. Esta envolvente está construida de material compuesto generalmente de resinas poliéster reforzadas con fibra de vidrio. La misma debe soportar cargas de viento, como las condiciones atmosféricas de lluvia, granizo con resistencia a los rayos ultravioletas del sol. En su diseño se tiene en cuenta la aerodinámica y los criterios de ergonomía y seguridad para facilitar el acceso a los técnicos de mantenimiento y el intercambio de componentes.

Las dimensiones de este conjunto son del orden de 4 metros de diámetro en la base del cono y unos 4 metros de altura, con un peso alrededor de 40 Toneladas.

Nacelle o góndola

La nacelle es la parte del aerogenerador que alberga el tren mecánico y el generador eléctrico, así como diversos componentes eléctricos, de control y de refrigeración. Su diseño varía

ostensiblemente dependiendo de la tipología de aerogenerador elegido y las características propias de cada fabricante, al igual que sus dimensiones y pesos.

En el caso de aerogeneradores multipolares, la configuración de la nacelle es de tipo disco, generalmente de forma circular y con grandes diámetros y pesos. En el caso de aerogeneradores con multiplicadora, la nacelle suele ser alargada y de sección cuadrada.

Al igual que la envolvente de cono de nariz, la envolvente de la nacelle se fabrica con materiales compuestos. En su diseño se busca ligereza, pero a la vez resistencia para soportar cargas del viento e incluso de nieve depositada en su capota y soportar las condiciones atmosféricas. El espacio que queda entre la envolvente y la maquinaria interior facilita las labores de mantenimiento e incorpora iluminación y un polipasto para izar pequeños repuestos y consumibles. A la vez que aísla a la máquina de elementos externos (agua, polvo) tiene que permitir la correcta ventilación de los equipos puesto que las pérdidas mecánicas por rozamientos o las pérdidas eléctricas generan una cantidad de calor del orden del 4% de la potencia nominal del aerogenerador.

Sistemas de Frenado

Se dispone de dos sistemas de frenado: uno aerodinámico; y otro mecánico.

El aerodinámico se utiliza para detener la turbina, dado que cuando las aspas giran 90° sobre su eje longitudinal el rotor no presenta superficie frente al viento.

El mecánico incorpora un disco hidráulico, en cual posee una fuente de energía independiente al suministro de energía eléctrica.

Situaciones de frenado:

1. **Frenado normal** (en operación): para este caso solo se utiliza el frenado aerodinámico o mediante la regulación del paso de las aspas para un frenado controlado.
2. **Frenado de emergencia**: en el cual se utilizan ambos sistemas de frenado en situaciones críticas.

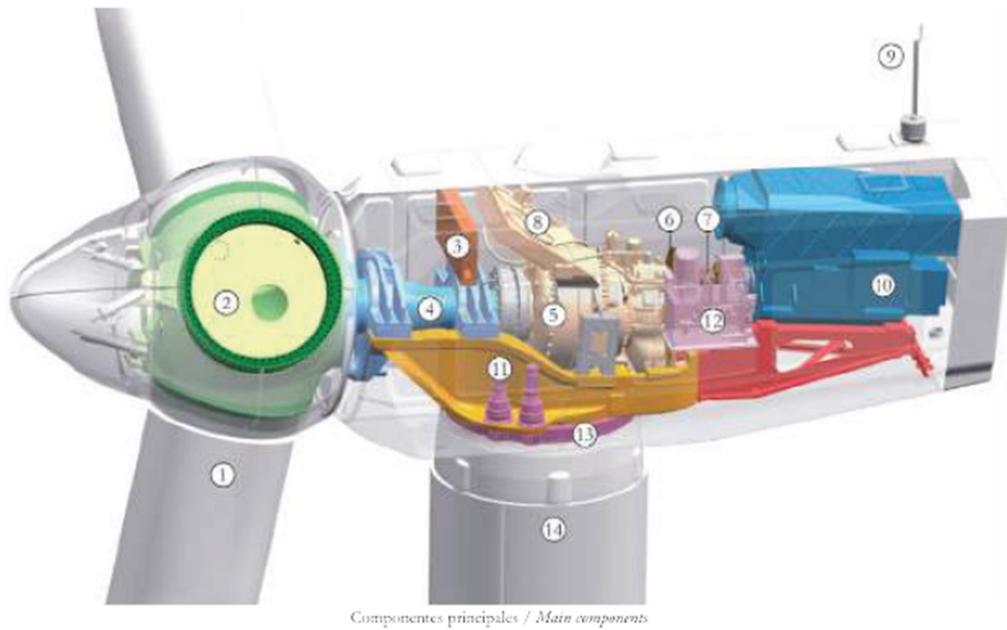


Fig n° 42: Imagen del corte de una Nacelle o Góndola- se aprecian algunos componentes mecánicos tales como: el eje principal; el generador; el reductor de orientación

5-2 Componentes Estructurales

Son aquellos que transmiten las cargas de la superestructura al suelo:

Los componentes críticos para el diseño y cálculo de un aerogenerador son:

1. **Torre**
2. Anclaje o unión metálica
3. Fundación

5-2.1 Torre tubular modular

En la actualidad las torres de acero y de hormigón se forman a partir del ensamblaje de subelementos de menores dimensiones, que hacen posible su fabricación en plantas industrializadas, que permiten el transporte por carretera y también el montaje en posición definitiva con medios relativamente económicos. Esta segmentación convierte a la torre en modular y permite reducir los costos de construcción in situ.

Las torres tubulares se dividen en tramos y si resulta de interés, estos se pueden dividir en dovelas.

Tramo

El tramo es el elemento primario del que se componen las torres modulares y sus parámetros fundamentales de diseño son la longitud y diámetro. Sus dimensiones y pesos máximos se definen en función de las restricciones impuestas por las instalaciones de fabricación, transportabilidad y la racionalización de los medios de montaje.

Hay que tener en cuenta, para el transporte por carretera, las dimensiones máximas de los tramos a transportar. La altura máxima de pieza transportable, debido a los requisitos de galibo en el paso bajo puentes, túneles u otros elementos varios.

Dovelas

La dovela introduce un grado de libertad adicional en la configuración, el transporte, la manipulación y el montaje de las torres, multiplicando las opciones de diseño y la versatilidad constructiva de las soluciones modulares más simples. Las subdivisiones de los tramos en dovelas permiten relajar las restricciones de transporte tanto en altura como en peso máximo. Esta subdivisión ha permitido el desarrollo de las torres altas, y ha supuesto el impulso definitivo de las torres prefabricadas de hormigón frente a soluciones clásicas de tubo metálico completo gracias a la ventaja competitiva que suponen los nuevos tramos de gran diámetro conformados por dovelas transportables por carreteras.

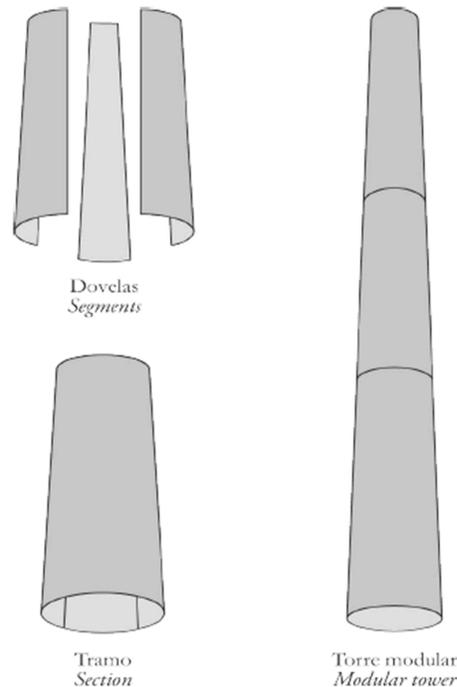


Fig n° 43: Imagen de tramo y dovelas de una torre de aerogenerador

Uniones e interfaces

La torre es un elemento intermedio de transferencia de cargas, de personas y de materiales. La misma comparte interface con la cabina y con la cimentación . En el contacto con estos componentes debe asegurarse continuidad en los siguientes aspectos:

-Continuidad a nivel estructural. Se garantiza mediante una unión mecánica que garantiza la transmisión de cargas de góndola a torre y de torre a cimentación así como entre los tramos o dovelas de la torre. La unión depende de la tipología y del material de la torre, siendo común la unión mediante bridas en torre metálica o la unión mediante una pieza de transición metálica en las torres de hormigón.

-Continuidad a nivel de personas. Como ejemplo encontramos la puerta que, en la base de la torre, sirve como elemento de conexión y acceso entre la máquina y el exterior y se diseña para asegurar el paso de trabajadores y equipo.

5.3 Montaje: grúas de alta capacidad

La necesidad de medios de elevación de gran potencia está directamente relacionada con la altura y las dimensiones de los elementos que intervienen en el montaje de aerogeneradores. Incluso en aquellos en que la construcción de la torre se realiza in situ, por ejemplo mediante el empleo de encofrados trepantes, la

coronación de la estructura con la góndola y el rotor requiere el posicionamiento de una gran grúa.

La tendencia actual del mercado hacia torres más altas y turbinas más potentes, y pesadas, está viéndose en gran medida limitada como consecuencia del coste muy elevado de las grúas. Además su disponibilidad es frecuentemente muy escasa, y otras exigencias mínimas en cuanto al trazado vial, hacen que su uso tenga un fuerte impacto sobre el costo del proyecto. Es por ello que la capacidad de elevación de la grúa, en muchas ocasiones, define la longitud y peso máximo de los tramos superiores.



Fig n° 44: Imgenes de gruas para instalar

5.4 Sistema alternativo: Torre telescópica auto-elevable de hormigón prefabricado

Hoy por hoy debido a la gran cantidad de diseños y soluciones constructivas, tanto como la variedad de los materiales con que se cuenta, el objetivo principal del diseño y construcción de las torres radica en minimizar los tiempos y medios requeridos para la construcción. En este sentido uno de los aspectos claves es el uso de una alternativa a las grúas de gran potencia. Para lo cual se está desarrollando un sistema alternativo, de hormigón prefabricado, que se eleva hidráulicamente, llamada torre telescópica.

La torre telescópica es una torre modular de hormigón prefabricado en la que el montaje de los tramos se realiza a baja altura. Siguiendo el esquema de las capas de una cebolla, los tramos se ensamblan a cota de cimentación, envolviendo los unos a los anteriores e involucrando únicamente grúas de poca capacidad, alta disponibilidad y bajo coste.

La cabina, junto con el rotor, se sitúan en la cabeza de la torre antes de comenzarse con la operación de izado. La elevación de todo el conjunto se realiza mediante un sistema de gatos hidráulicos. Entonces el cambio de grúas de alta capacidad por el de estos gatos hidráulicos lleva a una reducción en el coste de todo el proceso de montaje.

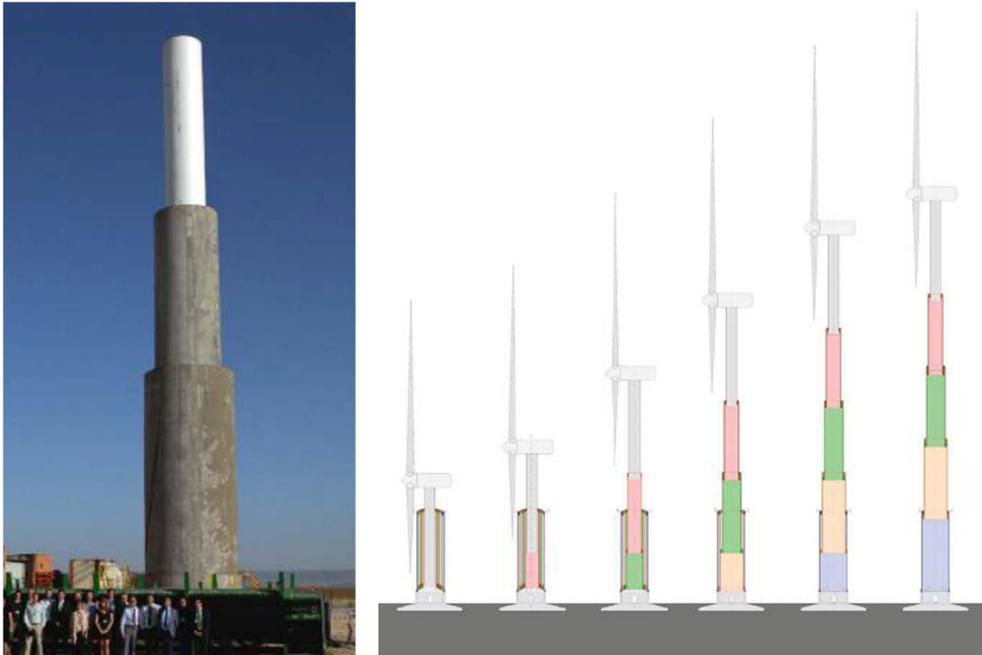


Fig nº 45: Torre de hormigón prefabricado. Esquema de montaje de torres autoelevables.

6 Solicitaciones de Diseño

6.1 Aspectos conceptuales

6.1.1 Acción del Viento

Debido a la tipología de la estructura en estudio, la carga de mayor relevancia es el viento. Debido a la altura y a la superficie expuesta de la estructura el viento siempre se encuentra presente como una carga.

6.1.2 Acción del viento sobre un cilindro

Las características de un flujo dependen, en gran medida, de la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas que se encuentran presentes en el flujo. El número de Reynolds corresponde a una medida adimensional de esta relación, definido por:

V : velocidad característica

D : Dimensión característica

ν : Viscosidad cinemática= $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

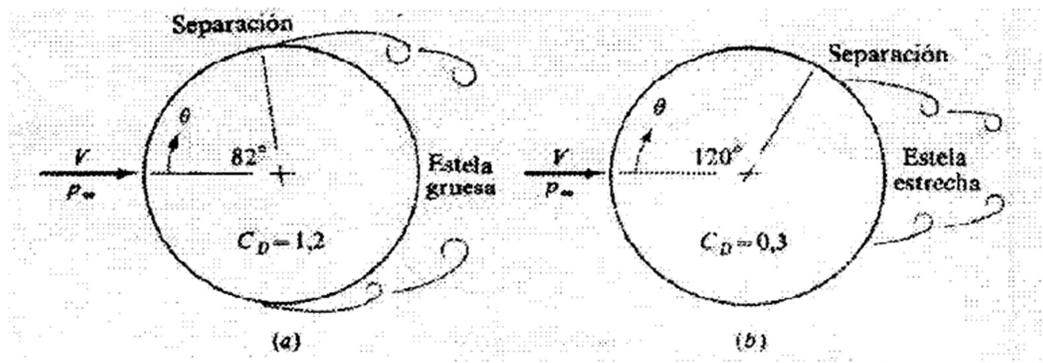


Fig n° 46: Imagen esquemática de la acción del viento sobre un cilindro

Si se observa la figura anterior, en el borde de ataque del cilindro se forma un punto de estancamiento. **A cada lado del punto de estancamiento el fluido se acelera alrededor de la superficie frontal del cilindro, produciendo una caída de la presión. Se forma una delgada capa límite adyacente a la superficie del cilindro.** Los efectos directos de la viscosidad del fluido solo se evidencian dentro de la capa límite.

El número de Reynolds define la dependencia del tipo de flujo:

4 < Re < 60: Empieza a desprenderse la corriente en la zona posterior y se crea un par de vórtices en la estela (recirculación). La resistencia de presión deja de ser nula

60 < Re < 5.000: Aparecen efectos no estacionarios. Los vórtices se van desprendiendo alternativamente (de la pared inferior y superior) formando una calle ancha y pulsante, llamada calle de torbellinos de Von Karman).

5.000 < Re < 350.000 La estela se hace turbulenta. La resistencia se debe principalmente al efecto de los torbellinos turbulentos. Hasta aquí el régimen es Sub Crítico.

Re > 350.000 (caso de aerogeneradores): se produce una caída de resistencia debido a que la capa límite pasa a ser turbulenta, lo que hace que el punto de separación se desplace (120° vs 82° para el caso laminar). Se reduce el espesor de la estela, aumenta la presión en la parte superior y baja la resistencia de presión C_p . Régimen Supercrítico.

La anterior descripción se resume en la siguiente gráfica:

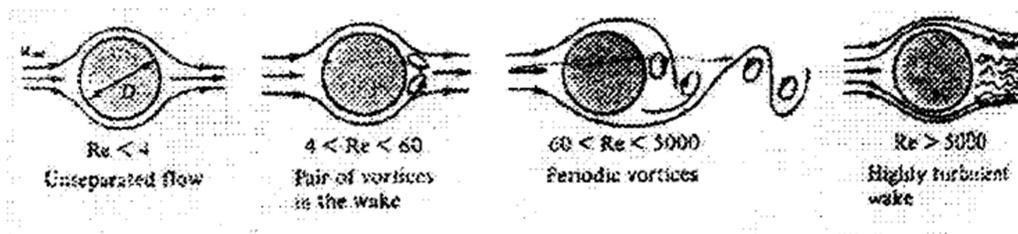


Fig n° 47: Imagen de Número de Reynolds para diferentes flujos

6.1.3 Acción estática del Viento. Presión ejercida por el viento:

Considerando la ecuación de la energía de Bernoulli, para una misma altura, la presión se obtiene de igualar la energía cinética con la energía piezométrica:

$$E_c = m * \frac{V^2}{2} = E_p = m * \frac{P}{\rho}$$

Siendo

- ρ : densidad del aire = $\frac{\gamma}{g} = 0,125 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^3$
- m: masa del aire en movimiento
- V: velocidad
- P: presión

De lo cual se deduce:

$$P = \frac{V^2}{16}$$

La velocidad es la máxima instantánea para un período de 20 años de registro.

La velocidad tiene una probabilidad de recurrencia de 2% de ser excedida en 50 años según la norma americana ACI.

El período promedio de medición es de 10 minutos.

6.1.4 Variación de la velocidad del viento V (z):

Viene dada por la ley de Hellmann

$$V(z) = Vh * \left(\frac{z}{h}\right)^\alpha$$

Vh: velocidad medida a la altura h

α : Factor de rugosidad

6.1.5 Variación de la presión del viento con la altura:

De las relaciones anteriores:

$$P(z)/P(h) = [V(z)/V(h)]^2 = (z/h)^{2\alpha}$$

Luego:

$$P(z) = P(h) * (z/h)^{2\alpha}$$

Lugares llanos con hielo o hierba	$\alpha = 0,08 + 0,12$
Lugares llanos (mar, costa)	$\alpha = 0,14$
Terrenos poco accidentados	$\alpha = 0,13 + 0,16$
Zonas rústicas	$\alpha = 0,2$
Terrenos accidentados o bosques	$\alpha = 0,2 + 0,26$
Terrenos muy accidentados y ciudades	$\alpha = 0,25 + 0,4$

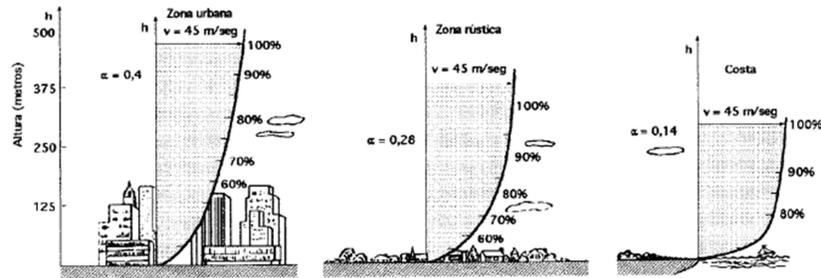


Fig 1.11.- Variación de la velocidad del viento (capa límite) con la altura sobre el terreno, según la ley exponencial de Hellmann

Fig n° 48: Imagen esquemática de la variación de la velocidad del viento con la rugosidad

6.1.6 Aumento brusco de la velocidad del viento: Efecto de Ráfagas de viento - Según el CIRSOC 102

El efecto de ráfaga tiene en cuenta los efectos de carga en la dirección del viento debidos a la interacción estructura- turbulencia del viento. También tiene en cuenta los efectos de carga en la dirección del viento debidos a la amplificación dinámica en edificios y estructuras flexibles. No incluye efectos de cargas transversales a la dirección del viento, desprendimientos de vórtices, inestabilidad debida a galope o flameo, o efectos dinámicos torsionales. Para estructuras susceptibles a efectos de carga que no se tienen en cuenta en el factor de ráfaga, se debe obtener información de la bibliografía reconocida [C-60 a C- 65 del CIRSOC 102] o de ensayos en túneles de viento.

Respuesta al viento longitudinal. En base a la definición precedente del factor de efecto de ráfaga, se pueden hacer predicciones de respuesta en la dirección del viento, por ej. Máximo desplazamiento, valor cuadrático medio y pico de la aceleración. Estas componentes de la respuesta son necesarias para los estados límites de supervivencia y servicio. A continuación, se dan las expresiones para evaluar estas componentes de la respuesta en la dirección del viento.

Desplazamiento máximo en la dirección del viento. El desplazamiento máximo en la dirección del viento $X_{\text{máx.}}(z)$ como una función de la altura por encima de la superficie del terreno está dado por:

$$X_{\text{max}}(z) = \frac{\varphi(z) * \rho * B * h * C_{fx} * V^2 z *}{2 m_1 * (2\pi n_1)} KG$$

Siendo:

$\Phi(z)$: la forma del modo fundamental: $(z/h)^\epsilon$;

ϵ : exponente del modo;

ρ : la densidad del aire;

C_{fx} : el coeficiente de fuerza medio en dirección del viento;

m_1 : la masa modal $= \int_0^h \mu(z)\varphi^2(z) dz$

$\mu(z)$: la masa por unidad de altura;

$$K = (1,65)^\alpha / [\alpha + \xi + 1]$$

V_z : es la velocidad de ráfaga de 3 segundos a la altura z . Esta puede evaluarse mediante:

$$V_z = b \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha V$$

Siendo: V : velocidad de ráfaga de 3 s en exposición C a la altura de referencia (obtenida de la FIG. 1 CIRSOC); b y α están dados en la Tabla 4.

Valor cuadrático medio de la aceleración en la dirección del viento. El valor cuadrático medio de la aceleración en la dirección del viento $\sigma_{\ddot{X}}(z)$ como una función de la altura sobre la superficie del terreno está dada por:

$$\sigma_{\ddot{X}}(z) = \frac{(0,85 * \Phi(z) * \rho * B * h * C_{fx} * V_z^2)}{m_1} * I_z - KR$$

Donde V_z es la velocidad media horaria del viento a la altura z , **m/s**.

$$V_z = b \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha V$$

Donde b y α están definidos en la Tabla 4.

Aceleración máxima en la dirección del viento. La aceleración máxima en dirección del viento es una función de la altura sobre la superficie del terreno dado por

$$\ddot{X}_{\max}(z) = g_{\ddot{X}} * \sigma_{\ddot{X}}(z)$$

$$g_{\ddot{X}} = \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(n1T)}} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(n1T)}}$$

Donde T = intervalo de tiempo sobre el cual se computa la aceleración máxima, tomado usualmente como 3.600 s para representar 1 hora.

Efecto de Ráfaga. Según la Norma Americana ACI:

$$G = 0,9 * \left[\frac{1+7*I_z*Q}{1} + 7 * I_z \right]$$

Para: $T < 1$ s

$$G = \left[\frac{1+7*Iz*(Q^2+R^2)}{(1+7*Iz)} \right]$$

Para: $T > 1$ s

La definición conceptual del factor de ráfaga es:

Si el desplazamiento máximo del cilindro es:

$$X_{max} = X_1 + X_{max}(z)$$

Siendo:

X_1 : desplazamiento medio debido a la velocidad media del viento

$X_{máx.}(z)$: desplazamiento fluctuante máximo debido a la turbulencia.

Luego se define el factor de ráfaga como:

$$G(z) = 1 + X_1 / X_{máx.}$$

Conclusión: la contribución de los modos superiores respecto del primero a la respuesta se considera despreciable. Luego: **$G(z) = \text{constante}$** .

6.2 Especificaciones del Reglamento Argentino

CIRSOC 102 – de acción del viento sobre estructuras

3.2.1 Las disposiciones del Reglamento que permiten determinar las cargas de viento en edificios y otras estructuras, mediante:

1. Método simplificado
2. **Método analítico**
3. **Procedimiento del Túnel de Viento**

Condicionantes:

1. Método simplificado. Para edificios de alturas menores a 10 m y pendientes menores a 10°.
2. Método analítico. Se aplica a edificio de gran altura.
3. Túnel de Viento. Para aquellas situaciones donde el procedimiento analítico se considera incierto o inadecuado, o donde se desean presiones de viento más exactas, se debe considerar el ensayo en túnel de viento.

3.2.2 **Presión dinámica:**

$$qz = 0,613 * Kz * Kzt * Kd * V^2 * I$$

Siendo:

qz : presión dinámica efectiva, usada para calcular la presión del viento sobre la estructura a cualquier altura z sobre el terreno.

Kz : coeficiente de exposición a la presión dinámica que refleja el cambio de velocidad del viento con la altura y la rugosidad del terreno, según tabla 5.

Kzt : factor topográfico que contempla la aceleración del viento con las colinas o escarpas, según Figura 2 y $kzt = (1 + k1 k2 k3)$

Kd : factor de direccionalidad del viento, dado en Tabla 6.

V : velocidad básica del viento, que es la velocidad de ráfaga de 3 s a 10 m de altura sobre el nivel del terreno para categoría de exposición C y está asociada a una probabilidad anual de 0,02 (intervalo de recurrencia medio de 50 años) dada en la Figura 1.

I : el factor de importancia, que ajusta la velocidad del viento asociada con una probabilidad anual de 0,02 (intervalo medio de recurrencia de 50 años), con otras probabilidades, según Tabla 1.

6.2.2 Consideraciones de diseño para el método analítico

(CIRSOC 102 Capítulo 2 – página 2)

Definiciones:

Edificios y otras estructuras flexibles: Un edificio u otra estructura se considera flexible si exhibe una significativa respuesta resonante dinámica. La respuesta resonante depende de la estructura de la ráfaga del viento incidente, de las presiones generadas por el flujo de viento en el edificio, y de las propiedades dinámicas del edificio o estructura. La energía de la ráfaga en el viento es menor para frecuencias mayores de alrededor de 1 Hz. Por lo tanto, las respuestas resonantes de la mayoría de los edificios y estructuras con su menor frecuencia natural por encima de 1 Hz serán lo suficientemente pequeñas como para que, casi siempre, tal respuesta puede ser ignorada. Si los edificios y otras estructuras presentaran una altura que excede cuatro veces la menor dimensión horizontal o cuando hay razones para pensar que la frecuencia natural es menor que 1 Hz (período natural mayor que 1 s), se debe investigar su frecuencia natural. Para el cálculo de la frecuencia natural o el período de distintos tipos de edificios se puede consultar el Anexo III de este Reglamento.

Edificios y otras estructuras de forma regular: La definición de los límites de aplicación de los procedimientos analíticos contenidos en este Reglamento es un proceso dificultoso que requiere un equilibrio entre la necesidad práctica de usar las disposiciones más allá del rango para el cual fueron obtenidos los datos y restringir su uso más allá del rango realista de aplicación. Las disposiciones sobre cargas de viento están basadas principalmente en ensayos en túnel de viento sobre formas que muestran las Figuras 3 a 8. Ensayos exhaustivos realizados en túnel de viento sobre reales en proyecto, muestran que

algunos cambios relativamente grandes de estas formas pueden, en muchos casos, generar cambios menores en la carga de viento, mientras que en otros casos cambios aparentemente pequeños pueden tener efectos relativamente grandes, especialmente en presiones sobre revestimientos. Las cargas de viento sobre formas complicadas son frecuentemente menores que aquellas sobre las formas más simples de las Figuras 3 a 8, de modo que las cargas de viento que se determinan desde estas disposiciones, envuelven razonablemente la mayor parte de las formas estructurales. **Los edificios que son claramente inusuales se diseñaran siguiendo las disposiciones del Capítulo 6 para ensayos en túnel de viento.**

Capítulo 6 (CIRSOC-102). Procedimiento del túnel de Viento

Se recomiendan los ensayos en túnel de viento cuando el edificio u otra estructura en consideración satisfacen una o más de las siguientes condiciones:

1. **Tiene una forma que difiere significativamente de una forma de “caja” o prisma rectangular uniforme**
2. Es flexible con frecuencias naturales por debajo de 1 Hz
3. Está sujeto a golpeteo en la estela de los edificios u otras estructuras resistentes en la dirección desde la cual sopla el viento, o
4. Está sujeto a flujo acelerado causado por acanalamiento o por características topográficas locales.

Es una práctica común recurrir a ensayos en túnel de viento cuando es necesario obtener datos de diseño para las siguientes cargas inducidas por el viento:

1. Presiones sobre muros cortina resultante de su geometría irregular,
2. Cargas transversales al viento y/o torsionales significativas,
3. Cargas periódicas causadas por desprendimiento de vórtices, y
4. Cargas resultantes de inestabilidades tales como el flameo o galope.

Conclusión: por la condición 1, y dado que la forma de la estructura del aerogenerador difiere de la forma de “caja”, es considerada de forma irregular, se debe realizar un ensayo en túnel de viento para conocer el comportamiento real de la estructura y las cargas que la solicitan.

Observación: Los fabricantes de las torres eólicas, simulan la estructura ante todos los posibles estados de carga. Luego son ellos quienes proveen las cargas que solicitan cada modelo de Aerogenerador.

7. Estudio de la fundación del aerogenerador: *Diseño, Cálculo y Verificación de la Fundación*

7.1 Disposición en planta: geometría y armado

Es importante definir la geometría y las dimensiones de la base en contacto con el suelo, para asegurar su estabilidad global y la resistencia del suelo ante las cargas que se le transmiten.

La geometría que mejor se adapta a los cambios de dirección del viento que solicitan a un aerogenerador, es la circular.

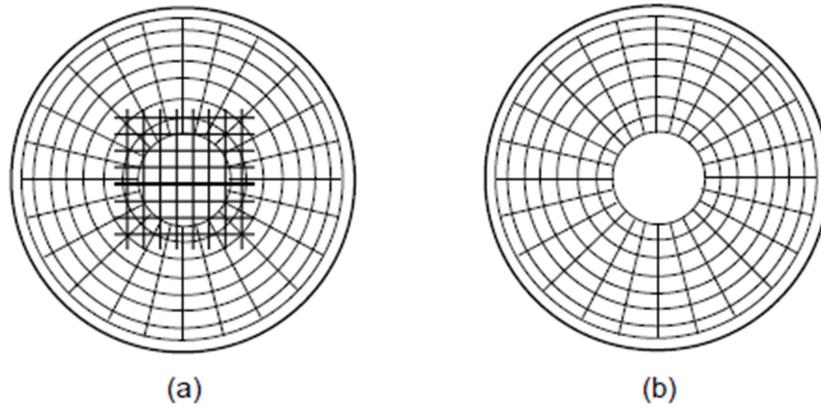


Fig n° 49: Imagen : Armado superior (a) e inferior (b) de una base Circular armada radial-circunferencialmente

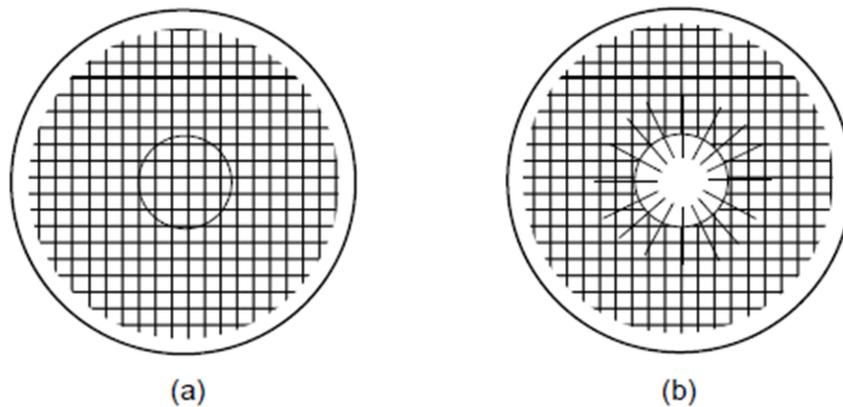


Fig n° 50: Imagen: Armado inferior (a) e superior (b) de una base Circular armada ortogonalmente

Las bases de sección circular permiten absorber mejor el cambio de dirección de los esfuerzos transmitidos por los molinos eólicos, pero son más complicadas a la hora de armar y encofrarlas.

La armadura se coloca usualmente de forma radial y circunferencial, pero se presenta una simplificación cuando se la arma ortogonalmente. La forma octogonal conlleva una mayor cantidad de armadura.

Otras formas de geometría pueden ser la cuadrada o la octogonal:

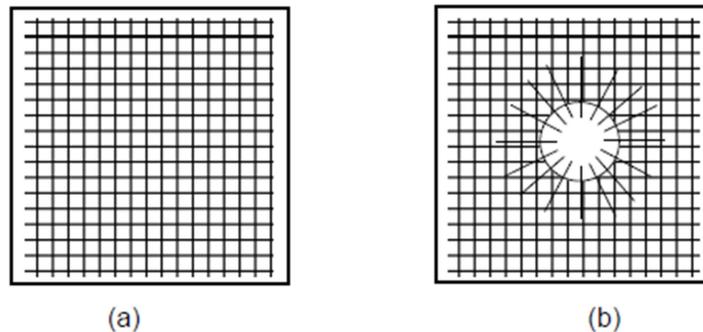


Fig n° 51: Imagen: Armado inferior (a) y superior (B) de una base Cuadrada

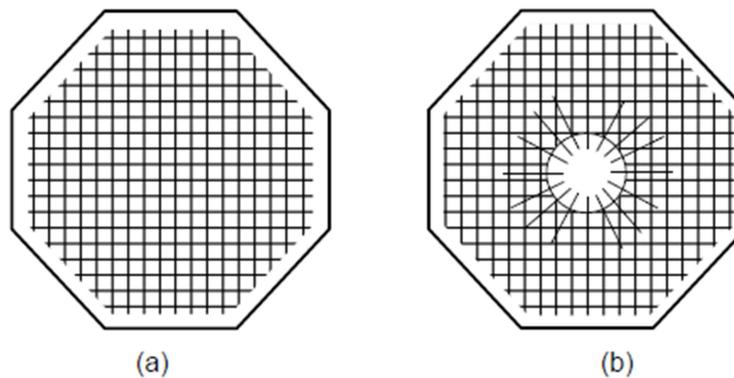


Fig n° 52: Imagen: Armado inferior (a) y superior (B) de una base Octogonal

Las cuadradas son más sencillas de encofrar y tienen sus armaduras dispuestas en dos direcciones ortogonales. Sin embargo su uso se desaconseja porque genera altas concentraciones en las esquinas, y por no poseer un adecuado comportamiento ante el cambio de la dirección de la fuerza del viento.

Las bases de encofrado octogonal son una alternativa a la base circular ya que presentan un armado y encofrado de mayor simplicidad.

7.2 Disposición de la sección transversal - Unión metálica

La sección transversal de una base de aerogenerador puede ser constante o variable. Las secciones de altura variable permiten optimizar la rigidez de la base con una altura mayor en la zona que rodea al fuste, colaborando de este modo con la resistencia al corte y al punzonado.

El espesor y la forma transversal de la base dependen del medio de unión entre la base y el aerogenerador. Existen tres uniones:

- 1) **Inserto anular embebido:** consiste en un anillo metálico de una pieza que debe ser colocada y nivelada previamente al hormigonado de la base. El anillo cuenta con una brida inferior y otra superior, y un mecanismo de ajuste para su nivelación con una desviación máxima permitida respecto del plano horizontal del orden de ± 4 mm. La brida superior es la que vincula la torre con la base, y mediante la inferior se transmiten los esfuerzos de flexión, corte y punzonado de la torre a la base. Entre las bridas existe una serie de orificios por los que se deja pasar la armadura superior de la base. (1)).
- 2) **Adaptador de acero con pernos a presión:** es un adaptador cilíndrico compuesto por una serie de pernos fijados a una brida inferior. En algunos casos la brida se coloca por encima de la armadura y en otros por debajo. Es común observar un incremento en la zona central de la base, por debajo del adaptador (2)).
- 3) **Adaptador de acero con pernos a presión con pedestal:** consiste en una serie de pernos de anclaje con una brida inferior con un pedestal con una altura superior a la de las anteriores (3)).

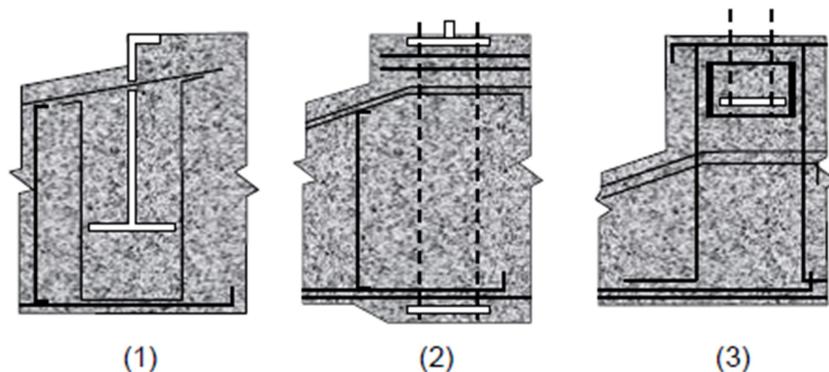


Fig n° 53: Imágenes de las diferentes uniones metálicas: (1) Inserto anular embebido; (2) Adaptador de acero con pernos a presión; (3) Adaptador de acero con pernos a presión con pedestal

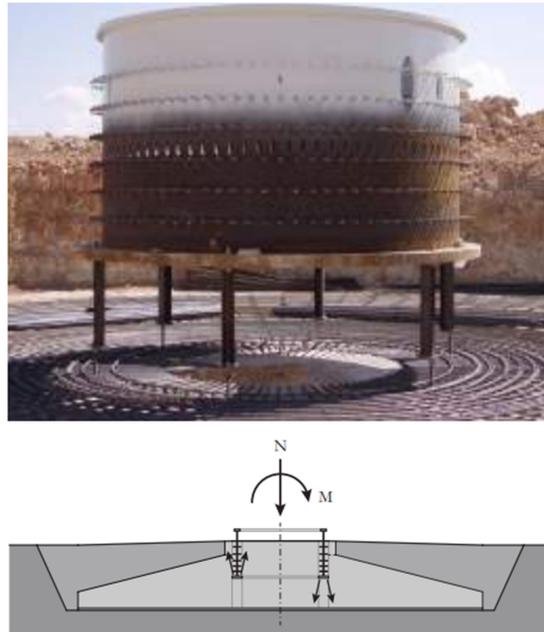


Fig n° 54: Imagen de Inserto Anular metálico antes de hormigonar. Esquema de cargas

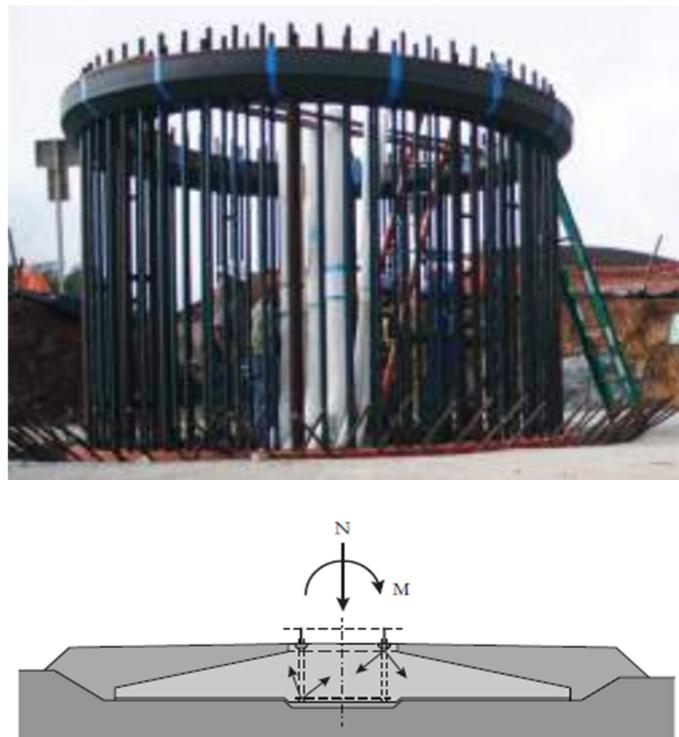


Fig n° 55: Imagen de anillo adaptador de acero vinculado con el anillo inferior por jaula de pernos. Esquema de cargas

7.3 Cálculos y verificaciones de la base

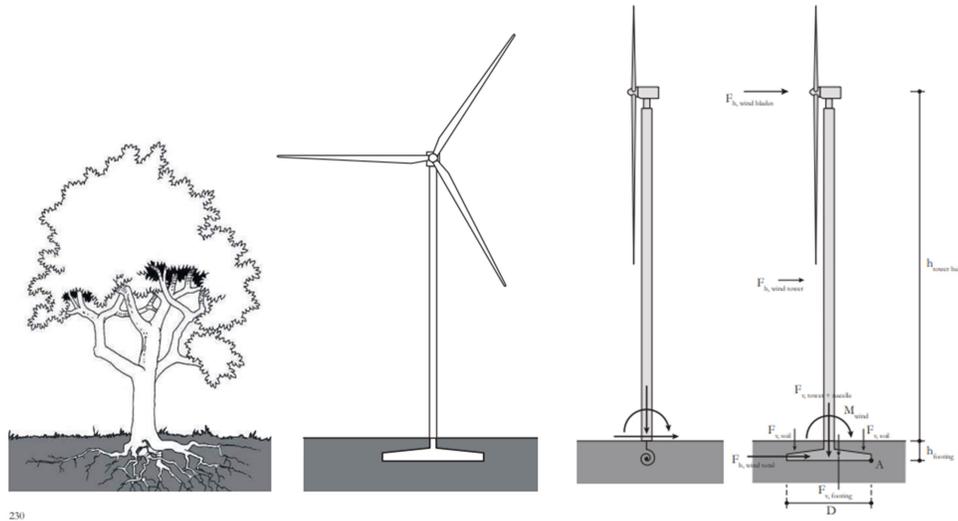


Fig n° 56: Imagen comparativa del árbol y el aerogenerador. Esquema de cargas sobre la cimentación

7.3 Cálculos y Verificaciones de la Base en Estado de Servicio

7.3.1 Verificación de la Tensión admisible del suelo

Para verificar la tensión que resiste el suelo, se debe asegurar que la carga que transmite la base mediante la superficie de apoyo, afectada por un coeficiente de seguridad, sea menor que la tensión admisible del suelo:

$$\frac{\text{Peso total de descarga}}{\text{Superficie efectiva de apoyo}} < \text{Tensión admisible del suelo}$$

La base de los aerogeneradores se encuentra sometida a fuertes momentos flectores, lo que origina diagramas triangulares de presiones, desaprovechando la superficie de apoyo sobre el suelo.

Excentricidad = momento volcador / peso de descarga

Si la excentricidad es menor a 1/6 del diámetro de la base, toda la superficie de apoyo estará comprimida. A medida que aumenta dicho valor el área de transferencia de carga disminuye, es decir, parte de la superficie de apoyo se despegará del suelo y no transmitirá carga.

Para una base circular la excentricidad de la carga tanto como la superficie de descarga será igual si se varía la dirección de la carga, es decir, la base se comporta de igual manera.

Para una base circular sometida a una carga excéntrica, la superficie que apoya sobre el suelo generalmente es:

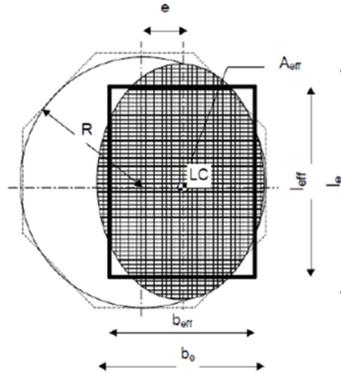


Fig n° 57: Imagen de área efectiva

$$A_{eff} = 2 \left[R^2 \arccos \left(\frac{e}{R} \right) - e \cdot \sqrt{R^2 - e^2} \right]$$

Donde e es la excentricidad de aplicación de la carga medida desde el centro de la base y R es el radio de la circunferencia de la base.

El eje mayor y eje menor de la elipse son:

$$l_{ef} = 2R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{be}{2R}\right)^2}$$

$$b_{ef} = 2(R - e)$$

El área efectiva puede ser representada por un rectángulo equivalente de lados b_{ef} y l_{ef} :

$$A_{eff} = b_{ef} * l_{ef} \quad l_{ef} = \sqrt{A_{eff} * \frac{l_{ef}}{b_{ef}}} \quad b_{ef} = (l_{ef}) / l_{ef} \cdot b_{ef}$$

Si $e < B/6 \Rightarrow$

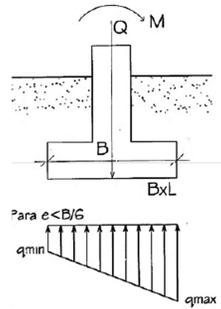


Fig n° 58: Imagen esquemática de tensión del suelo

$$q_{max} = \frac{N}{BL} \left(1 + \frac{6e}{B} \right) \leq q_{adm}$$

$$q_{min} = \frac{N}{BL} \left(1 - \frac{6e}{B} \right) \leq q_{adm}$$

7.3.1.2 Capacidad portante del suelo

Para calcular la resistencia del suelo se utilizaron dos fórmulas para base circular:

Por Terzaghi:

$$Q = 1,3 * C * Nc + q * Nq + 0,3 * \gamma * B * N\gamma$$

Por Brich Hansen:

$$Q = 1,2 * C * Nc * ic * dc * sc + q * Nq * iq * dq * sq + 0,6 * \gamma * B * N\gamma * iy * dy * sy$$

Siendo:

C: cohesión del suelo

Φ : ángulo de fricción del suelo

γ : peso específico del suelo. Puede variar con el nivel freático

i_c, i_q, i_y : factores de inclinación de la carga

s_c, s_q, s_y : factores de forma

d_c, d_q, d_y : factores de profundidad

N_c, N_q, N_γ : factores de capacidad de carga

7.3.2 Verificación de los asentamientos admisibles

La capacidad de carga admisible de las estructuras será la menor de:

$$q_{adm} \begin{cases} q_u/F_s \\ \mathbf{q_{asentamientos adm}} \end{cases}$$

q_u/F_s : capacidad de carga admisible según teoría de capacidad de carga.

$q_{asentamientos adm}$: capacidad de carga del suelo considerando los asentamientos admisibles.

El asentamiento total que puede llegar a desarrollarse en una estructura es:

$$S_{total} = S_i + S_{cp} + S_{cs}$$

Siendo:

S_i : asentamiento elástico o instantáneo

S_{cp} : asentamiento diferido o por Consolidación primaria

S_{cs} : asentamiento diferido o por Consolidación secundaria

El asentamiento puede agruparse en dos grupos: *los instantáneos o elásticos y los por consolidación o diferidos en el tiempo*. El asentamiento inmediato o instantáneo tiene lugar durante o inmediatamente después de la construcción de la estructura. El asentamiento por consolidación ocurre con el tiempo. El agua de poros es expulsada de los espacios vacíos de los suelos arcillosos saturados sumergidos en agua. El asentamiento total es la suma del asentamiento elástico o instantáneo y el secundario o diferido.

El asentamiento por consolidación comprende dos fases: una primaria y otra secundaria. El asentamiento por consolidación secundaria ocurre después de que termina la consolidación primaria, causada por el deslizamiento y la reorientación de las partículas de suelo bajo una carga sostenida. El asentamiento por consolidación primaria es más importante que el asentamiento secundario en arcillas inorgánicas y en suelos limosos. Sin embargo, en suelos orgánicos, el asentamiento por consolidación secundaria es más importante.

7.3.2.1 Incremento del esfuerzo en el suelo

Para conocer los asentamientos es necesario conocer el incremento de la tensión en el suelo. Según la teoría del sólido elástico, Bussinesq propone una relación matemática para conocer cómo influye una carga puntual, aplicada en la superficie, sobre un punto en el interior de un estrato de suelo considerado isótropo, elástico y homogéneo, ubicado en las coordenadas (x,y,z) desde donde se aplica la carga:

$$\Delta\sigma_z = \frac{3P}{2\pi r^2 \left(1 + \frac{r}{z}\right)^{5/2}}$$

Si se evalúa un área circular y uniformemente cargada,

Siendo: $dA = dx \, dy$ $\Rightarrow P = q_0 \, dx \, dy$

$$\Delta\sigma_z = \frac{3(q_0 * dx * dy)}{2\pi r^2 \left(1 + \frac{r}{z}\right)^{5/2}}$$

El incremento total del esfuerzo causado por toda la superficie cargada entonces se obtiene por integración:

$$\Delta\sigma = \int \Delta\sigma = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \int_{r=0}^{r=B/2} \frac{3(q_0 * d\varphi * dr)}{2\pi z^2 * [1 + \frac{r}{z}]^{5/2}} = q_0 * \left\{ 1 - \frac{1}{[1 + (\frac{B}{2z})^2]^{3/2}} \right\}$$

7.3.2.2 Asentamiento elástico o instantáneo basado en la teoría de la elasticidad

$$Se = \int_0^H e_z dz = \frac{1}{Es} \int_0^H (\sigma\Delta\sigma_z - \mu\Delta\sigma_x - \mu\Delta\sigma_y) dz$$

Siendo:

Se: asentamiento elástico

Es: módulo de elasticidad del suelo

H: espesor del estrato de suelo

μ : Relación de Poisson del suelo

$\Delta\sigma_z$; $\Delta\sigma_x$; $\Delta\sigma_y$: incremento del esfuerzo debido a la carga neta aplicada a la cimentación, en las direcciones x, y y z respectivamente.

Para una cimentación perfectamente flexible:

$$Se = q_0 * \alpha * B' * \frac{1 - \mu_s^2}{Es} * I_z * I_f$$

Siendo:

q_0 : presión neta aplicada sobre la cimentación

μ_s : relación de Poisson del suelo

Es: módulo de elasticidad promedio del suelo bajo la cimentación, medido de $z=0$ a $z=4B$

$B'=B/2$ para el centro de la cimentación

$B'=B$ para la esquina de la cimentación

I_z : factor de forma: $f(m = \frac{L}{B}; n = \frac{H}{\frac{B}{2}})$

I_f : factor de profundidad: $f(\frac{Df}{B} \mu_s; y \frac{L}{B})$

α : factor que depende de la posición de la cimentación donde el asentamiento está siendo calculado.

El **asentamiento** puede calcularse **en el centro** de la cimentación:

$$\alpha=4; m'=L/B; n'=H/(B/2)$$

O bien en el **extremo o esquina** como:

$$\alpha=1; m'=L/B; n'=H/B$$

Debido a la naturaleza no homogénea de los estratos de suelos, Bouwles propone calcular el módulo de Elasticidad promedio ponderado:

$$E_s = \frac{\sum E_{si} * \Delta z}{z_t}$$

E_{si}: Modulo de elasticidad del suelo en una profundidad z .

Z_t: H o 5 B la que sea más pequeña.

7.3.2.5 Asentamiento diferido o por consolidación primaria

Se da a lo largo del tiempo en suelos arcillosos saturados cuando son sometidos a una carga creciente causada por la construcción de una cimentación.

$$S_{c(p)} = \int \epsilon_z dz$$

Siendo:

ϵ_z : deformación unitaria vertical

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

Δe : cambio de la relación de vacíos: $f(\sigma'_0; \sigma'_c; \Delta \sigma')$

En función de la presión de pre consolidación, se calculan los asentamientos por consolidación

$$\text{Arcilla Normalmente Consolidada} \quad S_{e(p)} = \frac{C_c H_c}{1 + e_0} * \log \frac{\sigma'_0 + \sigma'_{prom}}{\sigma'_0}$$

$$\text{Arcilla Preconsolidada} \quad S_{e(p)} = \frac{C_s H_c}{1 + e_0} * \log \frac{\sigma'_0 + \sigma'_{prom}}{\sigma'_0}$$

Con: $\sigma'_0 + \sigma'_{prom} < \sigma'_c$

$$\text{Arcilla Preconsolidada} \quad S_{e(p)} = \frac{C_s H_c}{1 + e_0} * \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + \frac{C_c H_c}{1 + e_0} * \log \frac{\sigma'_0 + \sigma'_{prom}}{\sigma'_0}$$

Con: $\sigma'_0 < \sigma'_c \leq \sigma'_0 + \sigma'_{prom}$

Siendo:

σ'_0 : presión efectiva promedio sobre el estrato de arcilla antes de la construcción de la cimentación

σ'_{prom} : presión promedio de la presión efectiva sobre el estrato de arcilla antes de la construcción de la cimentación.

σ'_c : presión de pre consolidación

e₀: relación de vacíos inicial del estrato de arcilla

C_c: índice de compresibilidad

Cs: índice de expansibilidad

Hc: espesor del estrato de arcilla

El incremento de la presión efectiva sobre el estrato de arcilla no es constante con la profundidad, por lo que se calcula un valor promedio entre el valor de arriba, del centro y de abajo del estrato:

$$\sigma'_{prom} = \frac{1}{6} * (\Delta\sigma'_{arriba} + 4 * \Delta\sigma'_{medio} + \Delta\sigma'_{abajo})$$

7.3.2.6 Asentamiento por consolidación secundaria

Al final de la consolidación primaria se observa algún asentamiento debido al ajuste plástico de las partículas del suelo:

$$S_{c(s)} = C'\alpha * H_c * \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$

Siendo:

$$C'\alpha: \text{Índice de compresibilidad secundaria} = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}$$

Δe : Cambio en la relación de vacíos

t_1, t_2 : tiempo

El asentamiento por consolidación secundaria es más importante en el caso de los suelos orgánicos e inorgánicos altamente compresibles. En las arcillas inorgánicas preconsolidada, el índice de compresibilidad secundaria es muy pequeño y de menor importancia práctica.

7.3.2.7 Asentamiento diferencial

Para el caso de una fundación superficial aislada, caso que se corresponde con el de una base circular para un aerogenerador, si los asentamientos totales son uniformes no generan mayores problemas.

El asentamiento que si genera problemas es el diferencial, cuando por ejemplo se apoya la base sobre dos o más estratos que no son suficientemente homogéneos. Se generan desplazamientos de diferente valor en diferentes partes de la base. La base gira. El giro que genera este desplazamiento diferencial genera un desplazamiento de la torre, y un momento permanente que puede dejar fuera de servicio la estructura.

Para el caso de las torres eólicas se suele limitar dicho asentamiento. Algunos fabricantes proponen 3 mm por cada metro.

Generalmente si el suelo no es apto se debe mejorarlo, logrando condiciones suficientemente homogéneas y de resistencia, que eviten cualquier desplazamiento diferencial permanente, y le otorguen al suelo las rigideces vertical, horizontal, al vuelco y a la torsión necesarias. Para ello se proponen soluciones tales como sustitución del suelo de bajas condiciones por otro de mejor calidad; compactación del suelo superficial; o rellenar el suelo con inyecciones de suelo cemento, mediante técnicas tipo Jet Grouting.

Los asentamientos en la base pueden aproximarse usando las ecuaciones que responden a la teoría del sólido elástico. Para conocer con más exactitud como son los asentamientos del suelo por debajo de la fundación de un aerogenerador, es decir, la interacción del suelo estructura, es preciso aplicar un método matemático más preciso, como el Método de los Elementos Finitos.

7.3.3 Verificación al vuelco

El esfuerzo de volcamiento en la base de un aerogenerador es una de las solicitaciones más relevantes para la seguridad global de la estructura. Para evaluar el mismo es necesario conocer:

- a- **Dimensiones de la base y del fuste:** altura inferior: h_1 ; altura: h ; altura del fuste: hf ; altura total: $ht = h + hf$; Diámetro de la base: D ; diámetro del fuste: c ;
- b- **Solicitaciones:** fuerza normal (peso total de la superestructura): F_n ; peso de la base: P_b ; peso del suelo por encima de la base: P_s ; fuerza horizontal (fuerza del viento): F_v ; Momento flector en servicio transmitido por el molino: M_f .
- c- **Suelo:** Volumen: V_s ; Peso Específico del suelo: γ_s ;
- d- **Base:** Volumen: V_b ; Peso Específico del hormigón: γ_c .

Para verificar al volcamiento se debe considerar el momento volcador, como:

$$M_v = M_f + F_v * ht$$

Factor de seguridad al vuelco:
$$FSV = \frac{(F_n + P_b + P_s) * R}{M_v}$$

Donde R es el radio de la base: $R = D/2$.

Para el cálculo del peso propio del suelo y de la base (P_b y P_s) pueden usarse las siguientes expresiones para una base circular de sección variable:

$$\text{Peso de la base: } P_b = \gamma_c * \left[\frac{\pi c^2}{4} (ht) + \frac{\pi(D^2 - c^2)}{4} h_1 + \frac{\pi(D^2 - c^2)}{4} (ht + h_1) \right]$$

$$\text{Peso del suelo: } P_s = \gamma_s * \left[\frac{\pi(D^2 - c^2)}{4} hf + \frac{\pi(D^2 - c^2)}{4} \frac{(h - h_1)}{2} \right]$$

7.3.4. Verificación al deslizamiento

Factor de seguridad al deslizamiento:
$$FSD = \frac{(F_n + P_b + P_s) * Tg\left(\frac{2}{3} \varphi\right)}{F_v}$$

Siendo ϕ el ángulo de fricción interna del suelo en contacto con la superficie de apoyo de la fundación.

Además se debe verificar para fundaciones solicitadas a cargas horizontales, deben verificar bajo condiciones drenadas:

$$F_x < A_{eff} \cdot c + F_x \operatorname{tg} \varphi$$

Siendo c la cohesión del suelo en condiciones drenadas. Y para condiciones no drenadas, se debe verificar:

$$F_x < A_{eff} \cdot C_{ud}$$

Siendo C_{ud} la cohesión no drenada.

Además, se debe cumplir que:

$$\frac{F_x}{F_z} < 4$$

7.3.5. Verificación a Fisuración

El control de la fisuración se verifica en estado de cargas operacionales.

Según la referencia consultada, es posible limitar el ancho de fisuración según la siguiente condición:

$$w = 5.10^{-5} \cdot \sigma_s \sqrt{aw}$$

Siendo:

$$aw = \frac{A_{cef}}{\Sigma dw}$$

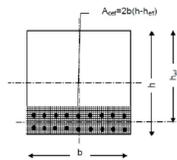


Fig n° 59: esquema de área trabajando a tracción.

El valor de la fisuración se limita. Según GL:

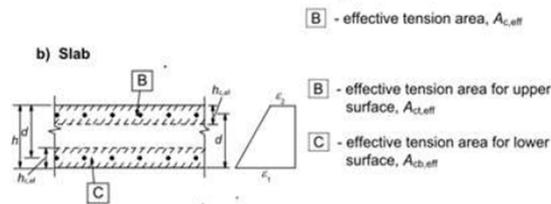


Fig n° 60: esquema de cara superior e inferior

Ancho de Fisura límite para ϵ_2 , en la cara superior: $w < 0,20$ mm

Ancho de Fisura límite para ϵ_1 , en la cara inferior: $w < 0,30$ mm

7.3.6 Verificación a Fatiga de los materiales: Acero y Hormigón

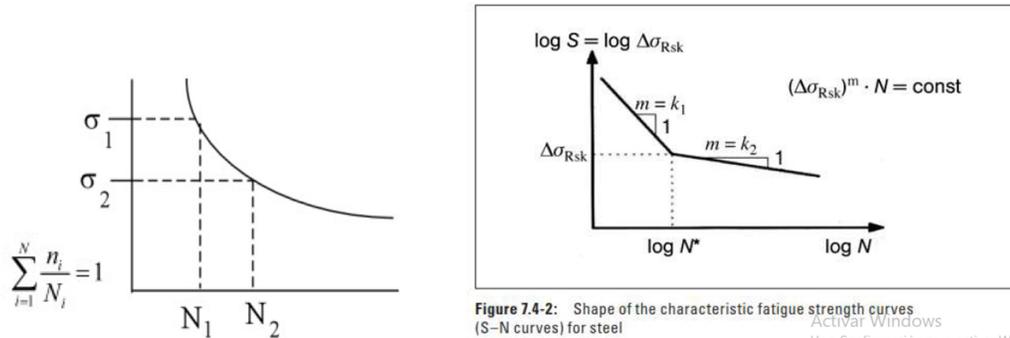


Fig n° 61: esquema de carga de material. Obtención de resistencia característica

La fatiga se obtiene ensayando el acero. Se analizan ciclos de carga y descarga, obteniendo una resistencia a la fatiga característica: σ_{kRsk} (figura 2)

Una manera de controlar el esfuerzo a la fatiga es controlar el rango de esfuerzos que llevan a la tensión de rotura. Para ello se somete la estructura a ciclos repetidos de carga máxima y mínima. Se calcula el momento máximo y el mínimo, así como la tensión máxima y mínima que los originan. Se calculan los rangos en que ocurren estos esfuerzos, y los números de ciclos que corresponden a estos rangos de esfuerzos. Se arma con estos datos un espectro de diseño:

B Rain flow Spectrum

This appendix contains the rain flow spectrum for the bending moment and the shear force in the bottom of the tower

Foundation Fatigue Load Spectrum			
Tower shear, bottom F_y [kN]		Tower bending, bottom M_x [kNm]	
Range	Frequency	Range	Frequency
8.2189E+02	1.0000E+00	6.2194E+04	1.0000E+00
8.0545E+02	0.0000E+00	6.0950E+04	1.0000E+01
7.8901E+02	1.0000E+01	5.9706E+04	0.0000E+00
7.7257E+02	1.1000E+01	5.8462E+04	1.0000E+00
7.5614E+02	8.5000E+00	5.7218E+04	5.0000E-01
7.3970E+02	2.2000E+01	5.5974E+04	9.5000E+00
7.2326E+02	9.6500E+01	5.4730E+04	8.2500E+01
7.0682E+02	1.0450E+02	5.3487E+04	8.0000E+01

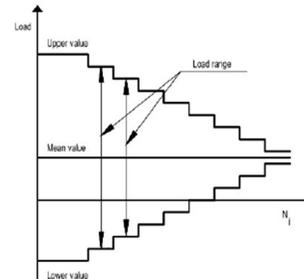


Fig n° 62: Matriz de espectro de carga a fatiga

De este modo se calcula la carga máxima para todos los estados posibles de combinación de cargas: max; y se verifica:

$$\gamma_1 * \sigma_{max} \leq \sigma_{kRsk} / \gamma_2$$

Siendo:

$\gamma_1 > 1$: factor de mayoración de carga; $\gamma_2 > 1$: factor de minoración de la resistencia.

7.3.7 Verificación de la Rigidez Rotacional de la Fundación

Para un suelo de estratos considerablemente homogéneo, se calcula el módulo de corte dinámico G_R , que represente el comportamiento ante cargas dinámicas del volumen de suelo. La rigidez del suelo ante cargas verticales, horizontales, de vuelco, y de torsión (en caso de existir un estrato rocoso) se calcula en función de este parámetro. Entonces la llamada rigidez rotacional de la fundación debe ser determinada mediante las formulas siguientes

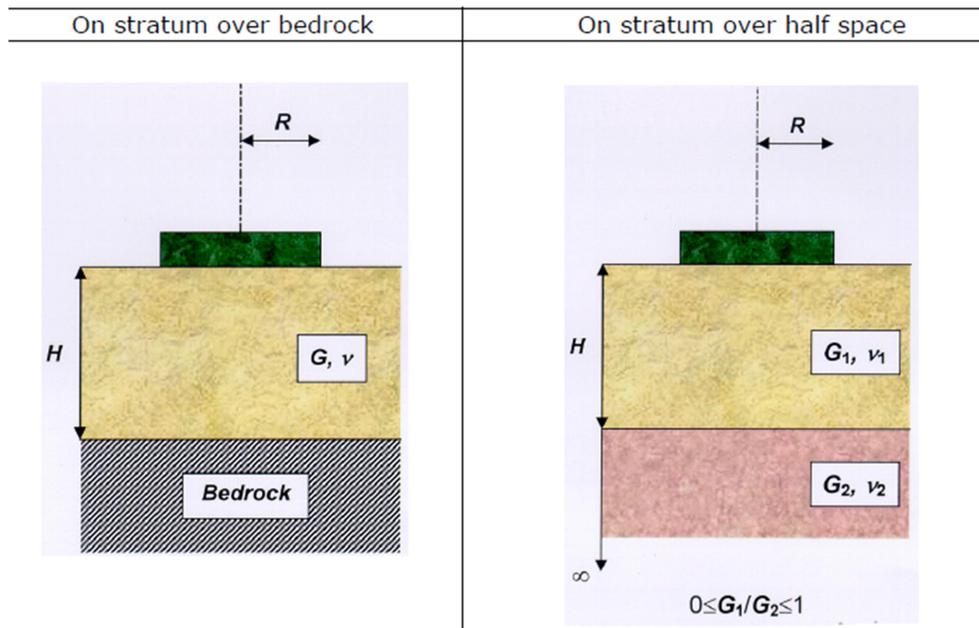


Fig n° 63: Imagen de los parámetros a calcular para verificar la rigidez rotacional de la fundación

Mode of motion	Foundation stiffness	Foundation stiffness
Vertical	$K_v = \frac{4GR}{1-\nu} \left(1 + 1.28 \frac{R}{H}\right)$	$K_v = \frac{4G_1 R}{1-\nu_1} \frac{1 + 1.28 \frac{R}{H}}{1 + 1.28 \frac{R}{H} \frac{G_1}{G_2}}; 1 \leq H/R \leq 5$
Horizontal	$K_H = \frac{8GR}{2-\nu} \left(1 + \frac{R}{2H}\right)$	$K_H = \frac{8G_1 R}{2-\nu_1} \frac{1 + \frac{R}{2H}}{1 + \frac{R}{2H} \frac{G_1}{G_2}}; 1 \leq H/R \leq 4$
Rocking	$K_r = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)} \left(1 + \frac{R}{6H}\right)$	$K_r = \frac{8G_1 R^3}{3(1-\nu_1)} \frac{1 + \frac{R}{6H}}{1 + \frac{R}{6H} \frac{G_1}{G_2}}; 0.75 \leq H/R \leq 2$
Torsion	$K_t = \frac{16GR^3}{3}$	Not given

Fig n° 64: Fórmulas para el cálculo de las rigideces vertical, horizontal, al balanceo y a torsión

K_v : rigidez ante esfuerzos verticales; K_H : rigidez ante esfuerzos horizontales; K_r : rigidez ante el efecto de balanceo generado por las cargas dinámicas del viento; K_t : rigidez ante el efecto de torsión, en el caso de existir un estrato rocoso.

Las rigideces calculadas de este modo son representativas de la rigidez estructural que debe verificar una estructura sometida a cargas dinámicas de viento según la Norma DNVGL-ST 126.

7.4 Cálculos y Verificaciones de la Base en Estado Último

5.4.1 Cálculo por Punzonado

Según el CIRSOC 201/05:

$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_u < \phi V_n$$

Siendo:

V_c = resistencia a corte aportada por el hormigón

V_s = resistencia al corte aportada por el acero

Es usual el armado con barras de armadura para absorber el punzonado como consecuencia de los valores de los esfuerzos transmitidos y de los propios generados. Bajo esta condición la altura útil d a reemplazar en las ecuaciones anteriores corresponde a la distancia existente entre la brida inferior de ancho t del inserto metálico o de la jaula de pernos de radio R anillo y la armadura colocada para tomar los esfuerzos de flexión.

$$\tau_u \frac{max}{min} = \frac{1,6 * Fn}{2 \pi Ranillo * t} + \frac{1,6 * Mf}{\pi Ranillo^2 * t}$$

$$V_u max, min = \tau_u * 2 \pi * Ranillo * t$$

Para tomar el esfuerzo de punzonado se pueden usar barras en forma de horquillas o estribos de múltiples ramas. La armadura de corte y punzonado debe estar vinculada a la armadura longitudinal tanto en la parte superior como en la inferior. Los estribos deben estar debidamente anclados.

Al área de la armadura de corte por punzonado se calcula:

$$Av = \frac{Vs S}{fy d}$$

Donde s es la separación entre dos líneas consecutivas de horquillas o estribos. La primera línea alrededor del fuste se debe colocar una distancia no mayor a d/2 medida a partir de la cara del fuste. La separación de las líneas sucesivas debe ser d/2, hasta que se verifique:

$$Vu < \varphi \frac{1}{6} \sqrt{f'c} * b * d$$

Cuando se utiliza armadura de corte, la resistencia proporcionada por el hormigón Vc , no debe ser mayor que $Vc < \frac{1}{6} \sqrt{f'c} * b_o * d$, y la resistencia nominal al corte está limitada por $Vn < \frac{1}{2} \sqrt{f'c} * b_o * d$

7.4.2 Verificación al Corte

Es habitual que luego de la armadura de punzonado adyacente al núcleo de la base, se prosiga con el armado para el corte. Tal disposición dependerá de la altura de la base (rigidez) para cuando sea variable con el diámetro. Las piezas sometidas corte deben verificar la siguiente expresión:

$$Vu < \varphi Vn = \varphi (Vc + Vs)$$

Vu = resistencia requerida calculada con cargas mayoradas

Vn = resistencia nominal de cada sección

$\phi = 0,75$ (para corte): coeficiente de reducción de resistencia, que depende del tipo de rotura.

V_c = resistencia al corte aportada por el hormigón. Considerando espesor constante:

$$V_c < \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} * bw * d$$

$$\text{con } \sqrt{f'_c} \leq 8,3 \text{ MPa}$$

V_s = es la resistencia a corte aportada por el acero:

$$V_s = \frac{A_s * f_y * d}{s}$$

El esfuerzo absorbido por la armadura debe estar limitado por la expresión:

$$V_s < \frac{2}{3} \sqrt{f'_c} * bw * d$$

Para evitar la rotura de las bielas comprimidas del hormigón.

La separación máxima de los estribos es:

$$\text{Si } V_s < \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} * bw * d \quad \text{Entonces } s \geq \begin{cases} d/2 \\ 40 \text{ cm} \end{cases}$$

$$\text{Si } V_s > \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} * bw * d \quad \text{Entonces } s \geq \begin{cases} d/4 \\ 20 \text{ cm} \end{cases}$$

La cuantía mínima de estribos resulta de las dos siguientes ecuaciones:

$$\frac{A_v}{s} \geq \frac{1}{16} \sqrt{f'_c} \frac{bw}{f_y}$$

$$\frac{A_v}{s} \geq 0,33 \frac{bw}{f_y}$$

7.4.3 Verificación a Flexión

La flexión en una base para aerogeneradores debe analizarse tanto para la superficie inferior como para la superior. El armado de la cara inferior de la fundación se obtiene a partir del momento flector último generado por el diagrama de presiones y la acción estabilizadora minorada del peso propio de la base y del suelo que está por sobre ella.

Para el caso de secciones variables es posible optimizar el consumo de acero considerando las distintas secciones de cálculo, con variación de la altura útil d y de los esfuerzos de cálculo.

El armado de la porción superior de la base toma en cuenta la separación del suelo a causa de la excentricidad que se presenta por el momento externo. Debido a esa separación, el peso propio del hormigón y del suelo por encima de la base, genera un momento flector último que tracciona la porción superior de este voladizo.

El cálculo a flexión según CIRSOC 201/05 puede ser desarrollado mediante las siguientes expresiones, en las cuales y para bases de altura variable, debe analizarse el valor dado al ancho bw y la altura útil d :

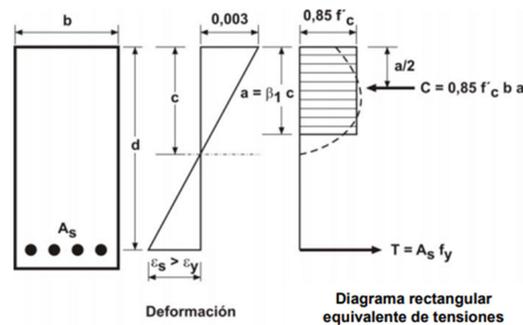


Figura 10.2.7.1. Distribución rectangular equivalente de tensiones en el hormigón.

Fig n° 65: Corte esquemático de la distribución de tensiones en el hormigón sometido a flexión

$$M_u \leq \varphi M_n$$

$$M_n = T * \xi = C * \xi$$

$$\xi = \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$T = A_s * F_y$$

$$C = 0,85 f'c * a * bw$$

$\varphi = 0,90$: para secciones controladas por tracción

Para verificar la cuantía mínima el artículo 7.12 del Reglamento CIRSOC 201/05 establece un valor de 0,18%, mientras que en otros trabajos consultados (ver Referencia) se indican valores más altos: 0,25% a 0,50%, para evitar fisuras por contracción y temperatura.

Para definir las secciones críticas al corte, punzonado y flexión, el CIRSOC establece una relación entre el diámetro de la base y el ancho del fuste, en donde considera a la estructura de hormigón de forma cuadrada de lados c , siendo:

$$C = 0,88 * D$$

Sin embargo, para el estudio del aerogenerador debe hacerse un análisis más conservador sobre las superficies críticas de falla, debido a la diferencia entre las rigideces de la base de hormigón y la torre de metal.

8. Análisis de la geometría y su incidencia en las variables de diseño

A partir de las expresiones y aspectos desarrollados, se efectuó un análisis de sensibilidad de los principales parámetros que definen el diseño de una fundación de hormigón armado de un aerogenerador.

Los valores analizados corresponden a una base circular troncocónica para un aerogenerador de **2,0 MW** de potencia, a la cual se van variando los valores de su diámetro (**D**), así como la altura (**h1**, **ht**, **hf**). Para el cálculo del momento a flexión se ha utilizado un método aproximado a los efectos de poder cuantificar la mayor cantidad de variables intervinientes.

Propiedades de la base

$f'c = 35 \text{ Mpa}$

$c = 4,18 \text{ m}$

$\gamma H^{\circ} = 24 \text{ KN/ m}^3$

Radio del anillo metálico = 2,09 m

Altura del anillo metálico = 2,30 m

Esfuerzos transmitidos por el aerogenerador

M molino = **50.600 KN m**

N molino = **2.457 KN**

V molino = **712 KN**

Propiedades del Suelo

$\gamma s = 16 \text{ KN /m}^3$

$\varphi = 30^{\circ}$

$G = 80 \text{ MPa}$

$u = 0,20$

H (espesor del estrato blando) = 15,90 m

Resultados

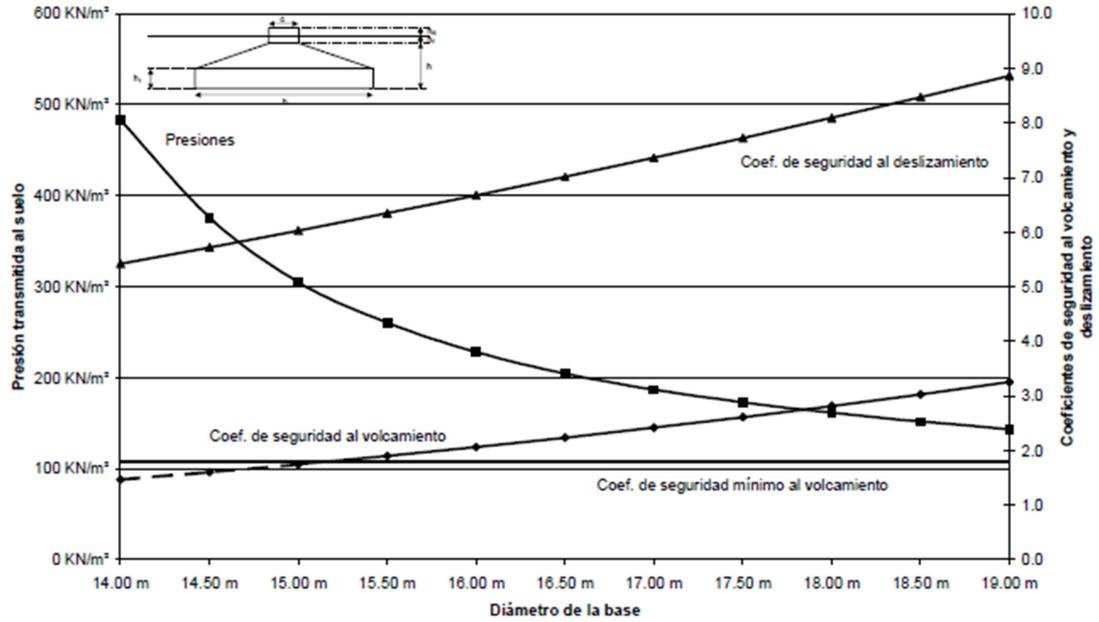


Fig n° 67: Presiones y estabilidad global para una base de altura 2,30 m

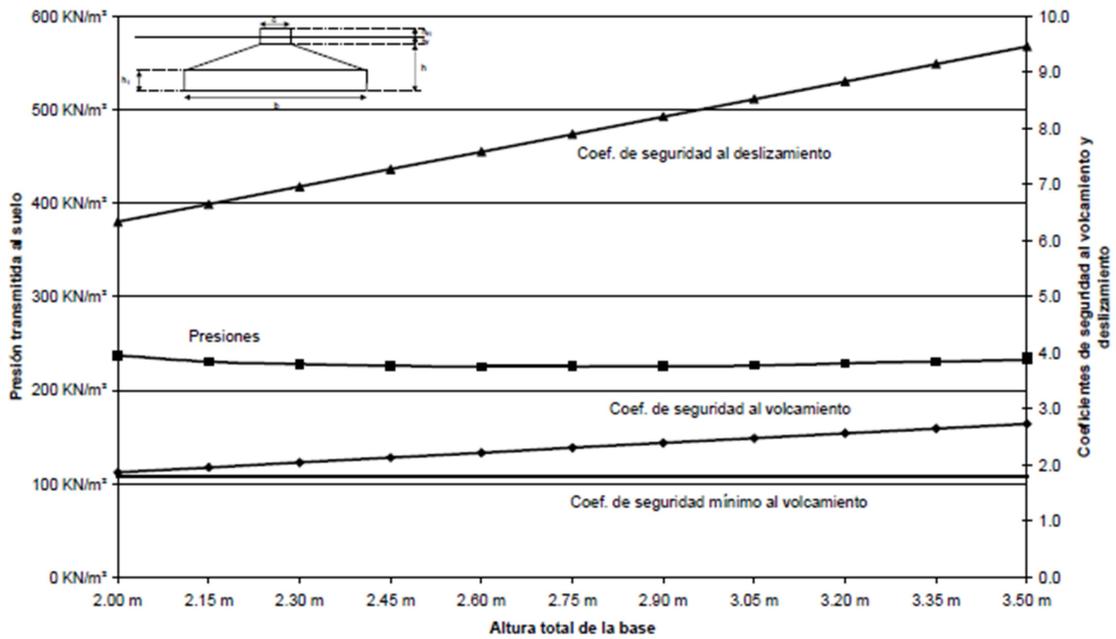


Fig n° 68: Presiones y Estabilidad global para una base de un Diámetro 16 m

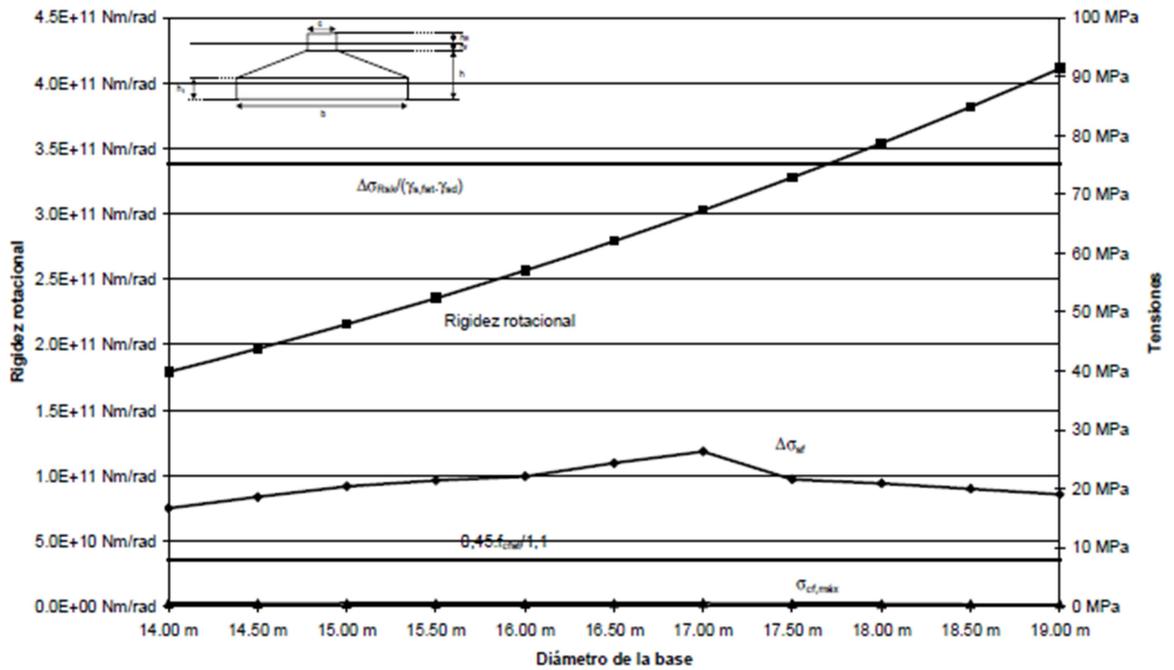


Fig n° 69: Rigidez Rotacional y Tensiones de fatiga para una base de altura 2,30 m

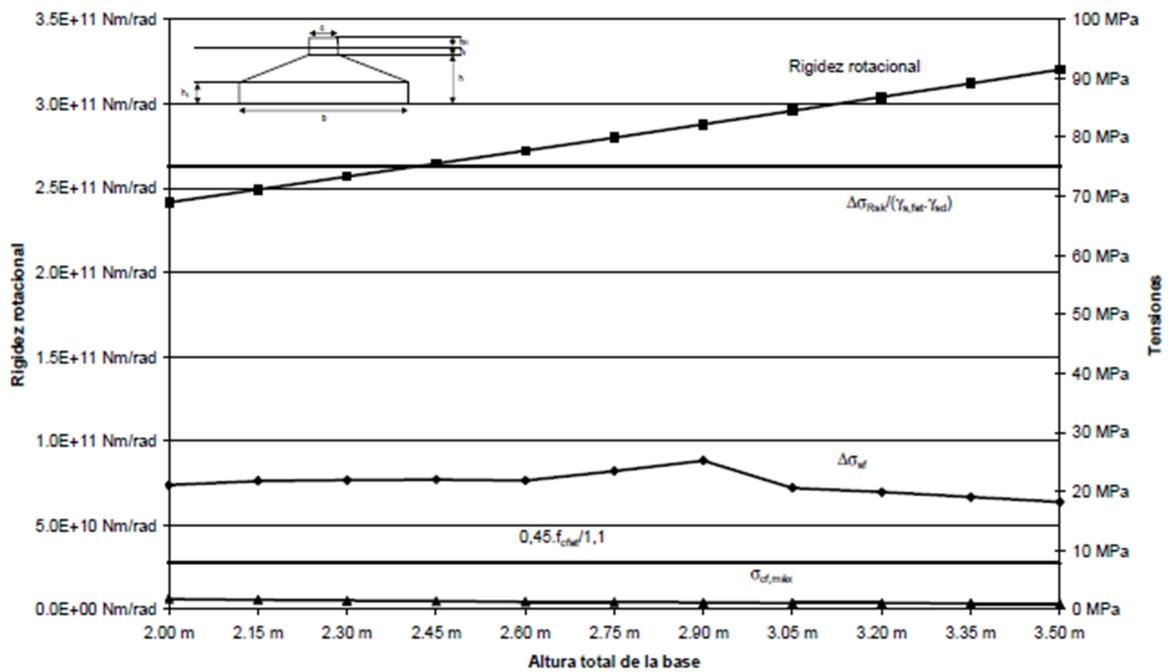


Fig n° 70: Rigidez Rotacional y Tensiones de fatiga para una base de diametro 16 m

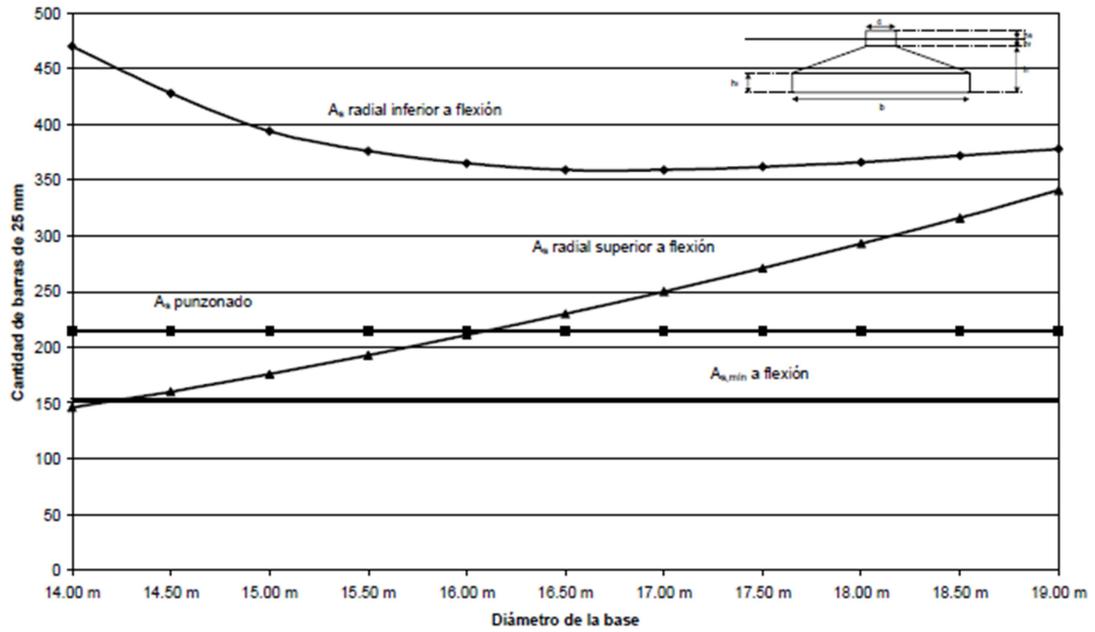


Fig n° 71: Armadura Radial superior, inferior y de punzonado para una base de altura 2,30 m

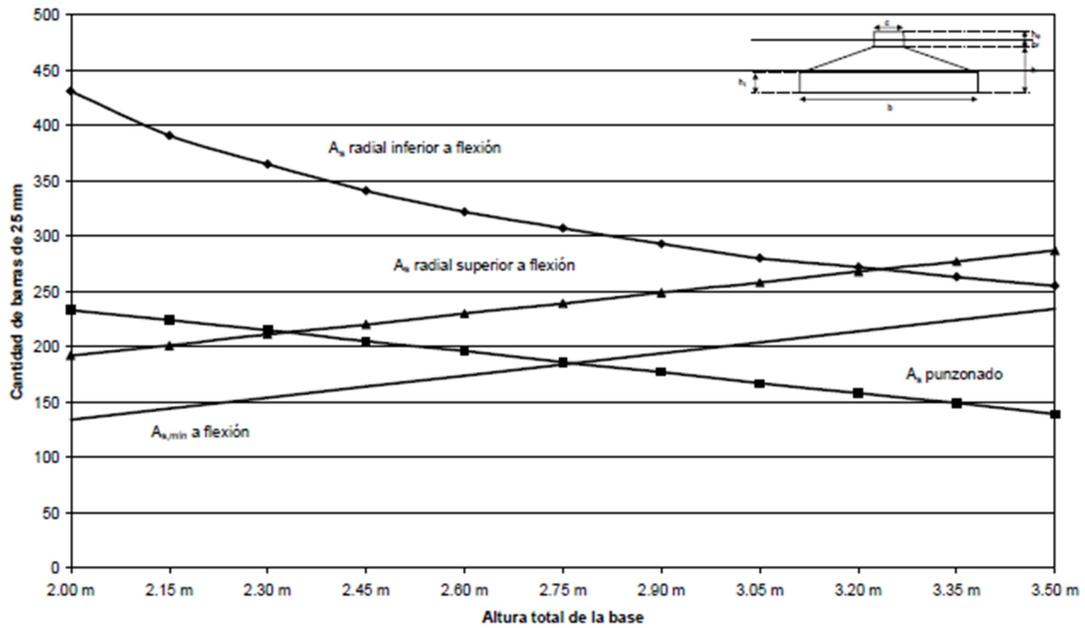


Fig n° 72: Arm. Radial superior, inferior y de punzonado para una base de diametro 16 m

Observaciones

Imagen 1 : Para una base de altura fija de 2,3 m, se observa que al aumentar un 35% el diámetro de la base disminuyen las presiones a un 80% de su valor inicial. Al mismo tiempo aumenta la seguridad al vuelco y al deslizamiento en un 100% y un 80% respectivamente.

Se observa en la imagen que una base circular de 14 m de diámetro y 2,3 m de altura no alcanza a cubrir el valor mínimo de coeficiente de seguridad al vuelco.

Imagen 2: Para una base de diámetro fijo en 16 m, se observa que al aumentar 75% su altura las presiones sobre el suelo se mantienen sin cambios significativos. La seguridad al vuelco y al deslizamiento aumentan en un 50% ambas.

Imagen 3: para una base con altura fija en 2,3 m, se observa que al aumentar el diámetro en un 35% de su valor inicial se logra un sensible aumento de la rigidez rotacional de la base, la misma aumenta en un 125%.

Las tensiones de fatiga se mantienen practicamente sin variacion, con un pico para cuando la base tiene 17 m de diametro.

Imagen 4: para una base con diámetro fijo en 16 m, se observa que al aumenta la altura en un 75 % se logra un aumento de la rigidez rotacional de un 30 %.

Las tensiones de fatiga analizadas se mantienen sin cambios considerables. Se observa un pico cuando la base alcanza los 2,9 m de altura.

Imagen 5: para una base con altura fija en 2,3 m, se observa que al aumentar el diámetro de la base en un 35% se logra una disminución en el uso de armadura radial inferior de un 20% , y un aumento en el uso de armadura radial superior a flexión en un 133%. No se observa variación en el uso de armadura de punzonado.

Imagen 6: para una base de diámetro fijo en 16 m, se observa que al variar la altura de la misma en un total de 75%, la armadura radial a flexión inferior disminuye un 75% de su valor inicial, la armadura radial a flexión superior aumenta en un 48% de su valor inicial. Sin embargo la armadura necesaria al punzonado disminuye en un 70% de su valor inicial.

Conclusiones

- Al aumentar el diámetro de la base se aprecia una disminución de las presiones sobre el suelo de apoyo, un aumento significativo de la seguridad global de la estructura ante el vuelco y el deslizamiento, y un aumento apreciable de la rigidez rotacional de la base.
- El aumento del diámetro de la fundación lleva consigo un aumento en la armadura radial superior y una disminución menor de la armadura radial inferior.
- El aumento del diámetro de la base influye sobre el efecto de corte por punzonado.
- Cuando variamos la altura de la base, se registra un aumento en la seguridad global de la estructura y de la rigidez rotacional, así como un efecto significativamente positivo sobre el punzonado.
- El aumento de la altura de la basa disminuye el consumo de armadura radial a flexión inferior, pero aumenta la radial a flexión superior.
- El aumento de la altura de la base tiene un efecto evidente sobre el punzonado, disminuyendo significativamente la armadura necesaria para tomar dicho esfuerzo.

9. Cálculos y Verificaciones de una base de un aerogenerador de 2 MW

Pasos a seguir en el dimensionado y cálculo de la base de un aerogenerador:

1. Determinar las Cargas exteriores que solicitan la estructura
2. Definir las Resistencias del hormigón y del acero
3. Predimensionar la base
4. Verificar la Tensión admisible del suelo
5. Verificar los Asentamientos Admisibles
6. Verificar al Volcamiento y Deslizamiento
7. Verificar la Rigidez de la fundación
8. Cálculo estructural. Determinar diagramas de esfuerzos característicos
9. Verificar a Corte y a corte por Punzonado
10. Verificar Flexión
11. Verificar a Fisuración
12. Verificar a Fatiga el acero y el hormigón

En estado de Servicio

- 1- Verificación de la tensión admisible del suelo
- 2- Verificación a la estabilidad global: volcamiento y deslizamiento
- 3- Verificación a los asentamientos admisibles
- 4- Verificación a fatiga de los materiales
- 5- Verificación a fisuración máxima admisible

En estado Último

- 1- Verificación a Punzonado
- 2- Verificación a Corte
- 3- Verificación a Flexión

1) Cargas exteriores que solicitan la estructura

M: momento flector = **50.600 KN m**

N: esfuerzo normal = **2.457 KN**

V: esfuerzo corte = **712 KN**

2) Características del Hormigón y del Acero

Resistencia del hormigón a compresión simple: $f'c = 40 \text{ MPa}$

Peso específico del Hormigón: $\gamma_c = 25 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3}$

Resistencia a fluencia del acero: $f_y = 420 \text{ Mpa} = 420.000 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$

3) Predimensionado de la base

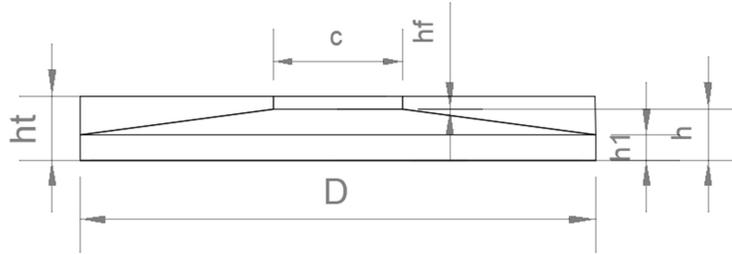


Fig n° 73: Imagen: Esquema de las dimensiones de la base

Dimensiones:

$$D = 19 \text{ m}$$

$$C = 5 \text{ m}$$

$$h1 = 1 \text{ m}$$

$$h = 2 \text{ m}$$

$$hf = 0,50 \text{ m}$$

$$ht = 2,50 \text{ m}$$

Características del Suelo por encima de la base

$$C = 2 \frac{\text{T}}{\text{m}^2} \quad \varphi = 32^\circ \quad \gamma = 1,9 \frac{\text{T}}{\text{m}^3}$$

Peso de la Base:

$$P_b = \gamma_c * \left[\frac{\pi c^2}{4} (ht) + \frac{\pi(D^2 - c^2)}{4} h1 + \frac{\pi(D^2 - c^2)}{4} \frac{(h - h1)}{2} \right]$$

$$P_b = 25 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} * \left[\frac{\pi(5\text{m})^2}{4} (2,5 \text{ m}) + \frac{\pi(19\text{m}^2 - 5\text{m}^2)}{4} 1,0 \text{ m} + \frac{\pi(19\text{m}^2 - 5\text{m}^2)}{4} \left(\frac{2\text{m} - 1,0\text{m}}{2} \right) \right]$$

$$P_b = 11.123,2 \text{ KN}$$

Peso del Suelo :

$$P_s = \gamma_s * \left[\frac{\pi(D^2 - c^2)}{4} hf + \frac{\pi(D^2 - c^2)}{4} \frac{(h - h1)}{2} \right]$$

$$P_s = 19 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} * \left[\frac{\pi(20\text{m}^2 - 5\text{m}^2)}{4} 0,5 \text{ m} + \frac{\pi(20\text{m}^2 - 5\text{m}^2)}{4} \frac{(2\text{m} - 1,0\text{m})}{2} \right]$$

$$P_s = 5.595 \text{ KN}$$

4) Verificación de la tensión admisible del suelo

$$N = \Sigma (N + P_b + P_s) = 2.457 \text{ KN} + 5.595 \text{ KN} + 11.123,2 \text{ KN} = \mathbf{19.175,2 \text{ KN}}$$

$$M = \Sigma (M_f + V * ht) = 50.600 \text{ KN m} + 712 \text{ KN} * 2,5 \text{ m} = \mathbf{52.380 \text{ KN m}}$$

$$e = \frac{M}{N} = \frac{52.380 \text{ KN m}}{19.175,2 \text{ KN}} = \mathbf{2,73 \text{ m}} \quad \frac{B}{6} = \frac{19 \text{ m}}{6} = \mathbf{3,16 \text{ m}}$$

$$e = 2,73 \text{ m} < \frac{B}{6} = 3,16 \text{ m} \quad \text{La base trabaja a compresión en toda su superficie}$$

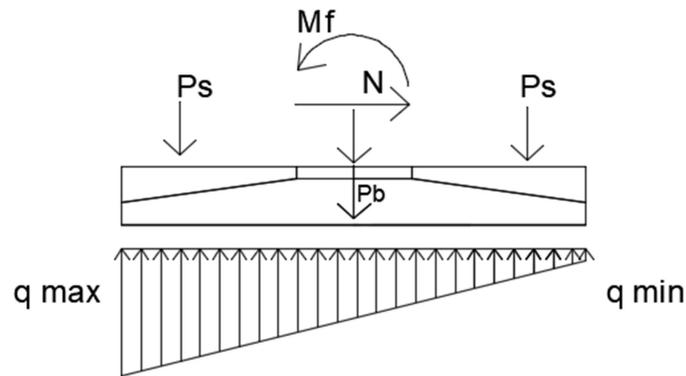


Fig n° 74: esquema cargas y tensiones en el suelo

$$q_{\max} = \frac{4N}{\pi D^2} \left(1 + \frac{6e}{D}\right) = \frac{4 * 19.175,2 \text{ KN}}{3,14 * (19 \text{ m})^2} \left(1 + \frac{6 * 2,73 \text{ m}}{19 \text{ m}}\right) = 125,9 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$q_{\min} = \frac{4N}{\pi D^2} \left(1 - \frac{6e}{D}\right) = \frac{4 * 19.175,2 \text{ KN}}{3,14 * (19 \text{ m})^2} \left(1 - \frac{6 * 2,73 \text{ m}}{19 \text{ m}}\right) = 9,32 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

Se debe verificar que: $q_{\max} \leq q_{\text{adm}}$

Por Terzaghy- para base circular:

$$q_u = 1,3 * C * N_c + q * N_q + 0,3 * \gamma * B * N_\gamma$$

$$N_c = 44,04$$

$$N_q = 28,52$$

$$N_\gamma = 26,87$$

$$q_u = 1,3 * 2 \frac{\text{T}}{\text{m}^2} * 44,04 + 1,9 \frac{\text{T}}{\text{m}^3} * 2,5 \text{ m} * 28,52 + 0,3 * 1,9 \frac{\text{T}}{\text{m}^3} * 19 \text{ m} * 26,87 = 473,65 \frac{\text{T}}{\text{m}^2}$$

$$q_{\text{neta}} = q_u - (q * D_f) = 473,65 \frac{\text{T}}{\text{m}^2} - \left(1,9 \frac{\text{T}}{\text{m}^3} * 2,5 \text{ m} \right) = 469,7 \frac{\text{T}}{\text{m}^2} = 4.697 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$FS = \frac{q_{\text{neta}}}{q_{\text{max}}} = \frac{4.697 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}}{126 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}} = 37 \text{ Verifica}$$

Verificar la tensión admisible según Terzaghi para un coeficiente de seguridad de 37.

Por Brich Hansen- para base circular y carga inclinada:

$$Q_u = 1,2 * C * N_c * i_c * d_c * s_c + q * N_q * i_q * d_q * s_q + 0,6 * \gamma * B * N_\gamma * i_\gamma * d_\gamma * s_\gamma$$

Factores de capacidad de carga:

$$N_q = \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi'}{2} \right) e^{\pi \tan \varphi'}$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi'$$

$$N_\gamma = 2 (N_q + 1) \tan \varphi'$$

De tabla, para $\varphi' = 32^\circ$

$$N_c = 35,49$$

$$N_q = 23,18$$

$$N_\gamma = 30,22$$

Factores de profundidad

$$d_c = 1 + 0,4 \frac{D_f}{B} = 1 + 0,4 \frac{2,5 \text{ m}}{19 \text{ m}} = 1,05$$

$$d_q = 1 + 2 \tan \varphi' (1 - \text{sen } \varphi')^2 \frac{D_f}{B} = 1 + 2 \tan 32^\circ (1 - \text{sen } 32^\circ)^2 \frac{2,5 \text{ m}}{19 \text{ m}} = 1,002$$

$$d_\gamma = 1$$

Ecuaciones válidas para: $\frac{D_f}{B} = \frac{2,5 \text{ m}}{19 \text{ m}} = 0,132 \leq 1 \text{ Verifica}$

Factores de inclinación de carga

$$N = 2.457 \text{ KN}$$

$$V = 712 \text{ KN}$$

$$\alpha: \text{inclinación respecto a la horizontal} = \operatorname{tag}^{-1} \frac{V}{N} = \operatorname{tag}^{-1} \frac{712 \text{ KN}}{2.457 \text{ KN}} = 16^\circ$$

$$ic = iq = \left(1 - \frac{\beta}{\varphi'}\right)^2$$

$$\beta: \text{inclinación de la carga respecto a la vertical: } \beta = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 16^\circ = 74^\circ$$

$$ic = iq = \left(1 - \frac{74^\circ}{90^\circ}\right)^2 = 0,032$$

$$i\gamma = \left(1 - \frac{\beta}{\varphi'}\right)^2 = \left(1 - \frac{74^\circ}{32^\circ}\right)^2 = 1,72$$

Factores de forma

$$sc = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \left(\frac{Nq}{Nc}\right) = 1 + \left(\frac{19 \text{ m}}{19 \text{ m}}\right) \left(\frac{23,18}{35,49}\right) = 1,48$$

$$sq = 1 + \left(\frac{B}{L}\right) \tan \varphi' = 1 + \left(\frac{19 \text{ m}}{19 \text{ m}}\right) \tan 32^\circ = 1,46$$

$$sy = 1 + 0,4 \frac{B}{L} = 1 + 0,4 \frac{19 \text{ m}}{19 \text{ m}} = 1,29$$

$$q u = 1,2 * C * Nc * ic * dc * sc + q * Nq * iq * dq * sq + 0,6 * \gamma * B * N\gamma * i\gamma * d\gamma * sy$$

$$q u = 1,2 * 2 \frac{T}{m^2} * 35,49 * 0,032 * 1,05 * 1,48 + \left(1,6 \frac{T}{m^2} * 2,5 \text{ m}\right) * 23,18 * 0,032 * 1,002 * 1,46 + 0,6 * 1,6 \frac{T}{m^2} * 19 \text{ m} * 30,22 * 1,72 * 1 * 1,29$$

$$q u = 1.227,78 \frac{T}{m^2} = 12.277,8 \frac{KN}{m^2}$$

$$q \max \leq q \text{ adm}$$

$$FS = \frac{Qu}{Q \max} = \frac{12.277,8 \frac{T}{m^2}}{126 \frac{KN}{m^2}} = 97,8 \text{ Verifica}$$

Verifica la capacidad de carga por Brich Hansen por un factor de seguridad de 97,8.

5) Cálculo de lo Asentamientos

Características de suelo: Estrato de arena medianamente densa

Espesor del estrato: $H = 15 \text{ m}$

Parámetros elásticos: $E = 20 \text{ MN/m}^2$ $\nu = 0,30$

$$S_e = q_0 * \alpha * B' * \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} * I_z * I_f$$

$$q_0 = \Sigma (N + Pb + Ps) = 2.457 \text{ KN} + 5.595 \text{ KN} + 11.123,2 \text{ KN} = 19.175,2 \text{ KN} = 19,175 \text{ MN}$$

En el centro : $\alpha = 4$ $m' = L/B = 1$ $n' = H/B/2 = 15\text{m}/9,5 \text{ m} = 1,59$

de Tabla: $I_z = 0,2653$ $I_f = 0,9384$

$$S_e = 19,175 \text{ MN} * 4 * 19\text{m} * \frac{1 - 0,3^2}{\frac{20\text{MN}}{\text{m}^2}} * 0,2653 * 0,9384$$

$$\mathbf{S_e = 16,4 \text{ mm}}$$

En la borde : $\alpha = 1$ $m' = L/B = 1$ $n' = H/B = 15\text{m}/9,5 \text{ m} = 0,79$

de Tabla: $I_z = 0,2156$ $I_f = 0,9384$

$$S_e = 19,175 \text{ MN} * 1 * 19\text{m} * \frac{1 - 0,3^2}{\frac{20\text{MN}}{\text{m}^2}} * 0,2156 * 0,9384$$

$$\mathbf{S_e = 3.35 \text{ mm}}$$

Asentamiento según el Cypecad, aplicando el método de los elementos finitos, considerando la combinación de carga mas desfavorable:

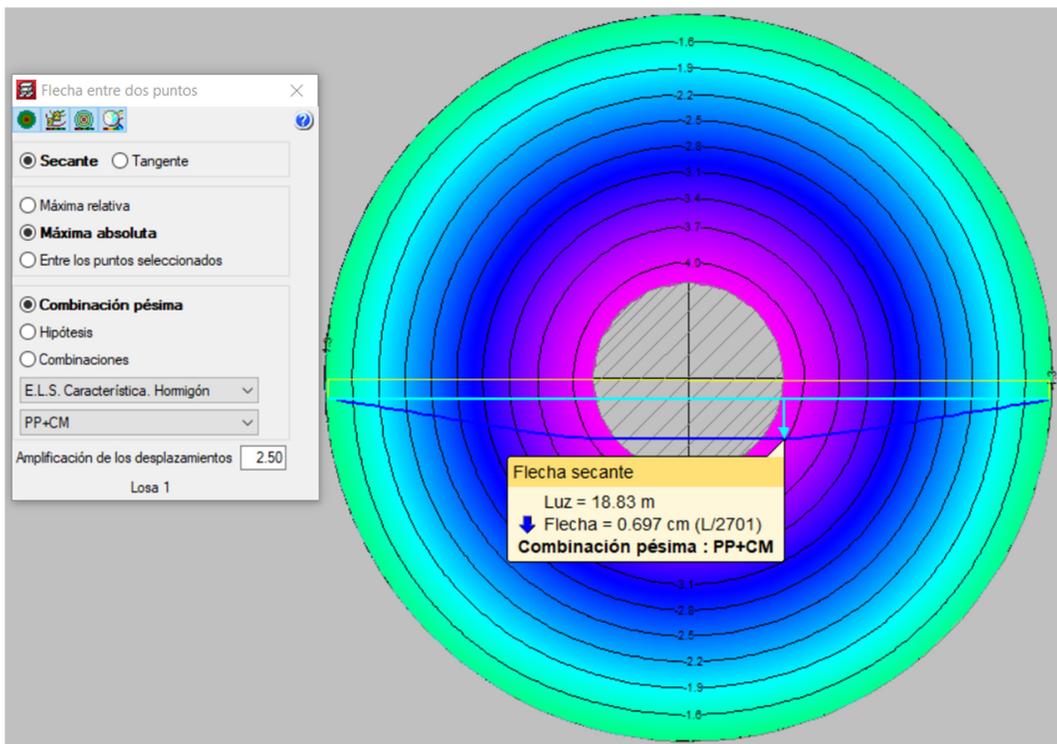


Fig n° 75: Asentamientos de la base circular sobre el estrato arenoso

Se observa:

Los asentamientos son mayores en el centro de la base en concordancia con las formulas de la teoria del solido elastico.

6) Verificación al volcamiento

$$FSV = \frac{(Fn + Pb + Ps) * R}{Mv}$$

Momento volcador: $Mv = Mf + Fv * ht$

Siendo:

$$Fn = 2.457 \text{ KN}$$

$$Pb = 11.123,9 \text{ KN}$$

$$Ps = 5.595 \text{ KN}$$

$$Fv = 712 \text{ KN} \quad ht = 2,50 \text{ m} \quad Mf = 50.600 \text{ KN m}$$

$$FSV = \frac{(11.123,9 \text{ KN} + 5.595 \text{ KN} + 2.457 \text{ KN}) * 9,5 \text{ m}}{(50.600 \text{ KN m} + 712 \text{ KN} * 2,50 \text{ m})} = 3,88$$

FSV = 3,88 > 1,5 Verifica al Vuelco

7) Verificación al deslizamiento

$$FSD = \frac{(Fn + Pb + Ps) * \text{Tg}\left(\frac{2}{3} \varphi\right)}{Fv}$$

Fv: Fuerza deslizante (viento)

$$Fv = 712 \text{ KN}$$

$$\Phi = 32^\circ$$

$$FSD = \frac{(11.123,9 \text{ KN} + 5.595 \text{ KN} + 2.457 \text{ KN}) * \text{Tg}\left(\frac{2}{3} 32^\circ\right)}{712 \text{ KN}} = 11,15$$

FSD = 11,15 > 1,50 Verifica al deslizamiento

8) Diagrama de esfuerzos:

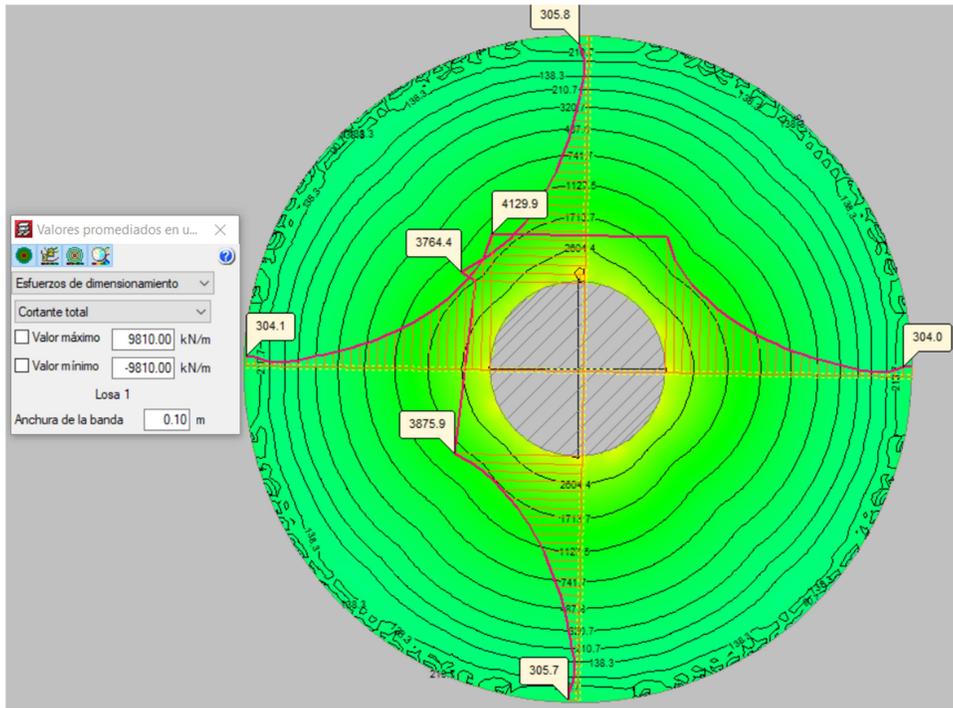


Fig n° 76: Esfuerzo de Corte

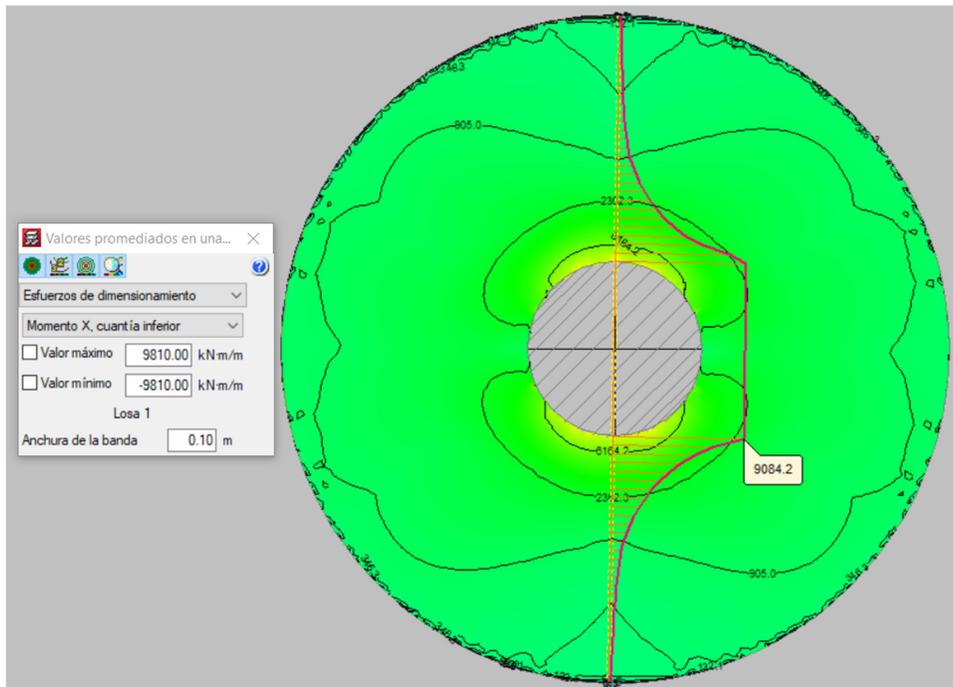


Fig n° 77: Momento flector armadura longitudinal inferior

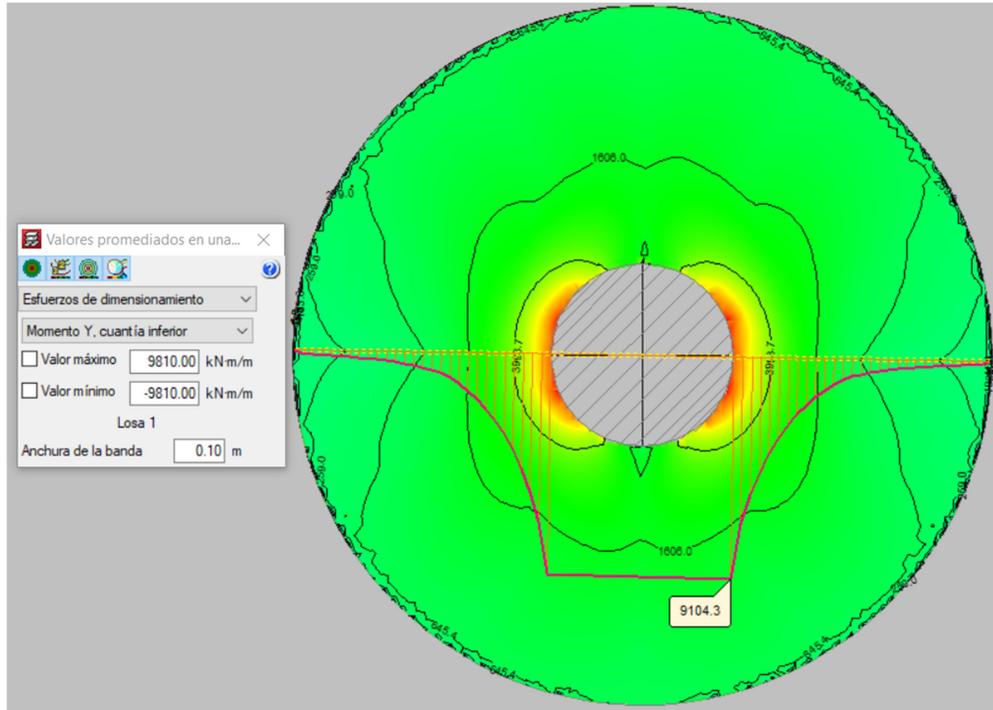


Fig n ° 78: Momento flector armadura transversal inferior

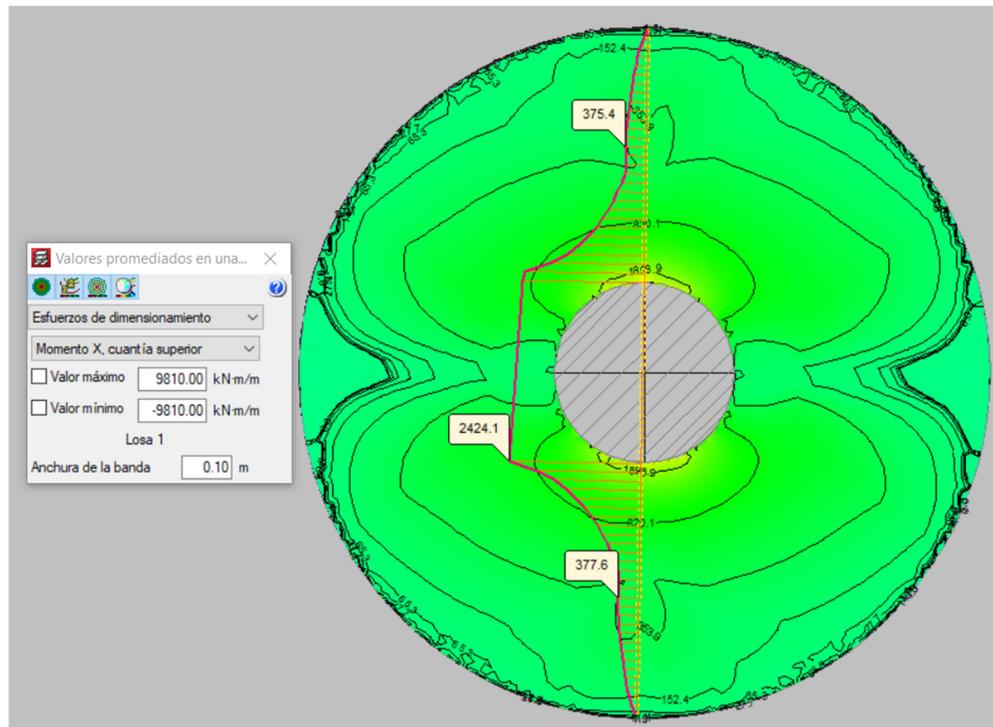


Fig n ° 79: Momento flector armadura longitudinal superior

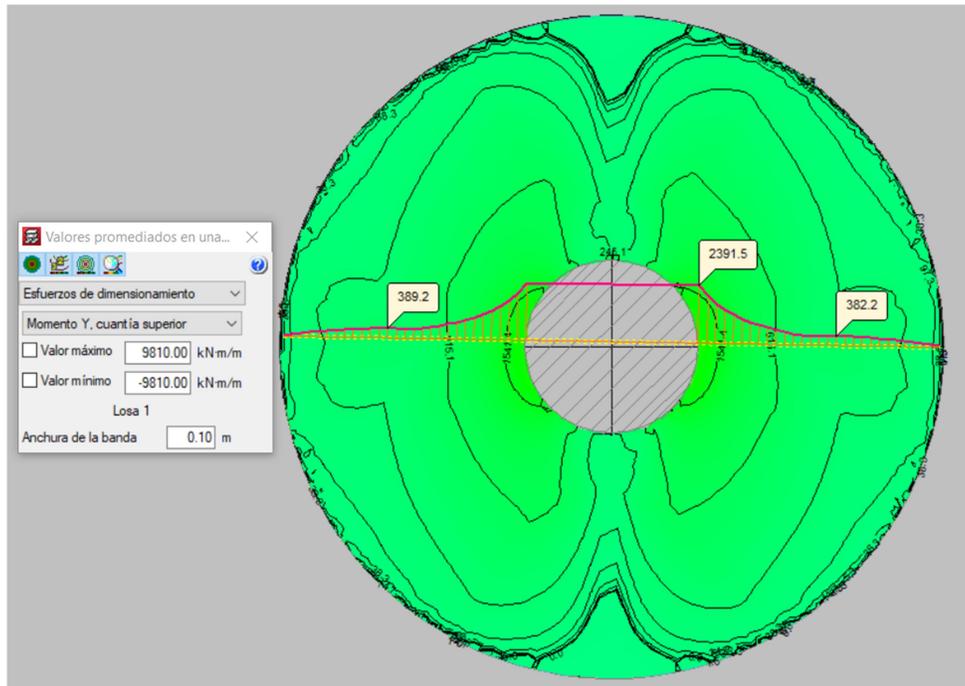


Fig n° 80: Momento flector armadura transversal superior

9) Verificación al Punzonado

$$V_u < \varphi V_n$$

$$V_n = V_c + V_s$$

$$\tau_u \frac{\max}{\min} = \frac{1,6 * F_n}{2 \pi \text{ Ranillo} * t} + \frac{1,6 * M_f}{\pi \text{ Ranillo}^2 * t}$$

$$V_u \max, \min = \tau_u * 2 \pi * \text{Ranillo} * t$$

Datos:

$$F_n = 2.457 \text{ KN} \quad M_f = 50.600 \text{ KN m} + 712 \text{ KN} * 2,50 \text{ m} = 52.380 \text{ KN m}$$

$$R \text{ anillo} = 2,09 \text{ m} \quad t = 2,30 \text{ m} \quad b_0 = 2\pi * (2,09 \text{ m} + 2,30 \text{ m}) = 27,58 \text{ m}$$

Tensión última

$$\tau_u \max = \frac{1,6 * F_n}{2 \pi \text{ Ranillo} * t} + \frac{1,6 * M_f}{\pi \text{ Ranillo}^2 * t}$$

$$\tau_u \max = \frac{1,6 * 2.457 \text{ KN}}{2 * 3,14 * 2,09 \text{ m} * 2,30 \text{ m}} + \frac{1,6 * 52.380 \text{ KN m}}{3,14 * (2,09 \text{ m})^2 * 2,30 \text{ m}} = 26.683,3 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2}$$

$$V_u \max = \tau_u * 2 \pi * \text{Ranillo} * t$$

$$V_u \max = 26.683,3 \text{ KN} * 2 * 3,14 * 2,09 \text{ m} * 2,30 \text{ m} = 805.921,63 \text{ KN}$$

Resistencia del hormigón

$$V_c < \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} * b_o * t = \frac{1}{6} \sqrt{40} * 27,58 \text{ m} * 2,30 \text{ m} = 66,87 \text{ KN}$$

Resistencia de la armadura

$$V_u < \varphi V_n = \varphi (V_c + V_s) \Rightarrow V_s = \frac{V_u}{\varphi} - V_c = \frac{805.922 \text{ KN}}{0,65} - 66,87 \text{ KN} = 1.239.813,1 \text{ KN}$$

$$A_v = \frac{V_s S}{f_y d} = \frac{1.239.813,1 \text{ KN}}{420.000 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} * 2,3 \text{ m}} = 1,28 \frac{\text{m}^2}{\text{m}}$$

Se dispondrán barras de 32 mm en forma de abanico para tomar el corte por punzonado.

10) Verificación al Corte

$$V_u < \varphi V_n = \varphi (V_c + V_s)$$

V_u : carga última, obtenida del diagrama de esfuerzo cortante

$$V_s = \frac{A_s * f_y * d}{s}$$

$$V_c = \frac{1}{6} * \sqrt{f'_c} * b_w * d$$

$$\varphi = 0,65$$

Se debe cumplir:

$$V_c < \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} * b_w * d$$

$$\text{con } \sqrt{f'_c} \leq 8,3 \text{ MPa}$$

Datos:

$$f'_c = 40 \text{ MPa}$$

$$b_w = 20 \text{ m}$$

$$d = 0,80 \text{ h} = 0,80 \text{ m}$$

$$f_y = 420 \text{ MPa}$$

La base se armará, para tomar el esfuerzo de corte, en tres tramos

Carga última (para una franja de 1m de ancho)

Tramo 1: de $r = 0 \text{ m}$ a $r = 4,5 \text{ m}$

$$V_u = 4.129 \text{ KN}$$

Tramo 2: de $r = 4,5 \text{ m}$ a $r = 7,00 \text{ m}$

$$V_u = 2.000 \text{ KN}$$

Tramo 3: de $r = 7,00 \text{ m}$ a $r = 9,50 \text{ m}$

$$V_u = 500 \text{ KN}$$

Tramo 1

Resistencia del hormigón

$$V_c < \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} * b_w * d = \frac{1}{6} \sqrt{40 \text{ MPa}} * 1 \text{ m} * 1,75 \text{ m} = 1,84 \text{ KN}$$

$$\text{Condición: } \sqrt{40 \text{ MPa}} = 6,32 \text{ MPa} < 8,3 \text{ Mpa } \textit{verifica}$$

Resistencia de la armadura

$$V_u < \phi V_n = \phi (V_c + V_s) \Rightarrow V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c = \frac{4.129 \text{ KN}}{0,75} - 1,84 \text{ KN} = 6.350,47 \text{ KN}$$

$$V_s = \frac{A_s * f_y * d}{s} \Rightarrow \frac{A_s}{s} = \frac{V_s}{F_y * d} = \frac{6.350,47 \text{ KN}}{420.000 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} * 1,75 \text{ m}} = 0,00864 \frac{\text{m}^2}{\text{m}}$$

Será necesario 0,0189 m² por metro de armadura a corte.

Separación $V_s < \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} * b_w * d$

$$V_s = \frac{1}{3} \sqrt{40} * 1 \text{ m} * 1,75 \text{ m} = 3,68 \text{ KN}$$

$$V_s = 6.351 \text{ KN} > 3,68 \text{ KN} \quad \Rightarrow \textit{s=20 cm}$$

$$A_s = 0,00864 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} * \frac{(100 \text{ cm})^2}{1 \text{ m}^2} * 0,20 \text{ m} = 17,28 \text{ cm}^2 *$$

$$\frac{\pi d^2}{4} * n^{\circ} \text{ de ramas} = 17,28 \text{ cm}^2$$

$$\frac{\pi d^2}{4} * 2 = 17,28 \text{ cm}^2 \Rightarrow d = \sqrt{\frac{17,28 \text{ cm}^2 * 4}{2 * \pi}} = 3,21 \text{ cm}$$

Será necesario estribos de 2 ramas de 32 mm de diámetro colocados cada 20 cm.

Tramo 2

Resistencia del hormigón

$$V_c < \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} * b_w * d = \frac{1}{6} \sqrt{40 \text{ MPa}} * 1 \text{ m} * 1,25 \text{ m} = 1,32 \text{ KN}$$

Condición: $\sqrt{40 \text{ MPa}} = 6,32 \text{ MPa} < 8,3 \text{ Mpa}$ *verifica*

Resistencia de la armadura

$$V_u < \phi V_n = \phi (V_c + V_s) \Rightarrow V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c = \frac{2.000 \text{ KN}}{0,75} - 1,32 \text{ KN} = 3.075,6 \text{ KN}$$

$$V_s = \frac{A_s * f_y * d}{s} \Rightarrow A_s = \frac{V_s * s}{F_y * d} = \frac{3.075,6 \text{ KN}}{420.000 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} * 1,25 \text{ m}} = 0,00586 \frac{\text{m}^2}{\text{m}}$$

Será necesario $0,0092 \text{ m}^2$ por metro de armadura a corte.

$$\text{Separación} \quad V_s < \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} * b_w * d$$

$$V_c = \frac{1}{3} \sqrt{40} * 1 \text{ m} * 1,25 \text{ m} = 2,63 \text{ KN}$$

$$V_s = 3.076 \text{ KN} > 2,63 \text{ KN} \quad \Rightarrow s = 20 \text{ cm}$$

$$A_s = 0,00586 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} * \frac{(100 \text{ cm})^2}{1 \text{ m}^2} * 0,20 \text{ m} = 11,72 \text{ cm}^2 *$$

$$\frac{\pi d^2}{4} * n^{\circ} \text{ de ramas} = 11,72 \text{ cm}^2$$

$$\frac{\pi d^2}{4} * 2 = 11,72 \text{ cm}^2 \Rightarrow d = \sqrt{\frac{11,72 \text{ cm}^2 * 4}{2 * \pi}} = 2,73 \text{ cm}$$

Usando barras de diámetro de 32 mm :

$$\frac{\pi d^2}{4} * 2 = \frac{\pi (3,2 \text{ cm})^2}{4} * 2 = 16,08 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 0,00586 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} * \frac{(100 \text{ cm})^2}{1 \text{ m}^2} * s = 16,08 \text{ cm}^2 *$$

$$S = \frac{16,08 \text{ cm}^2}{0,00586 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} \frac{(100 \text{ cm})^2}{1 \text{ m}^2}} = 0,30 \text{ m}$$

Será necesario colocar estribos de 2 ramas de 32 mm de diámetro colocados cada 30 cm.

Tramo 3

Resistencia del hormigón

$$V_c < \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} * b_w * d = \frac{1}{6} \sqrt{40 \text{ MPa}} * 1 \text{ m} * 0,75 \text{ m} = 0,79 \text{ KN}$$

Condición: $\sqrt{40 \text{ MPa}} = 6,32 \text{ MPa} < 8,3 \text{ Mpa}$ *verifica*

Resistencia de la armadura

$$V_u < \phi V_n = \phi (V_c + V_s) \Rightarrow V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c = \frac{3,50 \text{ KN}}{0,75} - 0,79 \text{ KN} = 537,7 \text{ KN}$$

$$V_s = \frac{A_s * f_y * d}{s} \Rightarrow A_s = \frac{V_s * s}{F_y * d} = \frac{537,7 \text{ KN}}{420.000 \frac{\text{KN}}{\text{m}^2} * 0,75 \text{ m}} = 0,0017 \frac{\text{m}^2}{\text{m}}$$

Será necesario 0,0023 m² por metro lineal para armadura a corte

$$\text{Separación} \quad V_s < \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} * b_w * d$$

$$V_s = \frac{1}{3} \sqrt{40} * 1 \text{ m} * 0,75 \text{ m} = 1,58 \text{ KN}$$

$$V_s = 768,4 \text{ KN} > 1,58 \text{ KN} \quad \Rightarrow s = 20 \text{ cm}$$

$$A_s = 0,0017 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} * \frac{(100 \text{ cm})^2}{1 \text{ m}^2} * 0,20 \text{ m} = 3,41 \text{ cm}^2*$$

$$\frac{\pi d^2}{4} * n^{\circ} \text{ de ramas} = 17,28 \text{ cm}^2$$

$$\frac{\pi d^2}{4} * 2 = 17,28 \text{ cm}^2 \Rightarrow d = \sqrt{\frac{3,41 \text{ cm} * 4}{2 * \pi}} = 1,47 \text{ cm}$$

Usando barras de diámetro de 32 mm :

$$\frac{\pi d^2}{4} * 2 = \frac{\pi 3,2 \text{ cm}^2}{4} * 2 = 16,08 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 0,0017 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} * \frac{(100 \text{ cm})^2}{1 \text{ m}^2} * s = 16,08 \text{ cm}^2*$$

$$S = \frac{16,08 \text{ cm}^2}{0.0017 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} \frac{(100 \text{ cm})^2}{1\text{m}^2}} = 0,94 \text{ m}$$

Será necesario estribos de 2 ramas de 32 mm de diámetro colocados cada 90 cm.

11) Verificación a flexión

El cálculo y la verificación de la armadura a flexión se realizaron mediante el programa Cypecad.

10. Consideraciones sobre el Hormigón y sus componentes

El hormigón es un material compuesto por cemento, adiciones, agua, agregados gruesos y agregados finos. También es común adicionarle aditivos que mejoran las características y propiedades del material.

Cuando el hormigón se coloca en grandes cantidades hay que tener algunas precauciones: el calor que generan las reacciones químicas de hidratación entre los compuestos del cemento y el agua, la contracción por secado que genera un volumen grande de hormigón, la fluidez y consistencia necesarias para lograr colar el hormigón, embebiendo una gran densidad de armadura.

Además se busca la continuidad de la estructura de hormigón, por lo que se hormigona la totalidad de la base en una sola etapa. Esto busca evitar juntas y superficies posibles de falla o de debilidad. Para lograr dicho objetivo es necesario retardar el inicio del fraguado, y controlar el calor que se genera en los hormigones en masa.

A continuación se describen las características más relevantes para el uso de cementos de bajo calor de hidratación.

10.1 Cemento

Cementos de bajo calor de hidratación:

Los cementos de bajo calor de hidratación (BCH) son requeridos para estructuras de hormigón masivo. La tabla presenta los requisitos para estos cementos según norma IRAM 50001.

Tabla 2.19: Requisitos específicos de cementos de bajo calor de hidratación (BCH)

Tipo de cemento	Propiedad	Unidad	Requisito	Método de ensayo
CPN, CPP, CAH, CPE	Calor de hidratación edad: 7 días	J/g	≤ 270	IRAM 1617
	edad: 28 días		≤ 310	
CPN, CPP, CAH, CPF, CPC, CPE	Calor de hidratación edad: 5 días		≤ 270	IRAM 1852

Fig n° 81: Tabla: Requisitos específicos de cementos de bajo calor de hidratación

Cemento portland puzolánico

Propiedades: en general con respecto a un cemento portland normal presenta menor calor de hidratación, desarrollo de resistencia más lento, mayor evolución de resistencia a largo plazo (superior a 28 días), mayor resistencia a medio agresivo y mejor comportamiento con agregados potencialmente reactivos ya que contribuyen a la inhibición de la reacción álcali agregado.

Uso recomendado: obras de hormigón en masa (presas, cimentaciones masivas, etc), por su menor calor de hidratación, obras hidráulicas, por su impermeabilidad y cimentaciones.

Precauciones: fabricación del hormigón en tiempo frío. Curar adecuadamente, en especial en climas secos (fríos y cálidos), evitando desecaciones durante el primer período de endurecimiento.

Cemento Portland con escorias

Propiedades: en general comparado con el cemento portland normal estos cementos presentan menor calor de hidratación, mayor evolución de resistencia a largo plazo (superior a 28 días), y mayor resistencia a medios agresivos.

Uso recomendados: obras de hormigón en masa, incluso de gran volumen, que requieran un bajo calor de hidratación. Pavimentaciones y cimentaciones. Obras subterráneas. Obras de hormigón en masa en ambientes débilmente agresivos por salinidad en general (zonas litorales) o por sulfatos. Hormigón armado. Hormigones donde se requiera el desarrollo de resistencias a largo plazo.

Precauciones: Elaboración de hormigón a bajas temperaturas o en tiempo de heladas y/o con aditivos reductores de agua que puedan producir retrasos en el fraguado. Curar adecuadamente, en especial en climas fríos o a temperaturas bajas, evitando al máximo la desecación prematura.

Cemento de Alto Horno

Propiedades: en general, los hormigones elaborados con estos cementos presentan bajo calor de hidratación, importante evolución de resistencias a largo plazo (superior a 28 días), gran resistencia a medios agresivos.

Uso recomendado: obras de hormigón en masa, incluso de gran volumen, que requieran de un bajo calor de hidratación: cimentaciones, estabilización de suelos, suelo cemento y grava cemento, obras de hormigón en masa en ambientes muy agresivos por salinidad en general (zonas litorales) o por sulfatos, obras marítimas, hormigón armado, hormigones donde se requiera o aproveche el desarrollo de resistencias a largo plazo.

Precauciones: elaboración del hormigón a bajas temperaturas o en tiempo frío y/o con aditivos reductores de agua que pudieran producir retrasos en el fraguado. Curar adecuadamente, especialmente en climas fríos o a temperaturas bajas, evitando al máximo la desecación prematura z empleando productos de curado si es preciso. Hormigones expuestos al contacto con altas concentraciones de ion Mg.

10.2 Agregados

Pueden usarse agregados de la zona, siempre y cuando los mismos cumplan con ciertas características físicas y resistentes. También debe tenerse especial cuidado en las propiedades térmicas. A continuación se describen algunos requerimientos del agregado:

- 1- Tamaño máximo del agregado: se debe limitar teniendo en cuenta la separación de la armadura y la gran densidad de la misma.
- 2- Una curva granulométrica lo más continua posible.

- 3- Módulo de elasticidad del agregado alto. Es necesario contar con un agregado resistente.
- 4- La redondez del agregado debe ser tal que favorezca el deslizamiento entre partículas.

Propiedades térmicas

Los hormigones masivos se caracterizan por ser colocados en estructuras de grande dimensiones y requieren medidas para enfrentar la generación de calor y controlar los cambios volumétricos a fin de minimizar la posibilidad de figuración. En este tipo de estructuras y en hormigones utilizados para el aislamiento térmico resultan importantes las propiedades térmicas de los agregados: **coeficiente de expansión térmica; calor específico; la conductividad térmica; la difusividad térmica.**

10.3 Agua

Se acepta agua potable como agua de amasado y de curado, siempre y cuando no contenga sustancias perjudiciales en exceso, tales como: cloruros, sulfatos, PH mínimo; solidos residuales; material orgánico, etc.

La siguiente tabla resume los valores permitidos para el agua de amasado y mezclado:

Tabla 4.1: Requisitos químicos del agua de mezclado y curado (norma IRAM 1601)

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	
Residuo sólido	Agua recuperada de procesos de la industria del hormigón	mg/l	–	50.000
	Agua de otros orígenes	mg/l	–	5.000
Materia orgánica, expresada en oxígeno consumido ¹⁾	mg/l	–	3	
pH	Para su uso como agua de amasado	–	4,0	–
	Para su uso como agua de curado	–	6,0	–
Sulfato, expresado como SO ₄ ²⁻	mg/l	–	2.000	
Cloruro expresado como Cl ⁻	Para emplear en hormigón simple	mg/l	–	4.500
	Para emplear en hormigón armado	mg/l	–	1.000
	Para emplear en hormigón pretensado	mg/l	–	500
Hierro expresado como Fe ³⁺	Para uso como agua de curado ³⁾	mg/l	–	0,5
	Para su uso como agua de amasado	mg/l	–	1
Alcalis, (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O) ²⁾	mg/l	–	1.500	

¹⁾ Si se excede este valor, el agua puede ser utilizada si cumple con los requisitos físicos y químicos establecidos.
²⁾ Esta determinación es aplicable sólo si se espera utilizar agregados potencialmente reactivos.
³⁾ Se debe cumplir sólo cuando es importante el aspecto estético.

Fig n° 82: Requisitos químicos para el uso del agua de mezclado y curado

10.4 Aditivos

Se aplicarán aditivos para lograr mayor fluidez y la auto compactación del hormigón, para rellenar los lugares debajo de la armadura inferior, asegurándose cubrir por debajo de la placa del inserto metálico.

Aditivo para evitar la exudación del agua libre dentro del hormigón, quedando dicha agua a disposición para las reacciones de hidratación más tardías.

También se adicionará un aditivo que permitan retardar el tiempo de fraguado, logrando de esta manera alcanzar el rellenado de la base de forma continua y de una sola vez.

Los aditivos a usar son:

Aditivo 1: Hiperfluidificante

Aditivo 2: Incorporador de aire

Aditivo 3: Reductor de contracción

Aditivo 4: Retardador del tiempo de fraguado

11. Evaluación económica de la obra

A continuación se hará un análisis económico de la obra. Se realizará un cómputo de los materiales, un análisis de precio de cada ítem de la obra, evaluando los materiales, mano de obra y equipamiento a usar.

También se evaluarán los gastos generales, el coeficiente de resumen y por último el presupuesto de la obra.

11.2 Cómputo de materiales

CÓMPUTO			
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD
1	Suelo a mover (Prof. 2,5 m ; Diam. 20 m)	m3.	785
1	Suelo a compactar	m3.	294,47
1	Hormigón elaborado tipo H25 (de limpieza)	m3.	28,33
1	Hormigón elaborado tipo H40	m3.	444,93
1	Barra de Φ 12 mm	m	200
2	Barra de Φ 16 mm	m	449
3	Barra de Φ 20 mm	m	1440
4	Barra de Φ 25 mm	m	2176
5	Barra de Φ 32 mm	m	750
1	Torre de Acero A..	U	1
2	Paletas	U	3
3	Cono de unión.	U	1
4	Cabina	U	1
1	Placa Metálica	U	2
2	Pernos de Alta Resistencia	U	350
3	Tuerca de Alta Resistencia	U	350
1	Balizas reglamentarias.	U	2
2	Pararrayos.	U	1
3	Jabalina puesta a tierra.	U	1
4	Aisladores y soportes.	U	10

11.1 Análisis de Precios

Ítem 1: Excavación

		ANÁLISIS DE PRECIOS			
ITEM 1:	Excavación			UNIDAD: M3	
MATERIALES					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL

SUBTOTAL						\$ 0,00
MANO DE OBRA						
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL	
1	Oficial especializado	h				
2	Oficial	h	0,012	\$ 245,82	\$ 2,86	
3	Medio Oficial	h				
4	Ayudante	h	0,006	\$ 208,09	\$ 1,21	
SUBTOTAL						\$ 4,07
EQUIPOS						
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL	
1	Retroexcavadora	h	0,01162	\$ 4.658,53	\$ 54,15	
SUBTOTAL						\$ 54,15
COSTO DEL ITEM						\$ 58,22
COEFICIENTE DE RESUMEN						1,40
PRECIO DEL ITEM						\$ 81,50

Ítem 2: Hormigón de limpieza

		ANALISIS DE PRECIOS				
ITEM 2:	Hormigón de Limpieza			UNIDAD:	M3	
MATERIALES						
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL	
1	Hormigón H25	m3.	1,00	\$ 5.407,21	\$ 5.407,21	
SUBTOTAL						\$ 5.407,21
MANO DE OBRA						
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL	
1	Oficial especializado	h				
2	Oficial	h	0,012	\$ 245,82	\$ 2,95	
3	Medio Oficial	h				
4	Ayudante	h	0,012	\$ 208,09	\$ 2,50	
SUBTOTAL						\$ 5,45

EQUIPOS					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Vibrador inmersión Barikel	h	0,012	\$ 330,77	\$ 3,97
SUBTOTAL					\$ 3,97
COSTO DEL ITEM					\$ 5.416,63
COEFICIENTE DE RESUMEN					1,40
PRECIO DEL ITEM					\$ 7.583,28

Ítem 3: Base de hormigón armado

ANALISIS DE PRECIOS					
ITEM 3:	Base de hormigón armado				UNIDAD: m3
MATERIALES					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Barra de Ø 12 mm	m	0,45	\$ 70,73	\$ 31,83
2	Barra de Ø 16 mm	m	1,00	\$ 124,24	\$ 124,24
3	Barra de Ø 20 mm	m	2,56	\$ 193,66	\$ 495,78
4	Barra de Ø 25 mm	m	4,87	\$ 299,31	\$ 1.457,65
5	Barra de Ø 32 mm	m	1,68	\$ 329,25	\$ 553,14
6	Hormigón H40	m3	1	\$ 6.105,46	\$ 6.105,46
SUBTOTAL					\$ 8.768,10
MANO DE OBRA					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Oficial especializado	h	0,016	\$ 288,52	\$ 4,62
2	Oficial	h	0,016	\$ 245,82	\$ 3,93
3	Medio Oficial	h			
4	Ayudante	h	0,032	\$ 208,09	\$ 6,66
SUBTOTAL					\$ 15,21

EQUIPOS					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Motosoldadora Miller 13 HP	h	0,0385	\$ 1.142,48	\$ 43,99
2	Aserradora Barikel 13 HP	h	0,0214	\$ 550,00	\$ 11,77

SUBTOTAL			\$ 55,76
COSTO DEL ITEM			8.839,06
COEFICIENTE DE RESUMEN			1,40
PRECIO DEL ITEM			\$ 12.374,69

Ítem 4: Unión metálica

		ANALISIS DE PRECIOS			
ITEM 4:	Unión metálica			UNIDAD: GL.	
MATERIALES					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Pernos de Alta Resistencia	U	350,00	\$ 1.625,00	\$ 568.750,00
2	Tuercas de Alta Resistencia	U	350,00	\$ 650,00	\$ 227.500,00
3	Placa metálica	U	2,00	\$ 29.250,00	\$ 58.500,00
SUBTOTAL					\$ 854.750,00
MANO DE OBRA					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Oficial especializado	h	8	\$ 288,52	\$ 2.308,12
2	Oficial	h	3,5	\$ 245,82	\$ 860,36
3	Medio Oficial	h			
4	Ayudante	h	16	208,08515	3329,3624
SUBTOTAL					\$ 6.497,84
EQUIPOS					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
SUBTOTAL					\$ 0,00
COSTO DEL ITEM					\$ 861.247,84
COEFICIENTE DE RESUMEN					1,40
PRECIO DEL ITEM					\$ 1.205.746,98

Ítem 5: Instalación torre

ANALISIS DE PRECIOS					
ITEM 5:	Instalación del aerogenerador				UNIDAD: GL.
SUB-ITEM 3.1: TORRE DE SOPORTE EN ACERO					
MATERIALES					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Torre de acero; Cabina; Paletas	U	1	\$ 130.000.000,00	\$ 130.000.000,00
SUBTOTAL					\$ 130.000.000,00
MANO DE OBRA					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Oficial especializado	h	32	\$ 288,52	\$ 9.232,49
2	Oficial	h	32	\$ 245,82	\$ 7.866,13
3	Medio Oficial	h			
4	Ayudante	h	40	\$ 208,09	\$ 8.323,41
SUBTOTAL					\$ 17.098,62
EQUIPOS					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Hidrogrúa 30 ton.	h	16	\$ 4.500,00	\$ 72.000,00
SUBTOTAL					\$ 72.000,00
COSTO DEL ITEM					\$ 130.089.098,62
COEFICIENTE DE RESUMEN					1,40
PRECIO DEL ITEM					\$ 182.124.738,06

Ítem 6: Compactación del Suelo

ANALISIS DE PRECIOS					
ITEM 6:	Compactación de suelo				UNIDAD: m3
SUB-ITEM 3.1: TORRE DE SOPORTE EN ACERO					
MATERIALES					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
SUBTOTAL					\$ 0,00
MANO DE OBRA					

N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Oficial especializado	h			
2	Oficial	h	0,025	\$ 245,82	\$ 6,15
3	Medio Oficial	h			
4	Ayudante	h			
SUBTOTAL					\$ 6,15
EQUIPOS					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Vibro compactador manual	h	0,025	\$ 330,77	\$ 8,27
SUBTOTAL					\$ 8,27
COSTO DEL ITEM					\$ 14,41
COEFICIENTE DE RESUMEN					1,40
PRECIO DEL ITEM					\$ 20,18

Ítem 7: Instalaciones complementarias

ANALISIS DE PRECIOS					
ITEM 7: Instalaciones complementarias					UNIDAD: GL.
MATERIALES					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Balizas reglamentaria	U	2	\$ 1.330,79	\$ 2.661,58
2	Pararrayos de 5 puntas	U	1	\$ 3.496,54	\$ 3.496,54
3	Jabalina puesta a tierra.	U	1	\$ 753,74	\$ 753,74
SUBTOTAL					\$ 6.911,86
MANO DE OBRA					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Oficial especializado	h			
2	Oficial	h	2	\$ 245,82	\$ 491,63
3	Medio oficial	h			
4	Ayudante	h	4	\$ 208,09	\$ 832,34
SUBTOTAL					\$ 1.323,97
EQUIPOS					
N°	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	Hidrogrúa 30 ton.	h	2	4500	\$ 9.000,00
SUBTOTAL					\$ 9.000,00

COSTO DEL ITEM	\$ 17.235,83
COEFICIENTE DE RESUMEN	1,40
PRECIO DEL ITEM	\$ 24.130,17

11.3 Gastos generales

ANALISIS DE GASTOS GENERALES					
ITEM	DESCRIPCION	P. UNITARIO	CANTIDAD	AMORT.	TOTAL
1.	Directos- aquellos que dependen del plazo de la obra				
1.1.	ALQUILER MENSUAL DE EQUIPOS				
1.1.1	Oficina : 6,00 x 2,30 m, puerta y dos ventanas	\$ 13.580,00	2	100%	\$ 27.160,00
1.1.2	Pañol de herramientas y materiales: 6,20 x 2,30 m con	\$ 11.100,00	1	100%	\$ 11.100,00
1.1.3	Baño portátil obra, químico, c/ inodoro y mingitorio	\$ 2.750,00	3	100%	\$ 8.250,00
1.1.4	Casilla de vigilancia 1,20 m x 1,20 m	\$ 2.324,00	1	100%	\$ 2.324,00
1.1.5	Grupo Electrónico	\$ 44.000,00	2	100%	\$ 88.000,00
1.2.	COSTOS DE MOVILES ASIGNADOS A LA OBRA				
1.2.1.	Hilux 2.4 TDI C/S 6 MT 4x2 (150cv) (L16)	\$ 913.900,00	1	20,00%	\$ 182.780,00
1.2.2.	Kangoo furgon PH3 1.6 Confort 1 PLC	\$ 673.600,00	1	20,00%	\$ 134.720,00
1.2.3.	Patentes	\$ 7.500,00	1	30,00%	\$ 2.250,00
1.2.4.	Seguros	\$ 12.000,00	1	30,00%	\$ 3.600,00
1.3.	DIRECCION, CONDUCCION Y ADMINISTRACION				
1.3.1	1° categoría, analista administrativo	\$ 41.070,00	1	100%	\$ 41.070,00
1.3.2	1° categoría, capataz de obra	\$ 49.126,50	1	100%	\$ 49.126,50
1.3.3	responsable seguridad e higiene	\$ 37.500,00	1	100%	\$ 37.500,00
1.3.4	topógrafo	\$ 37.500,00	1	100%	\$ 37.500,00
1.3.5					
1.3.6					
1.4.	GASTOS OPERATIVOS				
1.4.1	elementos de limpieza	\$ 8.000,00	-	100%	\$ 8.000,00
1.4.2	papelaría y librería	\$ 7.500,00	-	100%	\$ 7.500,00
1.4.3	medicamentos	\$ 4.500,00	-	100%	\$ 4.500,00
1.4.4	cafetería	\$ 3.500,00	-	100%	\$ 3.500,00
1.4.5					
1.4.6					
1.5	PERSONAL				
1.5.1	cocinero	\$ 19.000,00	1	100%	\$ 19.000,00
1.5.2	dibujante	\$ 21.000,00	1	100%	\$ 21.000,00

1.5.3	ordenanza	\$ 19.000,00	1	100%	\$ 19.000,00
1.5.4	sereno	\$ 17.100,00	1	100%	\$ 17.100,00
1.5.5					
1.6.	SERVICIOS				
1.6.1	telefonía	\$ 25.000,00	1	100%	\$ 25.000,00
1.6.2					
1.7.	OTROS				
1.6.1	comida para el personal	\$ 50.000,00	1	100%	\$ 50.000,00
1.6.2.	elementos de limpieza para el personal	\$ 5.500,00	1	100%	\$ 5.500,00
1.6.2					
1.6.2.				TOTAL	\$ 805.480,50
				N° meses	6
					\$ 4.832.883,00
2.	Indirectos- aquellos que no dependen del plazo de la obra				
2.1.	EQUIPOS				
2.1.2	estación total Leica TS06 R500 nivel óptico Pentax AP-230. Incluye trípode	\$ 136.000,00	1	30%	\$ 40.800,00
2.1.3	y regla	\$ 19.990,00	1	30%	\$ 5.997,00
2.1.4					
2.2.	HERRAMIENTAS				
2.2.1.	hacha 400 mm profesional, hgps 10400	\$ 805,43	5	100%	\$ 4.027,15
2.2.2.	pala de mano ancha	\$ 90,50	10	100%	\$ 905,00
2.2.3.	cinta métrica Redline 5 m, automática con freno 22 mm ancho	\$ 305,08	10	100%	\$ 3.050,80
2.2.4.	set de herramientas Stanley 150 piezas	\$ 17.248,10	1	100%	\$ 17.248,10
2.2.5.	balde de chapa N° 18	\$ 380,97	20	100%	\$ 7.619,40
2.2.6.	nivel de aluminio 45 cm, 3 gotas	\$ 349,16	5	100%	\$ 1.745,80
2.2.7.					
2.3.	INFRAESTRUCTURA				
2.3.1	aire acondicionado individual split de pared bajo perfil, Modelo SMART, 2250 Kcal/h. F / C	\$ 12.891,74	2	50%	\$ 12.891,74
2.3.2	ordenador de escritorio	\$ 25.000,00	2	20%	\$ 10.000,00
2.3.3	Heladera con freezer 311 l ; Ef. En. A	\$ 22.313,00	1	20%	\$ 4.462,60
2.3.4	cartel de obra de chapa hierro N°27, marco pino elliotis 2" x 4", bastidores 1" x 2", anti óxido y 2 manos de sintético	\$ 1.847,84	4	100%	\$ 7.391,36
2.3.5	nivelación y replanteo de terreno	\$ 45.000,00	3	100%	\$ 135.000,00
2.3.6	tanque de polietileno, tricapa, obra, color gris de 1.000 litros. Incluye limpieza y desinfección durante plazo de obra	\$ 4.009,38	1	100%	\$ 4.009,38
2.3.7					

2.4. OTROS					
2.4.1	gastos de oficina central afectadas a la obra	\$ 35.000,00	3	100%	\$ 105.000,00
2.4.2				TOTAL	\$ 360.148,33
3. No amortizables - cuya vida útil se cumple dentro del plazo de obra					
3.1. ASESORAMIENTO					
3.1.1.	impositivo y económico	\$ 25.000,00	3	100%	\$ 75.000,00
3.1.2.	legal y escribanía	\$ 19.000,00	3	100%	\$ 57.000,00
3.1.3.	salud laboral	\$ 15.000,00	3	100%	\$ 45.000,00
3.1.4.	técnico	\$ 20.000,00	3	100%	\$ 60.000,00
3.1.5.					
3.2. ELEMENTOS DE SEGURIDAD					
3.2.1	casco arnés común	\$ 192,56	10	100%	\$ 1.925,60
3.2.2	antiparra PVC policarbonato ventilación directa	\$ 157,76	10	100%	\$ 1.577,60
3.2.3	protector auditivo endoaural siliconado c/ cordel	\$ 100,34	10	100%	\$ 1.003,40
3.2.4	guante Jersey G7/G8 algodón con puntos moteado azul	\$ 46,98	10	100%	\$ 469,80
3.2.5	chaleco flúor anaranjado con reflectivo	\$ 145,58	10	100%	\$ 1.455,80
3.2.6	cono vial Conoflex de 70 cm con reflectivo	\$ 2.346,10	10	100%	\$ 23.461,00
3.2.7	Gabinete para matafuego de 5 kg con vidrio. Medidas 550x240x200 mm. Incluye instalación, adicionales, provisión y recarga	\$ 609,44	2	100%	\$ 1.218,88
3.2.8	botiquín comercial tipo valija construido en chapa horneada con manija, tapa con cierre y bandeja (con contenido)	\$ 1.471,60	3	100%	\$ 4.414,80
3.2.9					
3.3. ELEMENTOS PARA EL PERSONAL OBRERO					
3.3.1	camisa de trabajo 100% algodón peso 190 g ISO9000	\$ 697,16	40	100%	\$ 27.886,40
3.3.2	buzo cuello redondo laboral con puño	\$ 845,64	40	100%	\$ 33.825,60
3.3.3	pantalón de trabajo 100% algodón peso 190g ISO9000	\$ 697,16	40	100%	\$ 27.886,40
3.3.4	bota para hidrocarburo 3/4 de caña	\$ 714,56	40	100%	\$ 28.582,40
3.3.5	bota de goma para lluvia, industrial 1/2 caña con puntera	\$ 830,56	40	100%	\$ 33.222,40
3.3.6					
3.4. ESTUDIOS Y ENSAYOS					
3.4.1	estudio de suelos que incluye dos sondeos de 6 m. de profundidad, trabajos de campo, ensayos de laboratorio e informe técnico	\$ 16.192,37	5	100%	\$ 80.961,85
3.4.2					
3.5. FLETES					
3.5.1	Flete de provisión y retiro, incluye	\$ 7.490,00	5	100%	\$ 37.450,00

	hidrogrúa (pañol, oficina, casilla de vigilancia)				
3.5.2	Traslado equipos pesados	\$ 3.262,67	5	100%	\$ 16.313,36
3.5.3					
3.6	INFRAESTRUCTURA NO REUTILIZABLE				
3.6.2					
3.7	MANO DE OBRA - SUBCONTRATOS GLOBALES				
3.7.1	montaje y desmontaje de contenedores	\$ 12.000,00	4	100%	\$ 48.000,00
3.7.2					
3.8	SELLADOS, SEGUROS, MULTAS, DERECHOS Y GARANTIAS				
3.8.1	compra del pliego licitatorio	\$ 202.673.894,28	1	0,10%	\$ 202.673,89
3.8.2	derechos municipales	\$ 202.673.894,28	1	0,20%	\$ 405.347,79
3.8.3	seguro de responsabilidad civil	\$ 60.802.168,28	1	0,25%	\$ 152.005,42
3.8.4	garantía de ejecución de contrato	\$ 10.133.694,71	1	3,00%	\$ 304.010,84
3.8.5	garantía de fondo de reparos	\$ 10.133.694,71	1	3,00%	\$ 304.010,84
3.8.6	garantía de oferta	\$ 2.026.738,94	1	3,00%	\$ 60.802,17
3.8.7	sellado de contrato de obra	\$ 10.133.694,71	1	0,50%	\$ 50.668,47
3.8.8	visado de planos de obra	\$ 202.673.894,28	1	0,05%	\$ 101.336,95
3.8.9					
3.8.10					
				TOTAL	\$ 2.187.511,67
4.	<i>Provisión a la inspección- para el personal de la inspección</i>				
4.1	EQUIPAMIENTO DE OFICINA				
4.1.1	ordenador de escritorio	\$ 35.000,00	2	50%	\$ 35.000,00
4.1.2	elementos de librería y escritura	\$ 7.000,00	2	100%	\$ 14.000,00
4.1.3	equipos de comunicación	\$ 12.000,00	2	100%	\$ 24.000,00
4.1.4					
4.2	MOVIBILIDAD				
4.2.1	Hilux 2.4 TDI C/S 6 MT 4x2 (150cv) (L16)	\$ 913.900,00	1	30%	\$ 274.170,00
4.2.2	cochera	\$ 1.500,00	3	100%	\$ 4.500,00
4.2.3					
4.3	HOSPEDAJES				
4.3.1	alquileres	\$ 15.000,00	3	100%	\$ 45.000,00
4.3.2					
4.4	OTROS				
4.4.1	seguros por accidentes	\$ 12.000,00	3	100%	\$ 36.000,00
4.4.2	viáticos	\$ 25.000,00	3	100%	\$ 75.000,00
4.4.3					
				TOTAL	\$ 507.670,00
	Total Gastos Generales				\$ 7.888.213,00

Costo de la obra	\$ 135.115.929,52
Porcentaje de incidencia	0,06

11.4 Coeficiente de resumen. Factor k

CALCULO DEL COEFICIENTE DE RESUMEN - FACTOR K			
(a-b-c) COSTO NETO.....			1,0000
(d) GASTOS GENERALES..		DE (1)	0,0576
SUB TOTAL (2).....			1,0576
(e) BENEFICIOS.....	10,00%	DE (2)	0,1058
SUB-TOTAL (3).....			1,1634
(f) I.V.A.....	21,00%	DE (3)	0,2443
TOTAL COEFICIENTE DE RESUMEN (C.R.) = (3) +			1,41
SE ADOPTA.....			1,40

11.4 Presupuesto

PLANILLA DE PRESUPUESTO								
ITEM	DESIGNACIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO	PRECIO	IMP. PARC.	INCIDENCIA	TOTAL
1.	Excavación	m3	785,00	\$ 58,22	\$ 8150	\$ 63.980,68	0,034%	\$ 63.980,68
2.	Hormigón de Limpieza	m3	28,33	\$ 5.416,63	\$ 7.583,28	\$ 214.834,22	0,114%	\$ 214.834,22
3.	Base de hormigón armado	m3	444,93	\$ 8.839,06	\$ 12.374,69	\$ 5.505.869,65	2,91%	\$ 5.505.869,65
4.	Unión metálica	gl	100	\$ 861247,84	\$ 1205.746,98	\$ 1205.746,98	0,637%	\$ 1205.746,98
5.	Instalación del aerogenerador	gl	100	\$ 130.089.098,62	\$ 132.124.738,06	\$ 132.124.738,06	96,29%	\$ 132.124.738,06
6.	Compactación de suelo	m3	294,47	\$ 14,41	\$ 20,18	\$ 5.942,56	0,003%	\$ 5.942,56
7.	Instalaciones complementarias	gl	100	\$ 17.235,83	\$ 24.130,17	\$ 24.130,17	0,013%	\$ 24.130,17
						COSTO - COSTO		\$ 135.103.744,52
						PRESUPUESTO		\$ 189.145.242,32

12. Estudio del Impacto Ambiental y medidas de mitigación

Para la identificación y evaluación de los impactos que pueda tener la construcción del aerogenerador sobre el medio ambiente, es necesario interrelacionar las etapas del proyecto con los factores ambientales existentes. Por lo tanto se deben determinar los factores ambientales que son afectados por la construcción de un aerogenerador.

Para dicha evaluación se analiza primero cada uno de los factores que se estima serán afectados. Luego se construye una matriz de evaluación del Impacto Ambiental, también llamada matriz de Leopold, la cual evalúa mediante una escala de valores cuantitativa el daño que causa una cierta actividad a los factores del ambiente. En el presente trabajo se tomó en consideración: *atmosfera, suelo, agua, vegetación, fauna, ecosistema, factores socio-económicos, impacto visual e impacto sonoro*.

El impacto ambiental puede dividirse en aquel que se produce durante la construcción de la obra y aquel que genera su funcionamiento.

12.1 Evaluación durante la construcción de la obra

12.1.1 *Atmósfera:* Durante la fase de construcción, el transporte de materiales, la instalación y funcionamiento de la maquinaria actuarán negativamente en los niveles de calidad del aire existente. Los movimientos de tierra y la circulación de vehículos, pueden provocar un aumento local de la cantidad de polvo y partículas en suspensión y su posterior depósito sobre el terreno.

El grado de afectación de la atmosfera se considera para el proyecto moderadamente bajo, ya que la obra se realiza en una zona rural abierta. La afectación aumenta durante el funcionamiento del aparato debido a la generación de ruidos molestos. Esto genera una alta contaminación a la atmosfera.

12.1.2 *Suelo:* En la fase de construcción, el suelo se podrá ver afectado durante la ejecución del movimiento de tierras y el acopio de materiales, la implantación de instalaciones auxiliares y la adecuación de caminos de acceso a la zona de actuación ejerce una alteración sobre los suelos. A pesar de ello, no cabría hablar de pérdida de suelo por destrucción sino de deterioro del mismo.

El grado de afectación puede esperarse que sea moderado a alto, por los movimientos de suelo de gran volumen y por el riesgo de que las máquinas derramen líquidos nocivos sobre el suelo del lugar.

12.1.3 Agua: La calidad del agua puede verse afectada en la fase de obras. Los principales parámetros que pueden modificarse son los sólidos disueltos y en suspensión y los nutrientes (debido a los movimientos de tierras) y las grasas e hidrocarburos (por vertidos accidentales en las zonas de almacenamiento y la maquinaria pesada).

El agua se ve afectada especialmente en las primeras actividades de las etapas constructivas que tiene contacto con el suelo. El trabajo tiene un impacto alto sobre el agua.

12.1.4 Vegetación: La vegetación ha de servir como indicador de restricciones ambientales. Por ejemplo, la existencia de especies endémicas o en peligro, o formaciones vegetales raras en el área de estudio, puede aumentar las dedicaciones del proyecto hacia objetivos de conservación o incluso buscar otras alternativas que no supongan la eliminación de las especies más valiosas.

La vegetación se ve afectada por casi todas las actividades de las etapas constructivas que tiene contacto con el suelo. El impacto es medianamente alto sobre la vegetación.

12.1.4 Fauna: En este punto se analizan las especies de fauna presentes en el área de estudio. Dado que la repercusión de las instalaciones eólicas sobre la avifauna puede ser especialmente negativa.

La fauna se ve afectada por casi todas las actividades de las etapas constructivas de la obra, y especialmente afectaran la colocación de alambrado en la etapa de los trabajos finales y posteriormente el funcionamiento del aerogenerador, tiene un impacto importante sobre las aves del lugar. EL impacto sobre la fauna es considerado muy alto.

12.1.5 Ecosistemas: Se ven afectados por casi todas las actividades de las etapas constructivas de la Obra. El grado de afectación es mayor en las Primeras Etapas de Movimiento de Suelo. El impacto sobre los Ecosistemas es medianamente alto.

12.1.6 Factores Socio- Económicos: La Obra en su totalidad impacta fuertemente en la Economía y en el Desarrollo Social del Lugar. Permitirá

crear puestos de trabajo tanto temporales como permanentes, mejorar las condiciones de vida a la gente de la zona.

Además servirá como promoción de las energías renovables en la región. El impacto socio-económico es alto.

PLANILLA DE ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL- MATRIZ DE LEOPOLD										
FACTORES	NATURALES								SOCIO-ECONOM	
ACTIVIDAD	ATMOSFERA	SUELO	AGUA	VEGETALES	FAUNA	ECOSISTEMA	VISUAL	SONIDO	EMPLEO	ECONOMIA
Movimiento de suelo	2	5	3	5	2	2	1	3	3	3
Hormigón de limpieza	2	3	3	2	2	2	0	2	2	3
Armado de la base	3	2	0	0	2	0	0	2	3	3
Hormigonado de la base	3	2	3	2	3	4	0	3	3	3
Instalaciones del aerogenerador	2	1	0	1	5	5	4	4	3	5
Colocación del alambrado	1	2	0	2	5	3	1	0	2	1
Funcionamiento del Molino eólico	5	0	0	0	5	5	5	5	4	5

Figura n°83: Imagen: Tabla: Matriz de Leopold – resumen de la evaluación cuantitativa del impacto ambiental

12.2 Durante el funcionamiento del aerogenerador

12.2.1 Impacto sonoro

El impacto sonoro se puede diferenciar en dos etapas muy diferenciadas del proyecto:

- Incremento de los niveles sonoros, especialmente diurnos, durante la fase de construcción como consecuencia del desplazamiento y trabajos de la maquinaria pesada. Se trata de un impacto de fuerte intensidad pero de carácter temporal ya que se limita a la fase de construcción.
- Incremento de los niveles sonoros diurnos y nocturnos por el funcionamiento del parque eólico.

Los sonidos muy fuertes provocan molestias que van desde el sentimiento de desagrado e incomodidad hasta daños irreversibles en el sistema auditivo. La presión del sonido se vuelve dañina a unos 75 dB y dolorosa a unos 120 dB.

El límite de tolerancia recomendado por la Organización Mundial de la Salud es de 65 dB. El oído necesita algo más de 16 horas de reposo para compensar 2 horas de exposición a 100 dB. Los sonidos de más de 120 dB pueden llegar a dañar a las células sensibles al sonido del oído interno provocando pérdidas de audición.

Pues bien, conocidos estos datos y excluido el impacto sonoro durante la fase de construcción por su naturaleza temporal, debemos señalar que los dB producidos por un moderno aerogenerador en la base de la torre a plena producción son los siguientes:

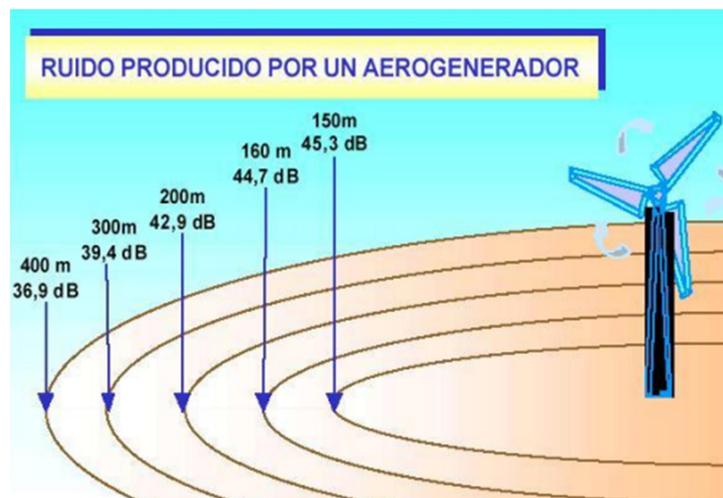


Figura n° 84: valores de intensidad de sonido a diferentes distancias generadas por un aerogenerador

Como puede apreciarse la intensidad de sonido que genera un aerogenerador no es elevada. Lo que si hay que tener en cuenta es la duración y frecuencia del mismo, ya que genera un zumbido que puede provocar molestias a las poblaciones cercanas.

12.2.2 Impacto visual

La presencia de un aerogenerador no tiene otro impacto visual que el debido a la percepción por parte de las personas que se encuentran del lugar. La impresión visual tiene un carácter totalmente subjetivo y por lo tanto difícil de valorar, salvo que se realicen encuestas entre la población. Aun así, las encuestas realizadas sobre el impacto visual de los parques de aerogeneradores han mostrado que la percepción sobre ellos es muy variable y por lo tanto, sin mayorías absolutas, todas las opciones: percepción negativa, positiva o completa indiferencia.

De esta manera, valorar el impacto visual es especialmente difícil. La reducción del impacto visual de los parques eólicos es una tarea compleja, ya que la disposición de los mismos se realiza en función de obtener mejor resultado en cuanto a la acción del viento. El empleo de ciertos colores, los nuevos modelos de torres esbeltas o apantallamientos adecuados desde las rutas de posible observación pueden disminuir notablemente el impacto visual. Sin embargo, nos va a ser imposible que los aerogeneradores de nuestro parque no se vean.

12.3 Medidas preventivas y correctivas para mitigar el impacto ambiental

1. Medidas contra el impacto visual

Las medidas que se aplicará para paliar el impacto visual será la implantación de pantallas vegetales y arbolado urbano.

Las pantallas vegetales pueden ocultar total o parcialmente los aerogeneradores, disminuyendo el impacto visual provocado. Según el estudio realizado por Martin et al. (2012) sobre integración paisajística en carreteras en el que se usaban cuestionarios con fotografías de actuaciones en el paisaje con y sin pantallas vegetales, los encuestados valoraban mejor las fotografías donde se habían ocultado alteraciones en el paisaje mediante vegetación en carreteras. Sin embargo, su éxito queda condicionado por la calidad paisajística de la zona donde se proyecta la pantalla, las características del elemento a ocultar y la diversidad de especies vegetales que conforman la pantalla.

Con el objetivo de disminuir el impacto visual del parque eólico se creará una pantalla vegetal que permita reducir el impacto producido en la población. Debido a las condiciones climáticas y pensando en la sostenibilidad y autonomía en cuanto a mantenimiento y riego de las especies vegetales a implantar, se debe realizar un estudio de especies autóctonas o adaptadas al área de estudio, además de que se adaptan mejor y más rápidamente al medio, necesitan un mantenimiento mínimo.

2. Medidas para la protección de la fauna

Se recomienda la realización de las obras fuera del periodo reproductor de la avifauna, con el objeto de minimizar las molestias de estos trabajos sobre la avifauna del emplazamiento.

Se establecerá un control por parte de los gestores del parque sobre la presencia de carroña en las inmediaciones de las instalaciones con el objeto de minimizar el riesgo de colisión de aves necrófagas contra aerogeneradores y tendidos.

Con el propósito de minimizar la emisión de gases y la producción de ruidos que puedan afectar a las especies faunísticas del entorno inmediato, se procederá a restringir la concentración de maquinaria de obra en la zona mediante la ordenación puntual del tráfico. Asimismo, se procederá a controlar la velocidad de los vehículos de obra en carretera mediante señalización.

3. Medidas para la protección de la calidad del aire

La calidad del aire será afectada durante la fase de construcción de las actuaciones por la emisión de contaminantes de combustión y polvo debido a la actividad de la maquinaria de obra, así como por la emisión de polvo por los movimientos de tierra en los días de fuerte viento, lo que puede provocar molestias en las poblaciones próximas a la zona de obras.

Como medida preventiva para evitar el incremento del nivel de polvo y partículas derivadas de los trabajos de construcción, se prescribirá el riego periódico de los caminos a obra, cúmulos de tierra, etc., que puedan suponer una fuente importante de generación de polvo y partículas.

13. Producción anual de energía. Beneficios

Uno de los objetivos de este proyecto es promocionar la energía limpia en la región, y brindar energía eléctrica a zonas rurales, donde la escases de este recurso y la lejanía con las fuentes de distribución lo hacen muy caro.

Para conocer cuál es la factibilidad económica en la construcción de un aerogenerador es necesario conocer cuál será su producción anual. Para ello cada aerogenerador cuenta con una curva propia que relaciona la velocidad del viento con la potencia generada.

Considerando los registros de velocidades de vientos del lugar así como la curva de potencia vs velocidad del viento propia del aerogenerador, se calculará a continuación la producción anual del molino de viento.

Producción anual de un aerogenerador V90 2 MW

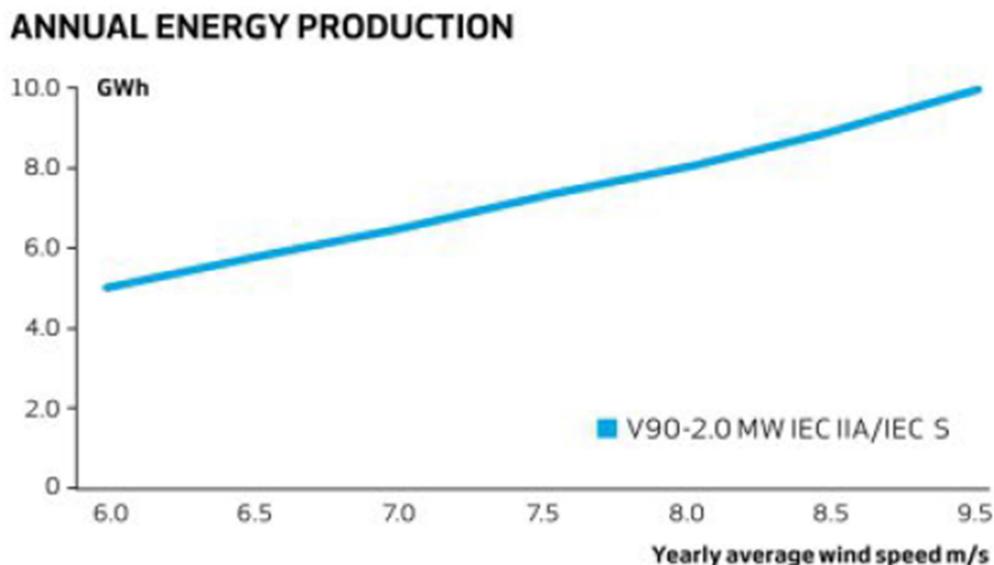


Figura n°:85 Curva potencia generada vs velocidad del viento. Producción anual de Energía para un aerogenerador Vestas V90 de 2 MW

La curva calcula la energía generada anualmente por el aerogenerador considerando una velocidad promedio anual de giro de las aspas.

Considerando los registros de vientos del lugar:

VELOCIDAD PROMEDIO MENSUAL DEL VIENTO ESTACION EXPERIMENTAL INTA CONCORDIA														
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	Annual
1994	Vel.Promedio	3,4	4,7	4,7	4,6	3	3,7	3,6	4,5	4,5	4,3	5,1	3,1	4,1
1995	Vel.Promedio	3	3,3	2,9	4	2,4	3,2	4,5	5	6,8	6,3	4,3	6,7	4,4
1996	Vel.Promedio	6	3,6	2,5	2,8	2,8	3,2	4	4	6,5	5,3	5,2	4,9	4,2
1997	Vel.Promedio	4,8	5,6	4	3	3,6	5,1	4,5	4,1	5,4	6,6	6,1	5,3	4,8
1998	Vel.Promedio	4,6	5	4,1	4,6	3,3	3,3	3,2	4,1	4,5	5	4,5	4,7	4,2
1999	Vel.Promedio	5,3	4,2	4,5	4,8	3,1	3,3	3,9	4,7	5,6	6,3	5,4	6,2	4,8
2000	Vel.Promedio	5,1	4,9	4,4	4,1	4,4	3,6	4,3	3,6	4,8	6,2	5,6	4,7	4,6
2001	Vel.Promedio	4,3	4,8	4,2	4,9	3,9	4,2	4,7	4,2	6,3	5,6	5,6	5,2	4,8
2002	Vel.Promedio	4,2	3,1	3,1	2,3	2,3	2,2	2,7	3,5	3,8	4,2	4,2	4,2	3,3
2003	Vel.Promedio	2,9	3,1	3,4	3,6	3,0	2,9	3,3	3	4,3	5	5,1	5,1	3,7
2004	Vel.Promedio	5,2	5,3	5,2	4,1	4,5	3,8	4,8	4,4	6,2	5,7	5,6	5,7	5,0
2005	Vel.Promedio	5,3	4,9	3,9	2,8	2,2	2	2,7	4,4	3,8	4,6	3,4	4,2	3,7
2006	Vel.Promedio	4,1	3,1	3,4	3,7	3,4	3,7	3,9	3,9	4,5	4,8	5,1	4,1	4,0
2007	Vel.Promedio	4,5	4	4,2	3,5	3,5	3,3	3,6	5,3	4,9	3,8	2,8	3	3,9
2008	Vel.Promedio	2,8	2,5	3,8	4,1	3,8	4,4	4,7	4,6	5,7	5,5	5,1	5,8	4,4
2009	Vel.Promedio	6	4,7	4,2	3,9	3,9	4	4,2	4,7	6	5,8	5,3	5,8	4,9
2010	Vel.Promedio	4,1	4,5	4	4,4	4,4	4,2	4,3	4,7	5,5	4,6	4,3	4,4	4,5
2011	Vel.Promedio	2,6	3,4	4,7	4	3,9	4,3	4,6	9	5,1	5,9	7,7	5,4	5,1
2012	Vel.Promedio	3,1	2,4	3,9	5,1	3,5	4,3	3,4	8,1	7	5,2	3,1	3,6	4,4
2013	Vel.Promedio	3,2	3,1	2,3	2,8	2,6	2	2,2	2,6	6,1	4,5	3,2	2,1	3,1
2014	Vel.Promedio	2,4	2,7	1,9	1,9	1,4	1,7	1,5	1,8	3,2	3,1	-	-	-
	NORMAL	4,2	4,0	3,9	3,9	3,4	3,5	3,9	4,6	5,4	5,3	4,8	4,7	4,3

Figura n° 86: Registro de velocidades de viento anuales

Se observa de los registros anuales, que la velocidad media del viento es de 4,3 m/s, y que la misma es superada durante los meses de agosto, octubre, noviembre, y diciembre. Durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio y julio la velocidades de viento registradas son menores. Se calculará la energía obtenida en función de la velocidad promedio anual.

Considerando que las muestras de velocidades fueron tomadas a 2 m de altura, se considera que a la altura del buje del rotor las mismas son el doble de su valor.

Producción anual

Se tomará una velocidad promedio anual para todos los meses del año. Se afectará dicha velocidad por un factor de 2, para considerar la variación de la velocidad con la altura. Luego se calculará la producción anual de energía que se genera.

$$\text{Vel. Prom} = 4,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 2 = 8,6 \text{ m/s}$$

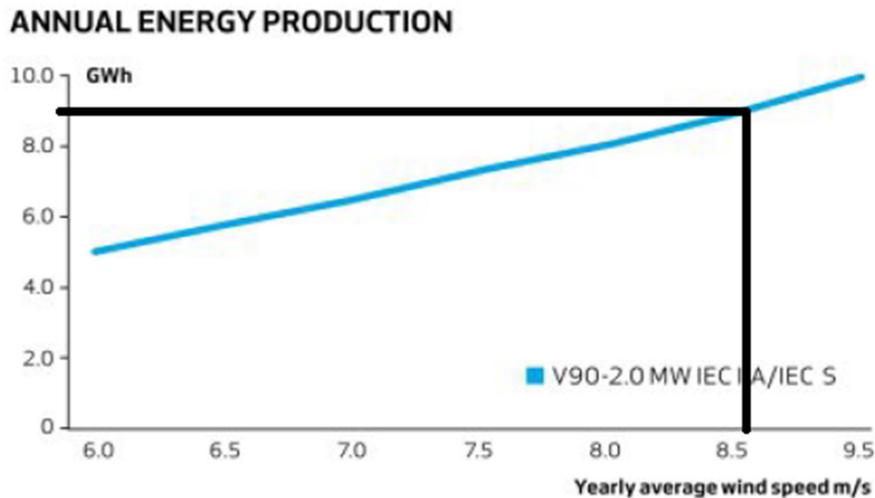


Figura n°87: energía anual producida por un aerogenerador V90-2MW a la velocidad promedio

A la velocidad promedio registrada se producirán 9 GWh de energía anual, lo que equivalen a 9.000 Mega Watts hora de energía.

Para comparar la cantidad de energía obtenida mediante el funcionamiento del aerogenerador, puede nombrarse el ejemplo de “Puerto Yerúa”, un poblado de 1.700 habitantes, el cual consume anualmente 7.456 MWh. Por lo cual la producción anual del aerogenerador podría cubrir dicha demanda y enviar la energía sobrante a la red.

Uso de la energía obtenida

El objetivo principal de la implantación del aerogenerador es la promoción de una energía limpia, cuyo desarrollo está en constante evolución y en el marco de la Ley nacional 27.191 de fomento para el uso de fuentes renovables de energía para la producción de energía eléctrica, la cual incentiva el aprovechamiento de estos recursos.

En la región el sistema de distribución de energía será abierto, es decir conectado al sistema tradicional. Tendrá como principal objetivo distribuir energía aquellas zonas rurales donde aún no hay, y además como sistema alternativo para aquellas zonas cercanas como “Los Charrúas” o “La Criolla”. La energía que no es utilizada por estos destinos es devuelta a la red de distribución.



Figura n° 88: Imagen satelital. En rojo: lugar de emplazamiento del aerogenerador. Verde: lugares de abastecimiento de la energía obtenida: Los Charrúas, La Criolla y zonas rurales.

Anexo 1 - Ficha Técnica de Aerogenerador Vestas V90- 2.0 MW – IEC II A/ IEC S

V90-2.0 MW™ IEC IIA/IEC S

Facts & figures

POWER REGULATION	Pitch regulated with variable speed
-------------------------	-------------------------------------

OPERATING DATA	
Rated power	2,000 kW
Cut-in wind speed	4 m/s
Cut-out wind speed	25 m/s
Re-cut-in wind speed	23 m/s
Wind class	IEC IIA/IEC S
Standard operating temperature range from -20°C to 40°C	

SOUND POWER	
Maximum	1.04 dB*
* Sound Power Modes available	

ROTOR	
Rotor diameter	90 m
Swept area	6,362 m²
Air brake	full blade feathering with 3 pitch cylinders

ELECTRICAL	
Frequency	50/60 Hz
Generator type	4-pole (50 Hz)/6-pole (60 Hz) doubly fed generator, sliprings

GEARBOX	
Type	one planetary stage and two helical stages

TOWER	
Hub heights	80 m (IEC S) Site and country specific

NACELLE DIMENSIONS	
Height for transport	4 m
Height installed	5.4 m

HUB DIMENSIONS	
Max. transport height	3.4 m
Max. transport width	4 m
Max. transport length	4.2 m

BLADE DIMENSIONS	
Length	44 m
Max. chord	3.9 m

Max. weight per unit for transportation 70 metric tonnes

TURBINE OPTIONS

- Power Optimised Modes up to 2.2 MW (site specific)
- Condition Monitoring System
- Vestas Ice Detection
- Smoke Detection
- Shadow Detection
- Low Temperature Operation to -30°C
- Aviation Lights
- Aviation Markings on the Blades
- Vestas IntelliLight*

ANNUAL ENERGY PRODUCTION

Yearly average wind speed (m/s)	Annual Energy Production (GWh)
6.0	4.5
6.5	5.5
7.0	6.5
7.5	7.5
8.0	8.5
8.5	9.5
9.0	10.0

Ficha técnica Aerogenerador de 2 MW			
Datos operativos		Cant	Unidad
Energia obtenida		2	MW
Velocidad de arranque		4	m/s
velocidad de frenado		25	m/s
Viento tipo		IEC IIA/ IEC S	
Temperatura standar de operacion		0	
Rotor			
Diametro		90	m
Area de barrido		6362	m ²
Torre			
altura		80	m
Nacelle			
larga para transportar		4	m
altura instalada		5,4	m
largo		10,4	m
ancho		3,5	m
Alas			
largo		44	m
ancho max		3,9	m

Anexo 2 -Deformada de la estructura

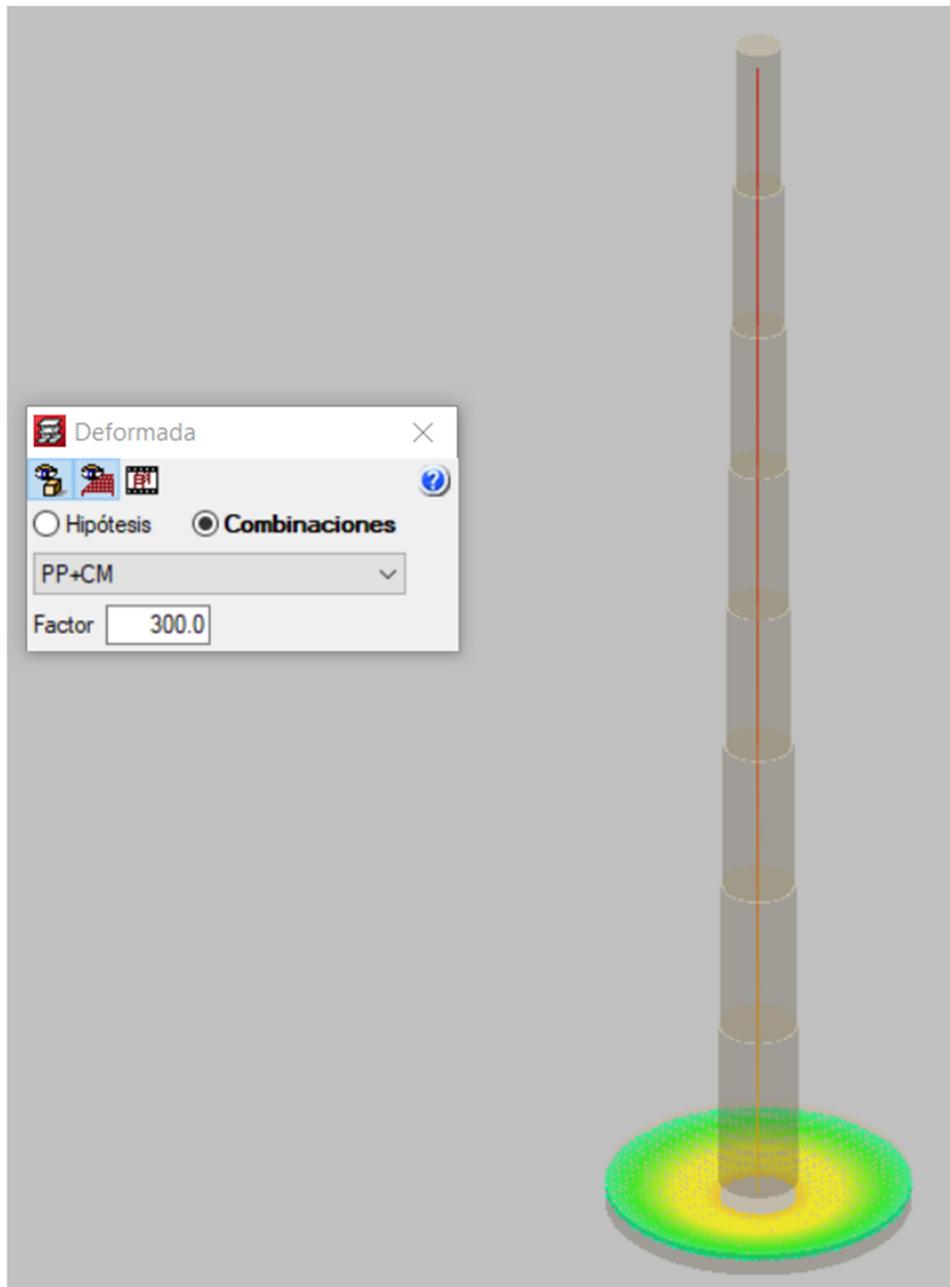


Imagen de la deformación de la base debido al peso propio y la carga muerta del suelo

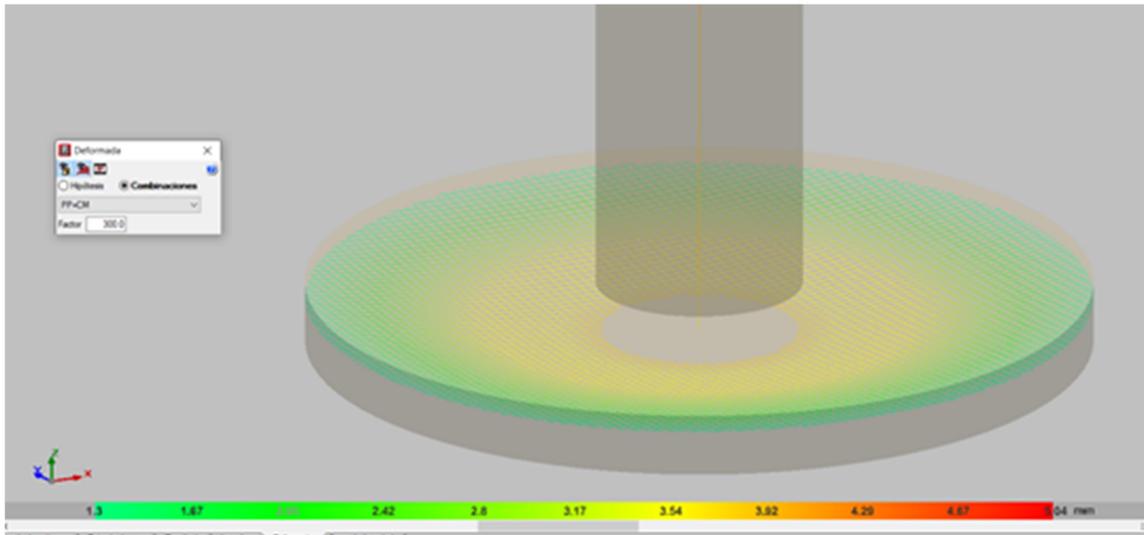


Imagen de la deformada bajo estado de cargas de peso propio y carga muerta

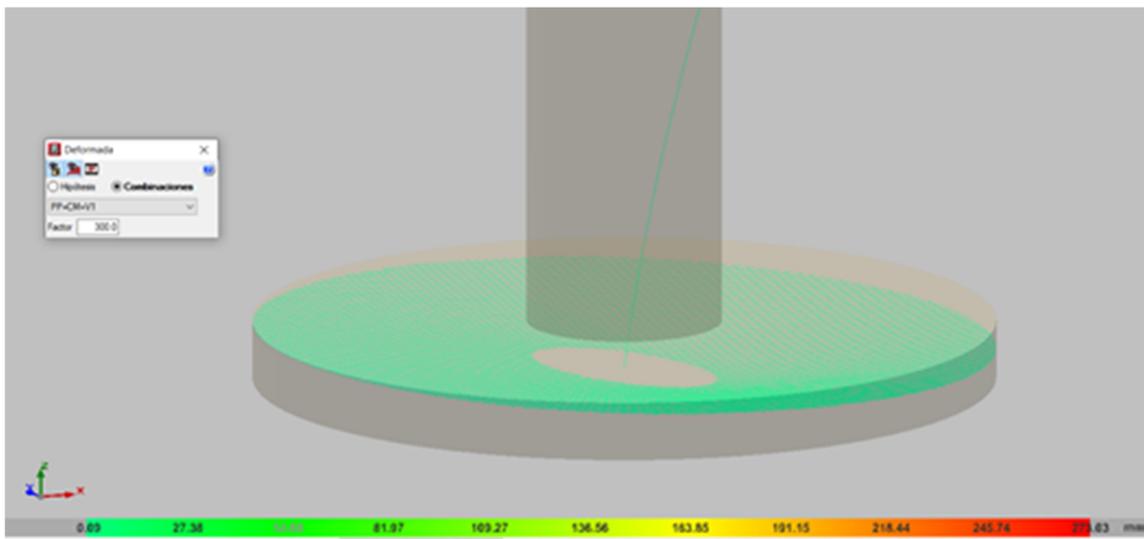


Imagen de la deformada bajo estado de cargas de peso propio, carga muerta y carga del viento

Anexo 3 – Información sobre el cálculo estructural mediante el programa Cypecad

1.- DATOS GENERALES DE LA ESTRUCTURA

Proyecto: nuevo

Archivo: nuevo

2.- NORMAS CONSIDERADAS

Hormigón: CIRSOC 201-2005

Aceros conformados: AISI S100-2007 (LRFD)

Aceros laminados y armados: ANSI/AISC 360-10 (LRFD)

Categoría de uso: General

3.- ACCIONES CONSIDERADAS

3.1.- Gravitatorias

Planta	S.C.U (kN/m ²)	Cargas permanentes (kN/m ²)
Losa 9	0.0	0.0
Losa 8	0.0	0.0
Losa 7	0.0	0.0
Losa 6	0.0	0.0
Losa 5	0.0	0.0
Losa 4	0.0	0.0
Losa 3	0.0	0.0
Losa 2	0.0	0.0
Losa 1	0.0	9.0
Fundación	0.0	0.0

3.2.- Viento

Se ha tenido en cuenta la acción del viento mediante cargas aplicadas en las siguientes hipótesis: 'V 1', 'V 2', 'V 3' y 'V 4'.

3.3.- Sismo

Sin acción de sismo

3.4.- Hipótesis de carga

Automáticas	Peso propio Cargas permanentes Sobrecarga de uso	
Adicionales	Referencia	Naturaleza
	V 1	Viento
	V 2	Viento
	V 3	Viento
	V 4	Viento

3.5.- Cargas horizontales y en cabeza de columnas

3.5.1.- Cargas horizontales en columnas

Referencia columna	Dirección de la carga	Tipo de carga	Hipótesis	Valor	Cota (m)
--------------------	-----------------------	---------------	-----------	-------	----------

Referencia columna	Dirección de la carga	Tipo de carga	Hipótesis	Valor	Cota (m)
C1	X Local	Carga puntual	V 1	712.00 kN	80.00
	Y Local	Carga puntual	V 2	-712.00 kN	80.00
	X Local	Carga puntual	V 3	-712.00 kN	80.00
	Y Local	Carga puntual	V 4	712.00 kN	80.00

4.- ESTADOS LÍMITE

E.L.U. de rotura. Hormigón	CIRSOC 201-2005
E.L.U. de rotura. Hormigón en cimentaciones	Configuración de la cubierta: General
Tensiones sobre el terreno	Acciones características
Desplazamientos	

5.- SITUACIONES DE PROYECTO

Para las distintas situaciones de proyecto, las combinaciones de acciones se definirán de acuerdo con los siguientes criterios:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} G_{kj} + \gamma_P P_k + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Qi} Q_{ki}$$

- Donde:

G_k Acción permanente

P_k Acción de pretensado

Q_k Acción variable

γ_G Coeficiente parcial de seguridad de las acciones permanentes

γ_P Coeficiente parcial de seguridad de la acción de pretensado

$\gamma_{Q,1}$ Coeficiente parcial de seguridad de la acción variable principal

$\gamma_{Q,i}$ Coeficiente parcial de seguridad de las acciones variables de acompañamiento

5.1.- Coeficientes parciales de seguridad (γ) y coeficientes de combinación (ψ)

Para cada situación de proyecto y estado límite los coeficientes a utilizar serán:

E.L.U. de rotura. Hormigón: CIRSOC 201-2005

E.L.U. de rotura. Hormigón en cimentaciones: CIRSOC 201-2005

(9-1)		
	Coeficientes parciales de seguridad (γ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.400	1.400
Sobrecarga (Q)		
Viento (Q)		

(9-2)		
	Coeficientes parciales de seguridad (γ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.200	1.200
Sobrecarga (Q)	0.000	1.600
Viento (Q)		

(9-3a)		
	Coeficientes parciales de seguridad (γ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.200	1.200
Sobrecarga (Q)	0.000	0.500
Viento (Q)		

(9-3b)		
	Coeficientes parciales de seguridad (γ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.200	1.200
Sobrecarga (Q)		
Viento (Q)	0.000	0.800

(9-4)		
	Coeficientes parciales de seguridad (γ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.200	1.200
Sobrecarga (Q)	0.000	0.500
Viento (Q)	1.600	1.600

(9-6)		
	Coeficientes parciales de seguridad (γ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	0.900	0.900
Sobrecarga (Q)		
Viento (Q)	0.000	1.600

Tensiones sobre el terreno

Acciones variables sin sismo		
	Coeficientes parciales de seguridad (γ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.000	1.000
Sobrecarga (Q)	0.000	1.000
Viento (Q)	0.000	1.000

Desplazamientos

Acciones variables sin sismo		
	Coeficientes parciales de seguridad (γ)	
	Favorable	Desfavorable
Carga permanente (G)	1.000	1.000
Sobrecarga (Q)	0.000	1.000
Viento (Q)	0.000	1.000

5.2.- Combinaciones

■ Nombres de las hipótesis

PP Peso propio

CM Cargas permanentes

Qa Sobrecarga de uso

V 1 V 1

V 2 V 2

V 3 V 3

V 4 V 4

■ E.L.U. de rotura. Hormigón

■ E.L.U. de rotura. Hormigón en cimentaciones

Comb.	PP	CM	Qa	V 1	V 2	V 3	V 4
1	1.400	1.400					
2	1.200	1.200					
3	1.200	1.200	1.600				
4	1.200	1.200		1.600			
5	1.200	1.200	0.500	1.600			
6	1.200	1.200			1.600		
7	1.200	1.200	0.500		1.600		
8	1.200	1.200				1.600	
9	1.200	1.200	0.500			1.600	
10	1.200	1.200					1.600
11	1.200	1.200	0.500				1.600
12	0.900	0.900					
13	0.900	0.900		1.600			
14	0.900	0.900			1.600		
15	0.900	0.900				1.600	
16	0.900	0.900					1.600

■ Tensiones sobre el terreno

■ Desplazamientos

Comb.	PP	CM	Qa	V 1	V 2	V 3	V 4
1	1.000	1.000					
2	1.000	1.000	1.000				
3	1.000	1.000		1.000			
4	1.000	1.000	1.000	1.000			
5	1.000	1.000			1.000		
6	1.000	1.000	1.000		1.000		
7	1.000	1.000				1.000	
8	1.000	1.000	1.000			1.000	
9	1.000	1.000					1.000
10	1.000	1.000	1.000				1.000

6.- DATOS GEOMÉTRICOS DE GRUPOS Y PLANTAS

Grupo	Nombre del grupo	Planta	Nombre planta	Altura	Cota
9	Losa 9		9 Losa 9	10.00	80.00
8	Losa 8		8 Losa 8	10.00	70.00
7	Losa 7		7 Losa 7	10.00	60.00

Grupo	Nombre del grupo	Planta	Nombre planta	Altura	Cota
6	Losa 6	6	Losa 6	10.00	50.00
5	Losa 5	5	Losa 5	10.00	40.00
4	Losa 4	4	Losa 4	10.00	30.00
3	Losa 3	3	Losa 3	10.00	20.00
2	Losa 2	2	Losa 2	11.00	10.00
1	Losa 1	1	Losa 1	1.50	-1.00
0	Fundación				-2.50

7.- LOSAS Y ELEMENTOS DE FUNDACIÓN

Plateas fundación	Altura (cm)	Módulo balasto (kN/m ³)	Tensión admisible en situaciones persistentes (MPa)	Tensión admisible en situaciones accidentales (MPa)
Todas	150	50000.00	0.200	0.300

8.- MATERIALES UTILIZADOS

8.1.- Hormigones

Elemento	Hormigón	f_{ck} (MPa)	γ_c	Tamaño máximo del árido (mm)	E_c (MPa)
Todos	H-40	40	1.00	15	29725

8.2.- Aceros por elemento y posición

8.2.1.- Aceros en barras

Elemento	Acero	f_{yk} (MPa)	γ_s
Todos	ADN 420	420	1.00

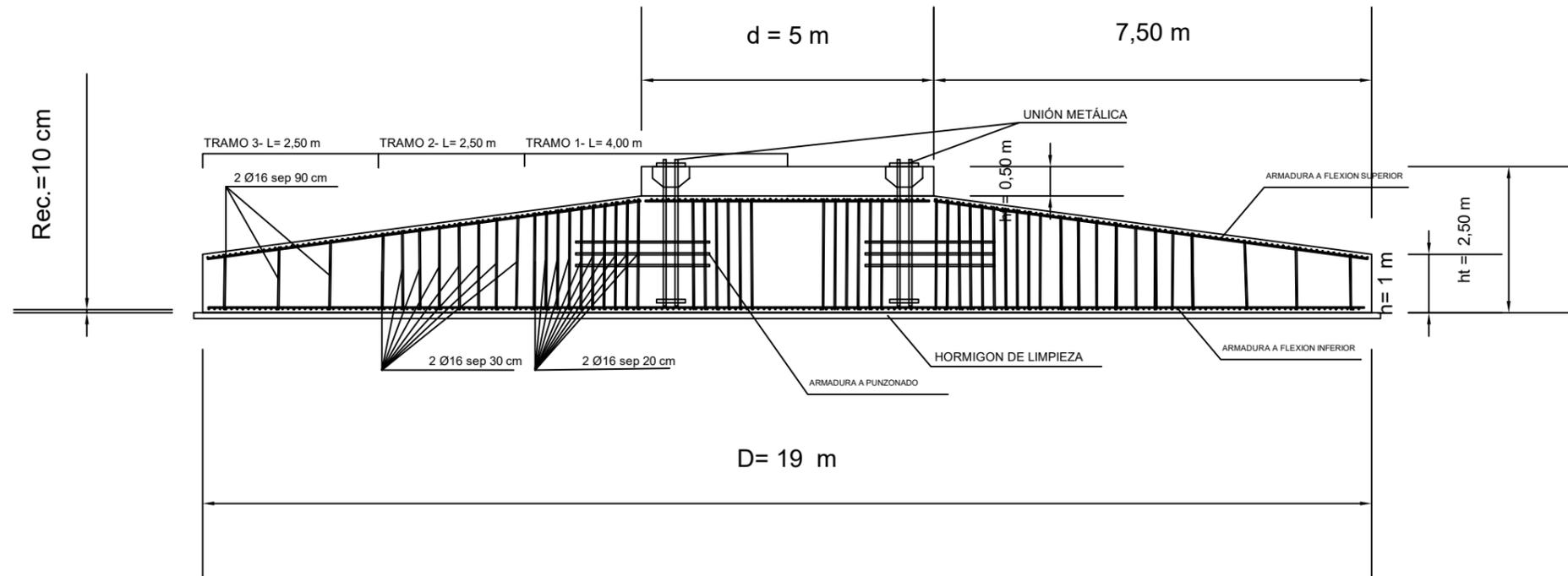
8.2.2.- Aceros en perfiles

Tipo de acero para perfiles	Acero	Límite elástico (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
Acero conformado	ASTM A 36 36 ksi	250	203
Acero laminado	ASTM A 36 36 ksi	250	200

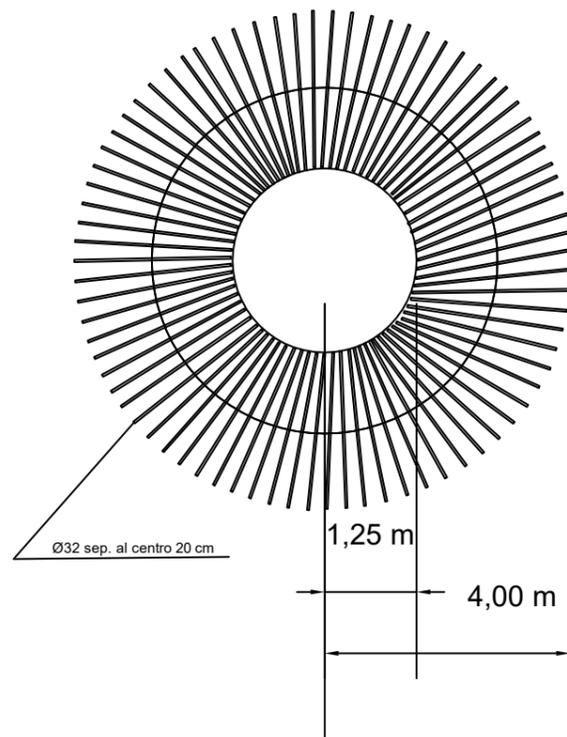
Bibliografía

- Norma: Estándar “Suport Structur for wind turbines”
Editorial: DVNGL- ST- 0126- Abril 2016.
- CIRSOC- 201 Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón.
Editado por INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial) – Julio 2005.
- CIRSOC- 202- Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre estructuras.
Editado por INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial) – Julio 2005.
- “Principios de Ingeniería de cimentaciones” Braja Das - quinta edición-
Editorial CENGAGE Learning – Julio 2010.
- “Ese material llamado hormigón” de la Asociación Argentina de Tecnología del
Hormigón.
- “Con el viento a favor” del Ing. Ramón Mendizabal.
Editado por Fundación STEYCO- diciembre 2015.
- “Algunos aspectos relevantes en el diseño y construcción de bases aisladas para
molinos de aerogeneradores” de Ing. Hugo Donini - Ing. Rodolfo Orler.
Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural- septiembre 2014.
- “Desig of wind turbine foundation Slabs“de Peka Maunu.
Trabajo de tesis - Universidad Tecnológica de Lulea, Suecia – mayo 2008.
- “Diseño y cálculo preliminar de la torre de un aerogenerador” de Raquel Galvez
Roman.
Trabajo de tesis - Universidad Carlos III de Madrid- julio 2005.

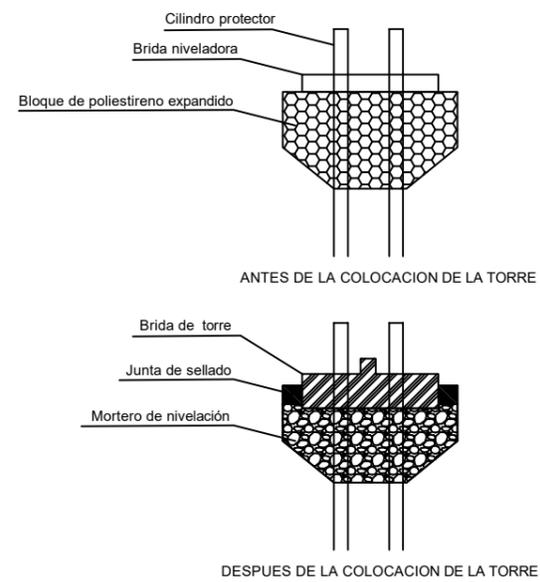
Sección transversal



Detalle armadura punzonado
Escala: 1:100



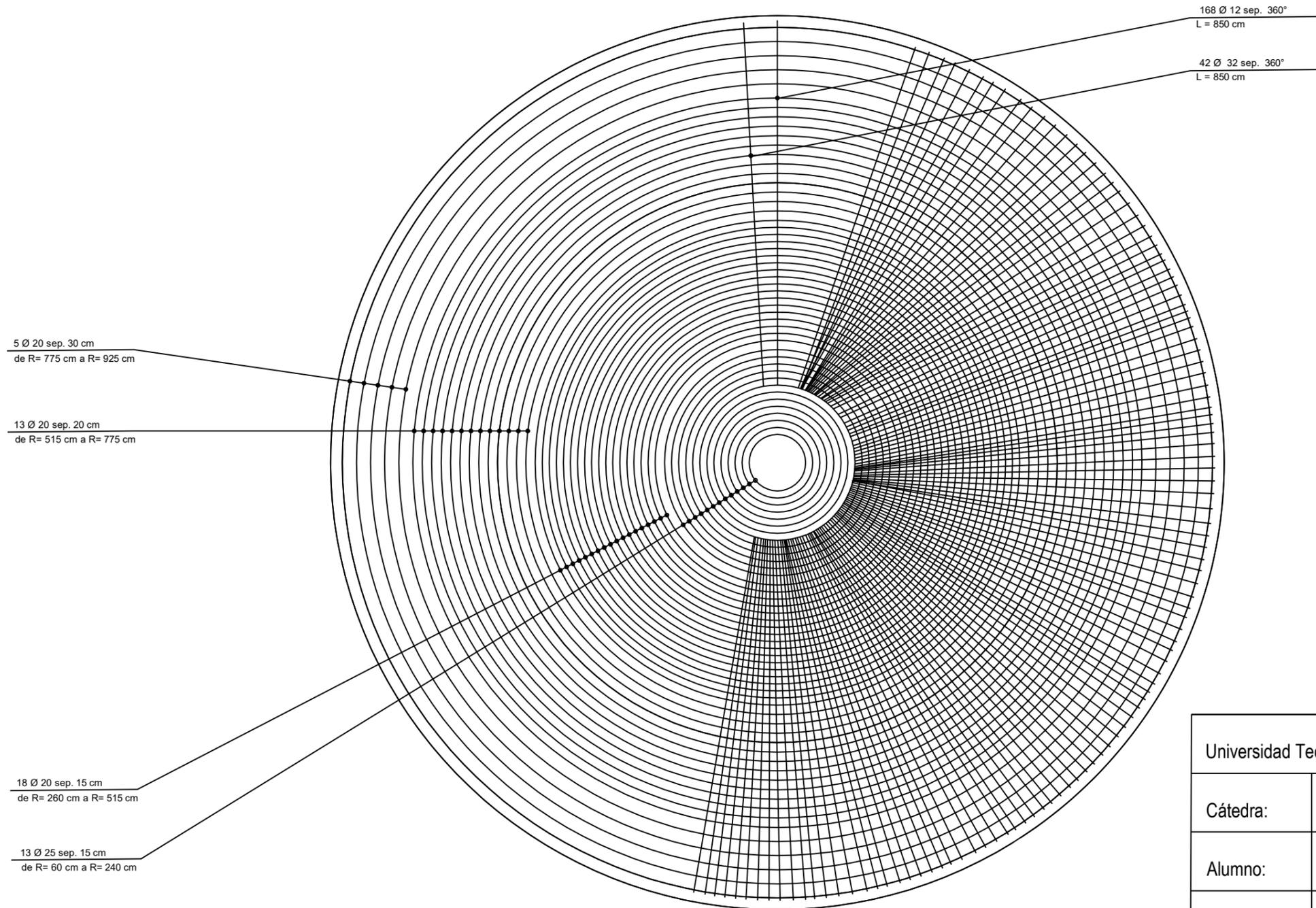
Detalle montaje
Escala: 1:25



Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Concordia

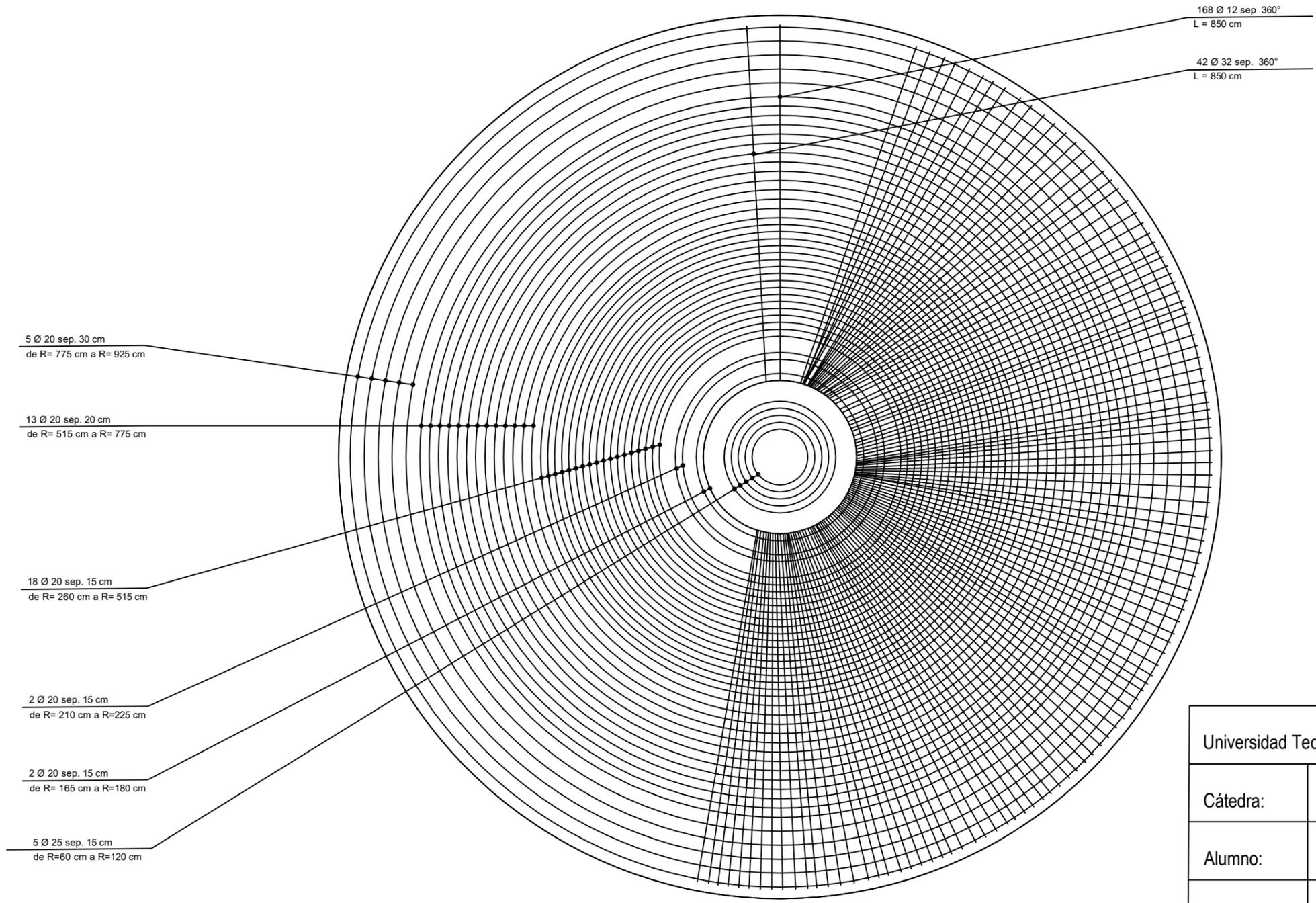
Cátedra:	Proyecto Final	AÑO: 2020
Alumno:	Eugenio Sauré	
Proyecto:	"Base para un Aerogenerador"	
Nombre:	Sección transversal	
Escala:	1:100	H° H- 40 MPA
N° Plano	1	Acero ADN 420

ARMADO INFERIOR

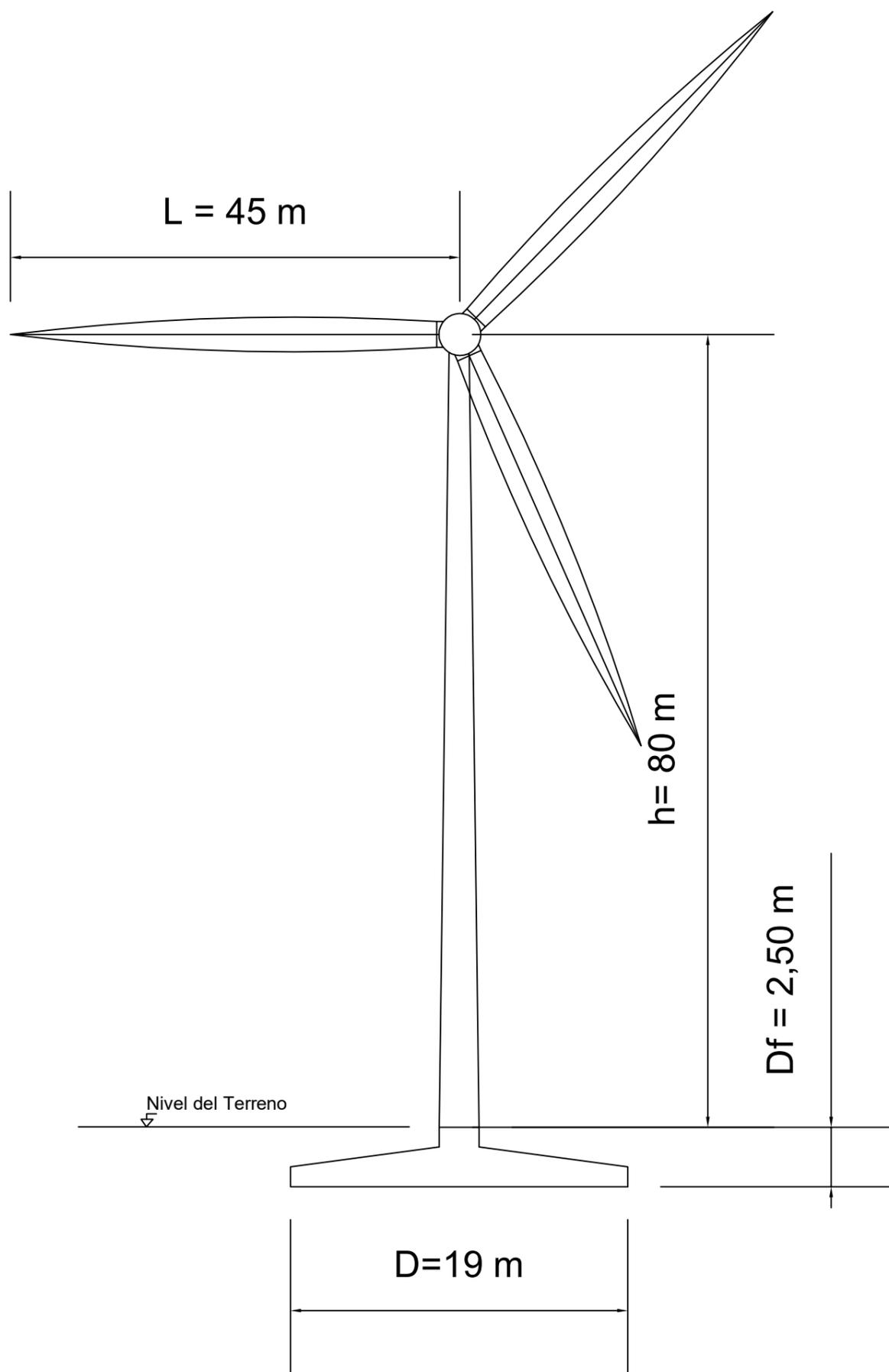


Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Concordia		
Cátedra:	Proyecto Final	AÑO: 2020
Alumno:	Eugenio Sauré	
Proyecto:	"Base para un Aerogenerador"	
Nombre:	Armadura a flexión inferior	
Escala:	1:100	H° H- 40 MPA
N° Plano	3	Acero ADN 420

ARMADO SUPERIOR



Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Concordia		
Cátedra:	Proyecto Final	AÑO: 2020
Alumno:	Eugenio Sauré	
Proyecto:	"Base para un Aerogenerador"	
Nombre:	Armadura a flexión superior	
Escala:	1:100	H° H- 40 MPA
N° Plano	2	Acero ADN 420



Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Concordia		
Cátedra:	Proyecto Final	AÑO: 2020
Alumno:	Eugenio Sauré	
Proyecto:	"Base para un Aerogenerador"	
Nombre:	Esquema de aerogenerador y fundación	
		H° H- 40 MPA
N° Plano	4	Acero ADN 420