



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estudio de una tensoestructura y  
determinación de coeficientes de  
presión en túnel de viento para  
diseño estructural**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Angel Xavier Trejo Sandoval

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Roberto Gómez Martínez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024



# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
INTRODUCCIÓN.....	VII
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN A LAS TENSO-ESTRUCTURAS .....	1
I.1 Definición de tensoestructura .....	2
I.1.1 Clasificación .....	2
I.1.2 Geometría.....	4
I.1.3 Materiales.....	5
I.2 Componentes estructurales .....	5
I.3 Etapas de diseño de una tensoestructura .....	6
I.4 Fallas típicas .....	7
I.5 Referencias .....	11
CAPÍTULO II. ESTUDIO DE TENSOESTRUCTURAS BAJO EFECTOS DEL VIENTO .....	12
II.1 Breve explicación sobre la metodología para el diseño estructural .....	12
II.2 Metodología general del análisis de los efectos del viento (presiones) .....	13
II.3 Determinación de cargas de viento para tensoestructuras.....	15
II.3.1 Códigos y reglamentos .....	15
II.3.2 Herramientas computacionales.....	16
II.4 Otras publicaciones .....	17
II.5 Referencias .....	17
CAPÍTULO III. PRUEBA DE LABORATORIO EN TÚNEL DE VIENTO.....	19
III.1 Descripción del túnel de viento .....	19
III.1.1 Historia y antecedentes.....	20

III.1.2 Clasificación.....	21
III.1.3 Túnel de viento del II-UNAM.....	25
III.2 Características del modelo .....	26
III.3 Parámetros de la prueba .....	27
III.3.1 Velocidad de diseño .....	28
III.3.2 Tiempo de muestreo.....	28
III.3.3 Ángulos de análisis.....	28
III.4 Parámetros y leyes de similitud .....	28
III.4.1 Similitud dinámica .....	28
III.4.2 Similitud cinética.....	29
III.4.3 Similitud geométrica .....	30
III.5 Procedimiento de ensayo experimental en túnel de viento.....	30
III.5.1 Tubo Pitot.....	30
III.5.2 Instrumentación .....	30
III.5.3 Adquisición de datos .....	33
III.5.4 Procesamiento de datos .....	33
III.5.5 Cálculo de coeficientes de presión .....	34
III.5.6 Cálculo de coeficientes de presión neta .....	34
III.6 Referencias.....	34
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	36
IV.1 Dirección 20°, 300 rpm .....	36
IV.2 Dirección 45°, 300 rpm. ....	38
IV.3 Dirección 70°, 300 rpm. ....	40
IV.4 Comparación entre coeficientes para una misma dirección y diferentes velocidades. .....	42

IV.5 Variación de los coeficientes conforme a la dirección del viento .....	43
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES .....	47
ANEXO 1. Gráficas de coeficientes de presión neta.....	50
ANEXO 2. Esquemas de extrapolación de coeficientes en superficie. ....	66

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cubierta del estadio Rey Fahd. ....	2
Figura 2. Pabellón principal, diseñado por el arquitecto Frei Otto, 1967.....	3
Figura 3. Tensoestructura de membrana.....	3
Figura 4. Esquema de etapas de diseño para una tensoestructura. ....	6
Figura 5. Falla en material textil.....	8
Figura 6. Colapso de elemento de soporte.....	9
Figura 7. Esquema para coeficientes de cubiertas con forma de paraboloides hiperbólicas, figura 4.7 MDOC C.1.4 2020.....	16
Figura 8. Interfaz gráfica del programa computacional RWIND.....	17
Figura 9. Diagrama de la máquina de soplado de Kernot (1983).....	21
Figura 10. Planta general del túnel de viento del LemAT.....	25
Figura 11. Medidas de modelo. ....	27
Figura 12. Numeración de puntos de muestreo. ....	31
Figura 13. Instrumentación de modelo, vista en planta.....	32
Figura 14. Instrumentación del modelo, vista en elevación. ....	32
Figura 15. Direcciones de incidencia del viento durante el análisis.....	33
Figura 16. Variación del coeficiente de presión neta para el punto 1 de muestreo, dirección de 20° y.....	36
Figura 17. Variación del coeficiente de presión neta para el punto 17 de muestreo, dirección de 20° y.....	37
Figura 18. Extrapolación de la variación de los coeficientes de presión neta, 20° y 300 rpm. ....	38
Figura 19. Variación del coeficiente de presión neta para el punto 1 de muestreo, dirección de 45° y.....	39
Figura 20. Variación del coeficiente de presión neta para el punto 17 de muestreo, dirección de 45° y.....	39
Figura 21. Extrapolación de la variación de los coeficientes de presión neta, 45° y 300 rpm. ....	40

Figura 22. Variación del coeficiente de presión neta para el punto 1 de muestreo, dirección de 70° y.....	41
Figura 23. Variación del coeficiente de presión neta para el punto 17 de muestreo, dirección de 70° y.....	41
Figura 24. Extrapolación de la variación de los coeficientes de presión neta, 70° y 300 rpm. ....	42
Figura 25. Comparación entre coeficientes de presión en el punto 1,.....	43
Figura 26. Comparación entre coeficientes de presión neta para 20°, 45° y 70°. ....	44
Figura 27. Variación del coeficiente promedio para el punto 1, 300 rpm.....	44
Figura 28. Variación de los coeficientes promedio en 300 rpm. ....	45

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de presión neta para cubiertas con forma de paraboloides hiperbólicos, MDOC C.1.4 2020 .....	15
Tabla 2. Ventajas y desventajas de túneles de viento con topología de circuito cerrado y abierto. ....	22
Tabla 3. Clasificación común de túneles de viento con base en su tipología.....	24
Tabla 4. Clasificación con base en la velocidad de operación del flujo al interior del túnel. ....	24

# INTRODUCCIÓN

Durante el presente trabajo, se describirá el proceso del cálculo de los coeficientes de presión neta para una tensoestructura, a partir del análisis de resultados obtenidos en pruebas de túnel de viento.

Durante el proceso de concepción, diseño arquitectónico, así como diseño y revisión estructural de cualquier estructura, es de suma importancia considerar los efectos que obrarán sobre esta, debido a cualquier acción accidental a la que se encuentre vulnerable para realizar una correcta estimación de sus efectos y, con ellos, encaminarse hacia un diseño estructural seguro y económico. Una de estas acciones accidentales es el viento. Se debe prestar especial atención cuando debido a la estructuración, materiales y uso de la estructura, esta resulte con una tipología que ocasione una alta sensibilidad a los efectos del viento. Algunos tipos de estas estructuras son: carpas que sirven de cubiertas en grandes claros, naves industriales de grandes dimensiones, techos aislados, estructuras sumamente esbeltas, o en general, elementos de fachada con grandes extensiones de superficie. En este trabajo, se revisarán los efectos sobre una *tensoestructura*.

Las tensoestructuras presentan una variada gama de formas y configuraciones, por lo que resulta complicado el generalizar los efectos del viento sobre ellas. Por otra parte, su frecuencia de uso es, sustancialmente menor, que el de otro tipo de estructuras como edificios de geometrías regulares, puentes, o naves industriales. Por los dos factores anteriores, no existe un compendio suficiente de investigación sobre su comportamiento ante las incidencias del viento. En algunos códigos, por ejemplo, se muestran coeficientes de presión para una geometría muy particular: el paraboloide hiperbólico; sin embargo, no se exploran otro tipo de geometrías, ni se emiten otras recomendaciones de análisis más que las pruebas en túnel de viento o su revisión en programas especializados en dinámica de fluidos computacional, que, en ambos casos, son recursos que no se encuentran a la mano de todos los ingenieros.

El objetivo principal de este trabajo es determinar los coeficientes de presión neta en una tensoestructura, y con ello entender su comportamiento ante diferentes ángulos de incidencia del viento, así como la comparación entre dos velocidades distintas de este.

Como primer paso, se describen las características principales tanto geométricas, así como de estructuración y materiales, con las que comúnmente se diseñan y construyen las tensoestructuras. Posteriormente, revisamos la metodología de análisis tanto estructural, así como para la determinación de efectos de viento en cualquier tipo de estructura, profundizando en las particularidades aplicables a una tensoestructura; así mismo, se revisa la reglamentación vigente aplicable. Después, ahondamos en la definición de un túnel de viento y en la descripción de aquel ocupado para la prueba; paralelamente, se describen las características del modelo utilizado, los parámetros de la prueba (velocidad, tiempo y ángulos de muestreo) y las leyes de similitud; culminando en la revisión del procedimiento experimental. Más adelante, se muestran los resultados procesados para los coeficientes de presión neta por medio de gráficas y figuras en escala de colores, comparando los valores obtenidos en un mismo punto de muestreo, para diferentes direcciones de incidencia y velocidades del viento. Finalmente, se emiten conclusiones y recomendaciones sobre los efectos del viento sobre la tensoestructura, y sus coeficientes de presión neta.

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN A LAS TENSO-ESTRUCTURAS

Las denominadas *velarias*, *membranas arquitectónicas*, *coberturas tensionadas*, *estructuras textiles o tensoestructuras*, son estructuras ligeras elaboradas de diferentes materiales textiles en combinación con cables y perfiles estructurales ligeros. Su principal ventaja frente a otros sistemas de cubiertas es que pueden cubrir amplios claros con un bajo peso por metro cuadrado lo cual se refleja en bajos costos de construcción. Adicional a lo anterior, son estructuras con un alto nivel de flexibilidad en el diseño, es decir, permite a los diseñadores experimentar con formas arquitectónicas complejas que, con otros materiales y sistemas constructivos, resultaría en un análisis más complejo y con un alto costo.

Desde el origen de la civilización el ser humano ha buscado refugiarse de las inclemencias del tiempo. En la antigüedad construían refugios con pieles y huesos de animales que se caracterizaban por su sencillo proceso de montaje y desmontaje, debido al estilo de vida nómada de los primeros grupos de hombres. Un ejemplo que ha perdurado hasta la actualidad, son los *tipis* en la cultura de los americanos nativos, o las viviendas de los pueblos mongoles al norte de China y Rusia. Con la evolución en la fabricación de telas y técnicas constructivas, en la edad media se erigían carpas medievales hechas de madera y telas.

Sin embargo, fue hasta el desarrollo de materiales textiles sintéticos y el uso del acero estructural, que el uso de tensoestructuras se popularizó. Actualmente, podemos verlas en lugares como estadios, auditorios al aire libre, hoteles, pasarelas, aeropuertos, entre otros; o pequeñas cubiertas y marquesinas en restaurantes o pasillos. En la figura 1 podemos ver una cubierta del estadio Rey Fahd en Arabia Saudita, el cual cubre una superficie de 47 000 metros cuadrados.



Figura 1. Cubierta del estadio Rey Fahd.

## I.1 Definición de tensoestructura

Desde un enfoque estructural, podemos definirla como un sistema de cubierta ligera, con geometrías de doble curvatura y que cuyos elementos estructurales trabajan únicamente a tensión o compresión, por lo cual se pueden cubrir grandes claros con cantidades mínimas de material, y, por lo tanto, de costos y tiempo de construcción.

### I.1.1 Clasificación

Existen múltiples clasificaciones para este tipo de estructuras, dependiendo de los materiales con que se fabrican, la forma que tienen, o el sistema estructural en el que se basan (Moore, 2000). A continuación, se presentan aquellos criterios de interés para este trabajo.

#### *Por la distribución de sus elementos resistentes*

- Estructuras de cables. Este tipo de tensoestructuras están construidas mediante redes o mallas de cables, que debido a la naturaleza de sus materiales son el tipo con mayor resistencia. Pueden estar cubiertos por otros materiales como acrílicos, madera, entre otros. Existen variantes, que pueden contener elementos rígidos como perfiles tubulares que trabajan a compresión, o *redes de cables*, en las que los elementos forman patrones triangulares para dar estabilidad. En la figura 2 se muestra el pabellón principal en la Expo Montreal de 1967. Se aprecian las redes de cables y por debajo un material textil más ligero que no cumple ninguna función estructural.

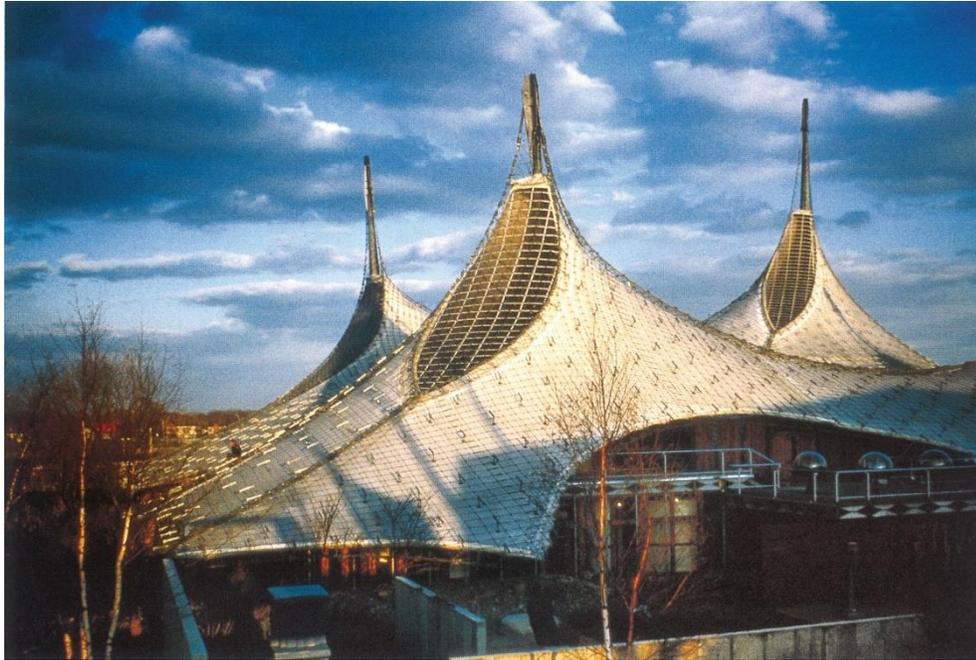


Figura 2. Pabellón principal, diseñado por el arquitecto Frei Otto, 1967.

- Membranas. Están contruidos a partir de materiales textiles o en ocasiones metálicos capaces de absorber únicamente esfuerzos de tensión, ya que debido a su mínimo espesor carecen de rigidez a flexión. Podrían definirse como un caso particular de las *redes de cables*, en las que la distancia entre estos se reduce a cero, y, por lo tanto, la superficie se convierte en la membrana. Este tipo de tensoestructuras son las más comunes, en la figura 3 se muestra un ejemplo.



Figura 3. Tensoestructura de membrana.

- Estructuras tensadas mixtas. Son las obtenidas de combinar los sistemas de cables con las membranas de materiales textiles con el fin de optimizar su rendimiento. Este tipo

de tensoestructuras son capaces de soportar mayores esfuerzos a tensión que si se utilizarán únicamente membranas textiles.

#### *Por el tipo de soporte*

- Superficies tensadas entre marcos rígidos o líneas de apoyo intermedias continuas. Este tipo de estructuras, tienen marcos principales rígidos en los cuales se soportan los cables de tensión. Estas estructuras son sencillas de determinar.
- Superficies tensadas entre puntos altos de apoyo (postes o soportes) y bajos de anclaje (dados de cimentación directa). Este tipo de superficies son las más comunes en estructuras pequeñas, ya que tienen cierta complejidad al momento de su cálculo.

Para este trabajo de investigación, el modelo en estudio será una tensoestructura definida de acuerdo con la clasificación presentada, como **membrana de superficie tensada entre marcos rígidos**. Por lo tanto, las descripciones que se presenten a continuación sobre los materiales utilizados, así como las características geométricas corresponden a estas membranas.

#### 1.1.2 Geometría

Para que una tensoestructura con membrana que trabaja únicamente a tensión sea estable, su principal característica es que tiene una *superficie anticlástica*.

Una *superficie anticlástica* es aquella en la que en todos sus puntos se presenta una doble curvatura cuyos centros están situados en lados opuestos de la superficie, es decir, la intersección de un plano perpendicular a dicha superficie produce una línea de intersección que tiene la concavidad hacia un lado, mientras que la intersección de un plano perpendicular al anterior produce una línea de intersección que tiene la concavidad hacia el lado contrario.

El ejemplo más común de este tipo de superficies es el conocido paraboloide hiperbólico.

Al tener esta característica, no es necesario otro elemento estabilizador como presión de aire o perfiles estructurales intermedios; aunque sí son necesarios el uso de otros elementos para brindar la tensión desde el perímetro.

### I.1.3 Materiales

En general, las membranas son un conjunto de capas de distintos materiales, cada una de las cuales cumple una función específica, desde brindar la resistencia requerida a tensión, hasta ser capaz de soportar las condiciones externas como la acción del viento, lluvia, fuego, rayos UV, etc., garantizando la vida útil del elemento dependiendo del propósito que éste tenga. En un principio, las tensoestructuras con membranas se utilizaban en estructuras temporales debido a que los materiales (principalmente naturales como el algodón o lino) con los que se fabricaban eran poco duraderos y cedían muy pronto a las inclemencias del tiempo. Sin embargo, con el desarrollo de nuevos materiales como la fibra de vidrio, la vida útil de estas estructuras ha aumentado.

Los materiales con los que actualmente se elaboran las membranas textiles son de fibras sintéticas (poliéster o polietileno), metálicas (acero o aluminio) o minerales (fibra de vidrio), siendo esta la razón por la cual son más duraderas.

A continuación, se enlistan algunos de los principales materiales con los que se elaboran las diferentes capas de las membranas son:

1. En la capa resistente a tensiones:
  - a. Fibra de vidrio
  - b. Textil de poliéster
  - c. Acero
2. En el recubrimiento
  - a. Policloruro de vinilo (PVC)
  - b. Teflón
  - c. Silicona

### I.2 Componentes estructurales

Una tensoestructura tiene tres grupos de elementos principales: el primero es el conjunto de elementos flexibles que trabajan únicamente mediante esfuerzos de tensión, como las membranas de materiales textiles o los cables de tensión entre los elementos de soporte y la cimentación, que, debido principalmente a su geometría, permiten la correcta distribución de la carga, así como la permanencia de la forma. El segundo grupo son los elementos de soporte

como los arcos, postes y armaduras que transmiten los elementos mecánicos a la cimentación, y que pueden trabajar a compresión o tensión para permitir el equilibrio de fuerzas. Y finalmente, el tercer grupo es la cimentación, a la cual se sujetan los elementos de soporte.

También podemos mencionar a los elementos de sujeción o refuerzo en los bordes de la membrana, los cuales también forman parte importante de la estabilidad general, ya que, de fallar, pueden ocasionar pérdida de la forma y la tensión.

### 1.3 Etapas de diseño de una tensoestructura

En el siguiente esquema (ver figura 4), se enlistan algunas de las etapas que engloban la metodología general de diseño de una estructura tensada (Marroquín, A. 2012; De Llorens J. 2012).

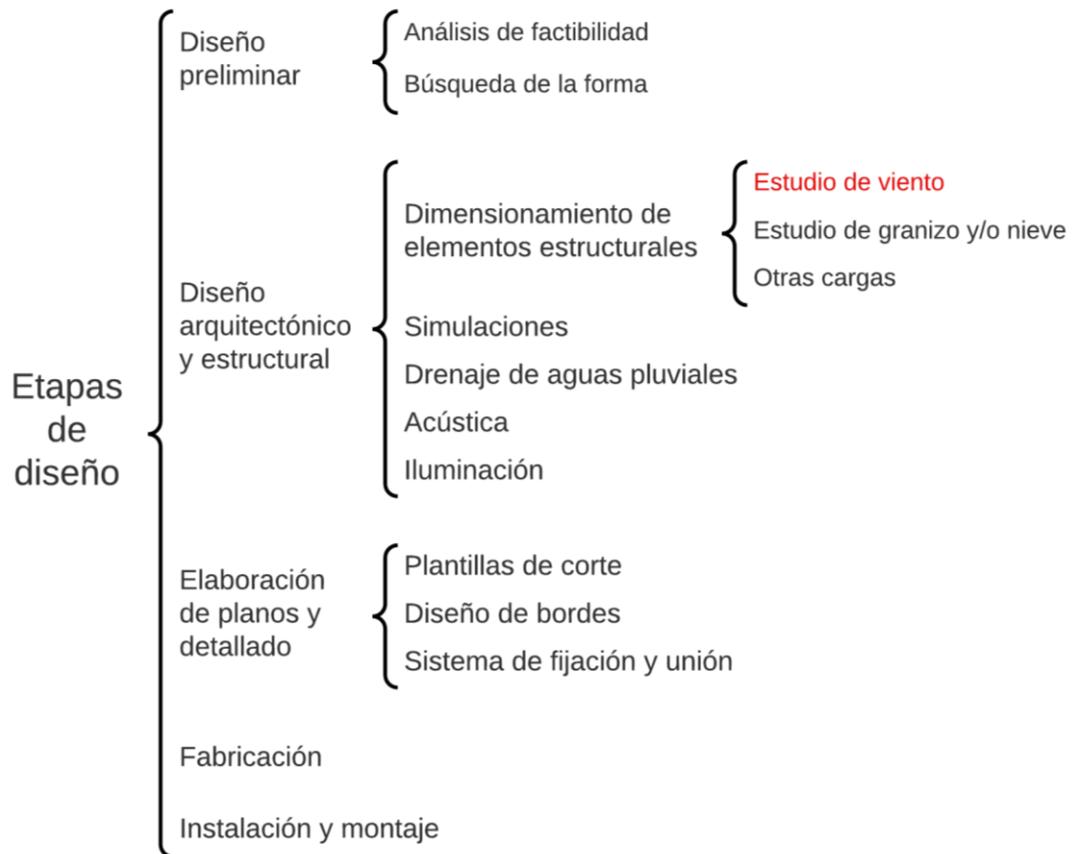


Figura 4. Esquema de etapas de diseño para una tensoestructura.

El estudio de viento se encuentra dentro del diseño estructural de una tensoestructura. Este análisis es indispensable ya que, al tener elementos ligeros, estas son más sensibles a sus efectos.

#### 1.4 Fallas típicas

Debido a la naturaleza de sus materiales, su geometría y el uso que se le da a las tensoestructuras, éstas son significativamente sensibles a los efectos del viento.

Como se mencionó anteriormente, un uso muy común es como cubiertas de restaurantes y pasillos en hoteles, o para cubrir auditorios al aire libre, que en muchas ocasiones se encuentran cerca de las costas o en puntos elevados del relieve en donde los efectos del viento son considerables.

A continuación, se mencionan los principales daños y fallas estructurales que se presentan en las tensoestructuras.

- Cimentación. Una de las principales fallas se da cuando los empujes debidos al viento sobre las tensoestructuras ocasionan levantamiento en el sistema suelo-cimentación, por lo que la principal componente que los resiste es el peso propio de los elementos de cimentación y del suelo sobre estos. Un error muy común es pensar que, debido a que las tensoestructuras son ligeras comparadas con otros tipos de sistemas estructurales, la cimentación va a resistir las acciones que se presenten sobre ésta.
- Anclaje entre elemento de soporte y cimentación. Existen diferentes soluciones para el anclaje de los soportes de las tensoestructuras: elementos de soporte soldados a placas base sujetas por anclas coladas en dados de concreto armado; argollas embebidas; apoyos mediante rótulas y tornillos. En todos estos, debe revisarse que cada uno de sus elementos sea capaz de soportar las acciones de tensión, y así evitar fallas del tipo bloque de cortante en soldaduras, degollamiento de tornillos, o falla por adherencia de anclas, entre otros.
- Soportes. Los soportes son los elementos que trabajan principalmente a compresión. Los tipos de soportes son muy variados dependiendo, principalmente, de la solución arquitectónica. Pueden ser perfiles cerrados como tubos cuadrados o redondos; perfiles abiertos como los de sección I; o elementos armados mediante perfiles

estructurales. Es muy poco común que estos perfiles fallen en tensión, ya que es bien sabido que la capacidad del acero en tensión es elevada, sin embargo, cuando no existe un correcto diseño y/o montaje de estos elementos, se presentan fallas a flexión y flexocompresión, la primera cuando la acción del viento provoca un empuje lateral, y la segunda cuando se colocan elementos esbeltos y se presentan grandes cargas debidas a nieve o granizo.

- Unión soportes-tela. Las fallas en estos elementos, junto a las telas mismas, son las más comunes en las tensoestructuras. El correcto diseño de las uniones está sujeto al análisis de los esfuerzos de tensión y corte que se presentan, no solo en los bordes, sino también en las costuras de unión interior de las telas (hay que recordar que las membranas no se fabrican en una sola pieza). La falla en las uniones provoca que el pretensado en la membrana disminuya, traduciéndose en una inestabilidad de la estructura. A continuación, se muestra un ejemplo de esto: el material textil se desgarró (figura 5) provocando inestabilidad en los elementos de soporte (figura 6)



Figura 5. Falla en material textil



Figura 6. Colapso de elemento de soporte

- Tela o membrana. Como se mencionó anteriormente, las fallas en la tela son de las más comunes en las tensoestructuras, debido a que éstas son las que se deterioran con mayor facilidad. Es por esto por lo que cuando se presentan grandes acciones debidas al viento, la lluvia y el granizo, las telas tienden a desgarrarse, aun cuando en el diseño inicial se hayan considerado las acciones correctas. Para mitigar estos efectos es necesario el constante mantenimiento preventivo o correctivo de las membranas.

Los daños mencionados los englobaremos como consecuencia de tres posibles factores: el primero de ellos debido al **diseño incorrecto**, que puede estar derivado de la falta de conocimiento en la estimación de las cargas, un procedimiento incorrecto de análisis y diseño, o una subestimación de los efectos de viento, lluvia y granizo en las estructuras. El segundo factor son las **acciones extraordinarias**, es decir, acciones que, aunque se consideraron en el diseño y análisis, se presentaron con valores mucho mayores a los establecidos, por ejemplo, una velocidad del viento de mayor magnitud a la máxima probable utilizada en el análisis, o una nevada con duración e intensidad tales que provoquen una acumulación mayor a la registrada estadísticamente. Finalmente, el tercer factor es un **deficiente proceso constructivo, mala instalación y baja calidad de los materiales**. Aun cuando el diseñador haya estimado correctamente las acciones sobre la estructura, calculado y dimensionado de forma adecuada los elementos, si no existe un montaje cuidadoso y

apegado a los planos y recomendaciones, la estructura no funcionará como estaba prevista y eventualmente fallará.

Este trabajo está orientado al análisis de la distribución de las presiones debidas al viento en una tensoestructura, y con esto ayudar a la correcta estimación de las fuerzas que actuarán sobre esta, con el propósito de sembrar un precedente que propicie un correcto análisis, diseño y dimensionamiento de los elementos estructurales.

## 1.5 Referencias

- De la, G., Puig, J. (2010). Tenso estructuras. Venezuela UCV, Facultad de arquitectura y urbanismo.
- Moore, F. (2000). Compresión de las estructuras en arquitectura. McGraw-Hill.
- Esgrig, J., Pérez, J. (1989, junio). Conceptos básicos para el diseño y análisis de estructuras ligeras tensadas. Revista de edificación pág. 40-54.
- Marroquin, A. (2012). Tensoestructuras. Guía básica de diseño.
- De Llorens, J. (2012, octubre). TENS-SCL 2012. “V Simposio Latinoamericano de Tensoestructuras. Informes de la construcción, vol. 64, pág. 528-588.

## CAPÍTULO II. ESTUDIO DE TENSOESTRUCTURAS BAJO EFECTOS DEL VIENTO

La revisión bajo efectos de viento de estructuras con características muy particulares siempre conlleva realizar estudios de túnel de viento, ya que el fenómeno no es nada sencillo de observar. Así mismo, el viento es muy sensible a los efectos de la geometría, temperatura, entorno y topografía, por lo que los efectos presentes para una estructura no serán los mismo si ésta se encuentra en otro sitio. Por otra parte, los efectos dinámicos como turbulencias son complejos de modelar y generalizar. Durante este capítulo se describirán los principales procesos y metodologías para el análisis de viento de una estructura de manera general, para finalmente enfocarnos en las tensoestructuras.

### II.1 Breve explicación sobre la metodología para el diseño estructural

Previo a determinar los efectos del viento, debemos entender por qué se requieren y cuál es su importancia dentro del proceso de análisis y diseño. Para ello, a continuación, presentamos el proceso general para el diseño estructural de cualquier edificio, nave industrial, cubierta etc., que se puede resumir en los siguientes pasos:

1. A partir de una propuesta arquitectónica (geométrica), basada en los requerimientos de espacio y funcionalidad, se realiza un predimensionamiento de los elementos, con el fin de tener un punto de partida que se afinará posteriormente.
2. Con base en la información del uso y ubicación, se determinan las cargas que obrarán sobre la estructura, ya sea de naturaleza permanente, variable o accidental utilizando la reglamentación aplicable vigente.
3. Se calculan las fuerzas internas que deben resistir los elementos, conforme a diferentes metodologías.
4. Para los diferentes elementos estructurales se determinan las resistencias nominales.
5. Se comparan las fuerzas internas del punto 3 con las resistencias del punto 4, si se requieren mayor resistencia se proponen nuevas dimensiones de los elementos estructurales o un cambio en el sistema estructura y se vuelve al punto 2; si las resistencias son adecuadas, se verifica que estén dentro de un rango óptimo para evitar un costo excesivo en la estructura, de no ser así se retorna al punto 2. Cuando las

resistencias sean óptimas conforme al criterio del diseñador y requerimientos de la estructura, se procede al detallado de conexiones y elementos estructurales.

Los coeficientes de presión obtenidos en este trabajo se encuentran dentro del cálculo de las cargas sobre la estructura del punto 2. Puede deducirse que, tanto la sobre como la subestimación de estas cargas, derivarían en un sobre costo de construcción o en un bajo nivel de seguridad de la estructura y de sus usuarios. Es por esto por lo que es de vital importancia el tener herramientas y procedimientos que permitan la correcta estimación de las cargas por viento.

## II.2 Metodología general del análisis de los efectos del viento (presiones)

En el MDOC C.1.4 2020, se sugieren tres metodologías para la determinación de las fuerzas por viento:

- I. Análisis estático.** Para estructuras con relación de esbeltez  $\lambda = \frac{H}{D} \leq 5$ , donde **H** es la altura de la estructura, y **D** es la dimensión menor de la base; y periodo fundamental de vibrar  $T \leq 1$  s, es decir, para estructuras **Tipo 1** (conforme a la clasificación del mismo manual). Este análisis se caracteriza por la obtención de presiones de diseño constantes en toda la superficie de la estructura, suponiendo la nula existencia de otros efectos adicionales como vórtices, ráfagas, o condiciones de inestabilidad aeroelástica. Queda bajo criterio del diseñador la ubicación de las fuerzas concentradas resultantes para el diseño.
- II. Análisis dinámico.** Este análisis se utiliza para las estructuras cuya relación de esbeltez es mayor a 5, y el periodo fundamental de vibrar de la estructura tiene un valor entre 1 y 5 segundos, es decir, **Tipo 2, 3 y 4** (conforme a la clasificación del manual). Estos tipos de estructuras se consideran sensibles a los efectos dinámicos producidos por la turbulencia del viento, por lo que debe revisarse la acción resultante de la interacción dinámica entre el flujo del viento y la estructura.
- III. Pruebas en túnel de viento.** Todas aquellas estructuras con una altura mayor a 200 m, o claros mayores a 100 m, al igual que estructuras Tipo 2, 3 o 4 cuyo periodo fundamental de vibración sea mayor a 5 s, deberán ensayarse en túneles de viento para la obtención de sus presiones de diseño. En el MDOC C.1.4 2020, se dan

recomendaciones del tipo de modelo e instrumentación adecuados con base en la clasificación de la estructura, para pruebas experimentales en túnel de viento.

Ahora bien, podemos sintetizar el proceso de obtención de las **presiones de viento** para un **análisis estático (o dinámico)** sobre cualquier estructura en las siguientes etapas (MDOC C.1.4 2020):

1. Se clasifica la estructura conforme a su importancia (Grupo A+, A, B o C) y respuesta ante acción del viento (Tipo 1, 2, 3 o 4).
2. Determinación de una **velocidad regional**, con base en el lugar geográfico de la estructura, y el uso de isotacas para diferentes periodos de retorno.
3. Modificación de la velocidad regional conforme al entorno: topografía, estructuras adyacentes y altura de la estructura, obteniendo la **velocidad de diseño**.
4. Cálculo de la **presión dinámica de base**, considerando la altura respecto al nivel del mar, temperatura promedio anual y velocidad de diseño.
5. Obtención de la **presión de diseño** afectando la presión dinámica de base con coeficientes de presión en función de la geometría de la estructura y la dirección de acción del viento respecto de ésta. El coeficiente de presión se define como la relación entre la presión actuante y la presión dinámica de base para una altura dada. Los coeficientes de presión se obtienen experimentalmente mediante pruebas de túnel de viento, y se generalizan para diversos tipos de estructuras.
6. Finalmente, obtenidas las presiones en la estructura, se determinan las **Fuerzas actuantes**, y se distribuyen a lo largo de los elementos de acuerdo con el criterio del diseñador.

El procedimiento descrito anteriormente es similar en manuales y reglamentos como el ASCE7, EUROCODIGO, AS-NZS, entre otros.

Cabe mencionar que las tensoestructuras al ser tan ligeras y con formas tan particulares, así como por la naturaleza de sus elementos, tienden a tener comportamientos no lineales bajo efectos de viento.

El objetivo final de este trabajo es aportar coeficientes de presión a una geometría de tensoestructura en particular, con el fin de lograr un mejor entendimiento de la distribución de presiones en este tipo de estructuras.

### II.3 Determinación de cargas de viento para tensoestructuras.

#### II.3.1 Códigos y reglamentos

Como se mencionó en la sección anterior, para el cálculo de las presiones de viento que actúan sobre una estructura se requiere determinar los coeficientes de presión, los cuales, al igual que los efectos del viento, dependen principalmente de la geometría general de la estructura y suelen determinarse mediante múltiples ensayos en túnel de viento en conjunto con un análisis para su parametrización. Debido a que las tensoestructuras tienen formas variadas, es muy complejo agruparlas, y por lo general, en códigos y manuales no se presentan sus coeficientes de presión.

Por ejemplo, el MDOC C.1.4 2020 contiene coeficientes para techos aislados, toldos y cubiertas adyacentes a construcciones cerradas y techos en voladizo para un análisis estático y geometría plana, mientras que, en la sección de análisis dinámico, presentan coeficientes de presión para estructuras con forma de cubierta cónica y paraboloides hiperbólicos.

A continuación, se replica la tabla de coeficientes y su figura de referencia para el caso del paraboloides hiperbólico.

Tabla 1. Coeficientes de presión neta para cubiertas con forma de paraboloides hiperbólico, MDOC C.1.4 2020

Condiciones	$\theta$ , grados	$C_{p,w}$	$C_{p,l}$
Vacío debajo, $0.25 < h/d < 0.5$ , $0.1 < c/d < 0.3$ , y $0.75 < b/d < 1.25$	0	0.45	0.25
		-0.45	-0.25
	90	0.45	0.25
		-0.45	-0.25

Nota:  $C_{p,w}$  está definida como positiva cuando se ejerce un empuje y negativo cuando se ejerza una succión; solo deben considerarse combinaciones de valores del mismo signo.

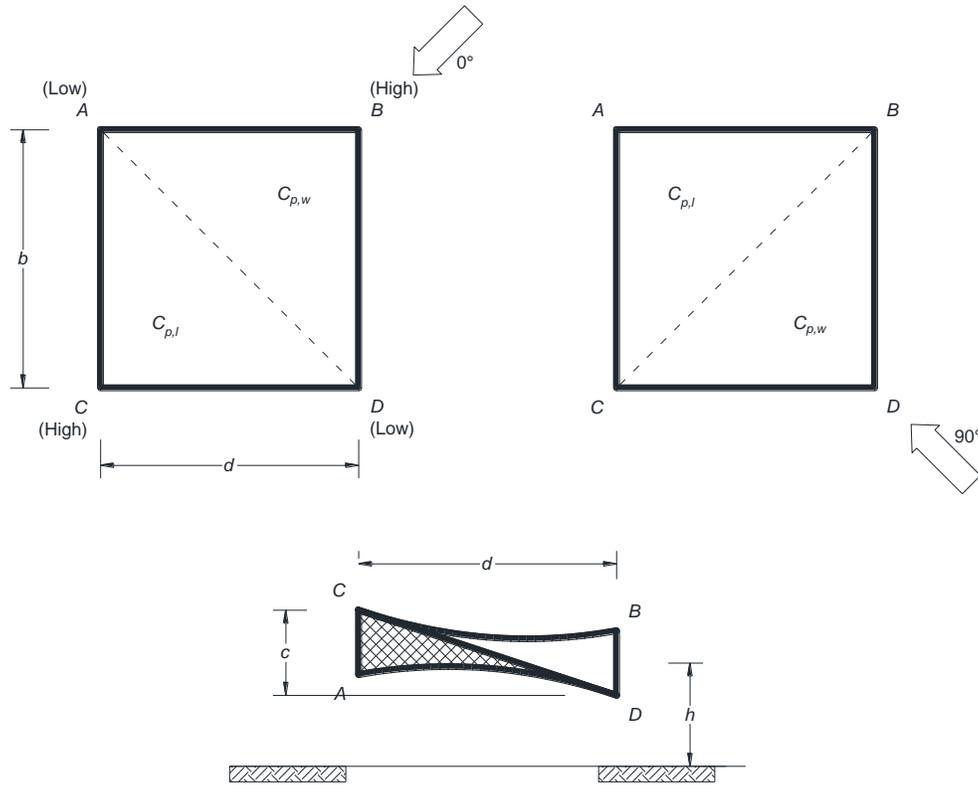


Figura 7. Esquema para coeficientes de cubiertas con forma de paraboloido hiperbólico, figura 4.7 MDOC C.1.4 2020.

### II.3.2 Herramientas computacionales

Con el avance del análisis computacional, se pueden utilizar *softwares* especializados para la simulación de los efectos del viento sobre tensoestructuras, mediante análisis de fluidos, los cuales suelen calibrarse con pruebas de túnel de viento. Algunos de estos programas son: RWIND, CFD (Autodesk), Robot Structural Analysis, WinTess, entre otros.

En la figura 8 se muestra un ejemplo de la interfaz gráfica de uno de los *softwares* anteriores.

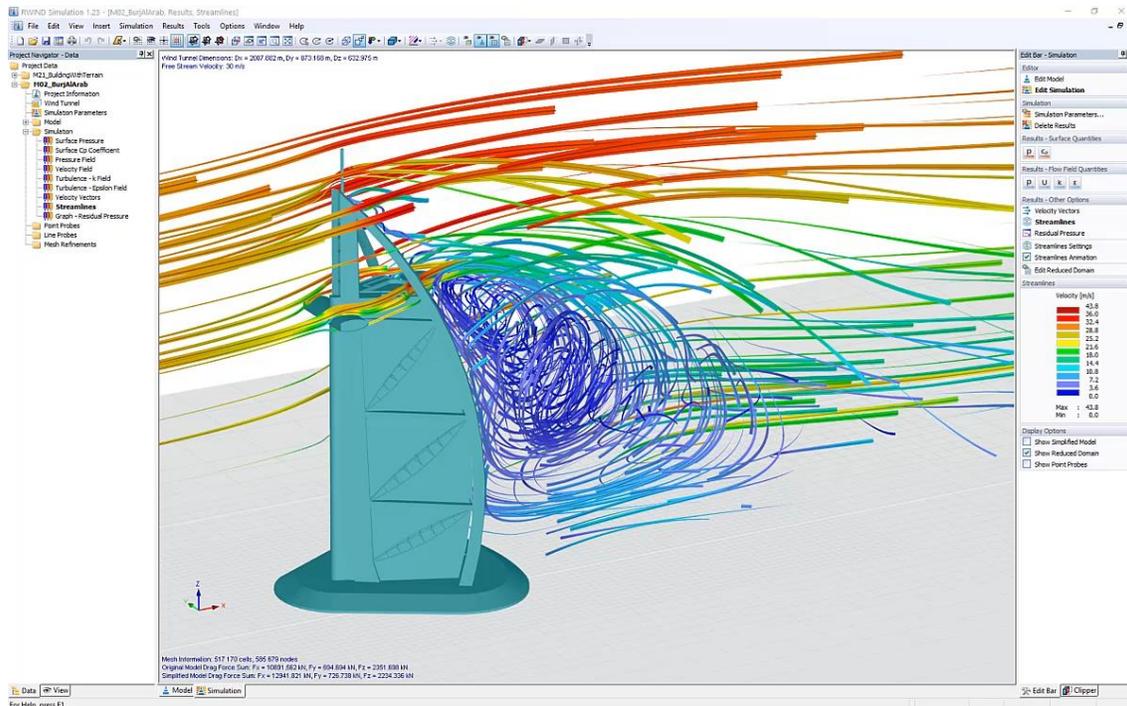


Figura 8. Interfaz gráfica del programa computacional RWIND.

## II.4 Otras publicaciones

No se han encontrado tesis, artículos o publicaciones que aborden la determinación de presiones en una tensoestructura con una forma similar a la de este trabajo, posiblemente debido a que es poco común. En contraposición, sí se pueden encontrar investigaciones en donde se analizan tensoestructuras con forma de paraboloides hiperbólicos, la cual es más habitual. Sin embargo, tratan problemáticas particulares y diferentes que son inherentes a un paraboloides hiperbólico, por lo que no es posible comparar resultados o generalizar casos.

## II.5 Referencias

- Comisión Federal de Electricidad (2020). Manual de Diseño de Obras Civiles, Capítulo C.1.4 Diseño por Viento.
- Diaz, M. (S/F) Estructuras de membrana tensadas.
- Carranza, F. (2011) Cálculo y diseño estructural para la cubierta del mercado central parroquia de Pintag en base a Tenso-estructura con el uso de bambú gigante (*Dendrocálamus Asper*). Escuela Politécnica del Ejército.

- Jiménez, A. (2016) Análisis técnico y económico de Tenso estructura como propuesta de cubierta para el palco del estadio olímpico Atahualpa. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Hamon, M; Pérez, M. (2006) Criterios básicos en el análisis y diseño de Tensoestructuras. Universidad Central de Venezuela.
- Pech, Luis. (2016) Estudio paramétrico de los efectos del viento en una tenso-estructura. Universidad Nacional Autónoma de México.

# CAPÍTULO III. PRUEBA DE LABORATORIO EN TÚNEL DE VIENTO

Determinar los efectos e influencia del viento sobre los diferentes tipos de estructuras suele ser complicado debido a que no es un fenómeno que se pueda observar a simple vista y de manera precisa debido a las implicaciones físicas. En las últimas décadas se han desarrollado herramientas analíticas que permiten la mejor comprensión de dicho fenómeno, sin embargo, al estar basadas en la observación, omiten o suponen efectos de importancia difíciles de describir. Para mitigar estas omisiones y mejorar los procedimientos de análisis y estudio, estos deben complementarse con una herramienta que permita la simulación experimental del flujo del viento y los efectos que induce sobre el objeto de estudio. Esta herramienta es el Túnel de viento.

Dentro de las múltiples aplicaciones del túnel de viento, se encuentran el estudio de los efectos sobre vehículos como aviones o automóviles, edificios de alta y baja altura, construcciones con geometrías muy particulares, cubiertas ligeras, puentes, torres de telecomunicaciones, entre otros.

En este capítulo se describe brevemente el funcionamiento de un túnel de viento y las partes que lo componen. Así como las características del modelo utilizado, y de la prueba realizada.

## III.1 Descripción del túnel de viento

Un túnel de viento o túnel aerodinámico puede definirse como una herramienta tecnológica que permite estudiar, analizar, simular y estimar los efectos del viento (flujo con propiedades conocidas) sobre cualquier tipo de estructuras (cuerpos sólidos), mediante el uso de técnicas de similitud.

Éstos surgieron de la necesidad de comprender mejor aquellos efectos entre el viento y su interacción con diferentes objetos de estudio, que con mera observación son difíciles de describir, mediante la generación de un flujo con propiedades conocidas sobre dicho objeto.

La principal ventaja del túnel de viento es que tiene un ambiente controlado, por lo que el investigador puede estudiar diversas variantes de un mismo fenómeno, y obtener información fiable que le permita una mejor comprensión de este.

El principio de su funcionamiento es que un túnel de viento es un conducto tubular de sección regular por el que se hace pasar un flujo de aire a diferentes velocidades, ya sea soplado o aspirado por una turbina o ventilador. En dicho conducto, existe una zona en la que se monta el modelo y los instrumentos de medición para realizar la toma de medidas, y en la cual existe una ventana que permite la observación del ensayo.

En la normatividad vigente para diseño por viento, como el MDOC C.1.4 2020 y NTC-DV-2017<sup>1</sup>, se indica que *en construcciones cuya geometría sea poco usual y con características de rigidez que la hagan particularmente sensibles a los efectos dinámicos del viento*, se deben realizar pruebas experimentales en túnel de viento para el cálculo de dichos efectos. De aquí que es importante la continua investigación, para establecer un precedente que permita la mejora de los códigos, así como la correcta evaluación de los modelos.

### III.1.1 Historia y antecedentes.

Los primeros túneles de viento aparecieron en el siglo XIX junto con el nacimiento de la aeronáutica. Su principal objetivo era la búsqueda de máquinas más pesadas que el aire que pudieran volar. Sin embargo, había que resolver el problema de mover dichas máquinas a través del medio, por lo que el túnel de viento se concibió a la inversa: se podía obtener el mismo resultado si se movía el aire a gran velocidad junto al objeto de estudio, en vez de este a través del aire.

Por otra parte, con los avances en el estudio de los materiales de construcción, comenzaron a diseñarse edificios más altos en los que el efecto del viento tomó mayor relevancia, por lo que fue necesario determinar de manera más precisa las fuerzas que incidían sobre las estructuras. Así, el túnel de viento comenzó a utilizarse en el ámbito de la ingeniería civil y estructural permitiendo la elaboración de manuales y guías de diseño. Los primeros registros que se tiene del uso de túnel de viento aplicado a la medición de las presiones de viento en una edificación datan del año 1893 por Kernot en la Universidad de Melbourne, y 1894 por Irminger en Copenhagen, ambos realizando estudios en edificios de poca altura. En la figura 9 se muestra un esquema de la *máquina de soplado* utilizada por Kernot.

---

<sup>1</sup> Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Viento, del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal 2017.

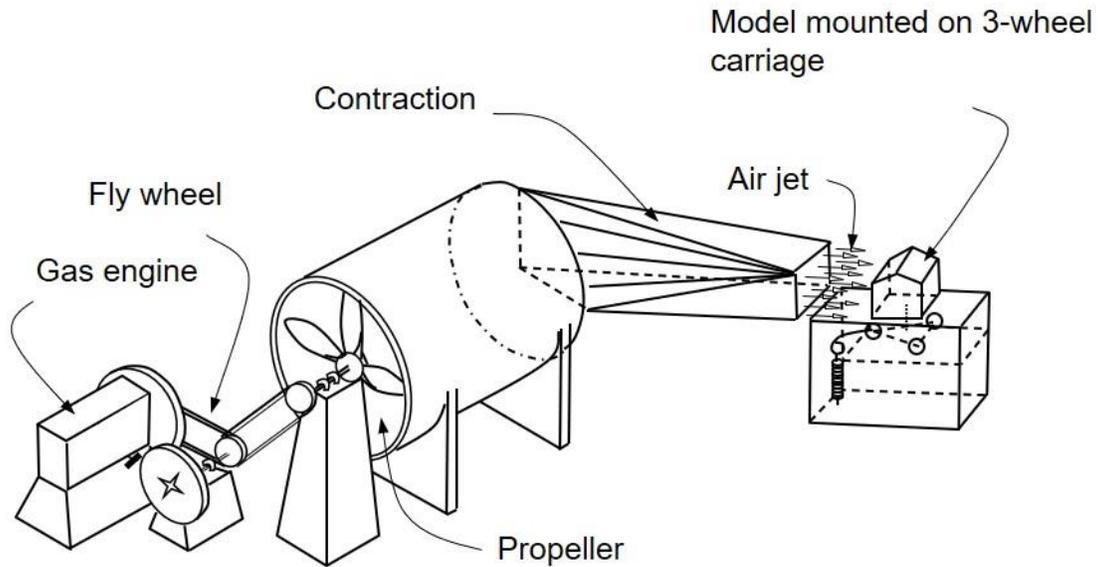


Figura 9. Diagrama de la máquina de soplado de Kernot (1983)

A la par del avance tecnológico, se han mejorado los modelos de túnel de viento alrededor del mundo, y aún más con la disponibilidad de los equipos computacionales que permiten la obtención masiva de datos y su posterior análisis de manera más sencillas. En la actualidad, en el ámbito de la ingeniería civil, el túnel de viento es una gran herramienta para el estudio de estructuras con geometrías poco convencionales que no se contemplan en los reglamentos vigentes.

### III.1.2 Clasificación

Los túneles de viento se pueden clasificar bajo múltiples criterios de acuerdo con las características físicas y operacionales de estos. Sin embargo, hay dos parámetros principales en los que se pueden englobar y son los que sobresalen: topología física (instalaciones) y velocidades de operación.

### Topología

#### a) Por tipo de retorno

##### a.1) Circuito abierto

También conocidos como túnel recto, es el diseño más sencillo ya que su principal característica es que, como su nombre lo sugiere, el flujo de aire tomado desde la atmósfera describe una trayectoria recta desde la entrada, pasando por la sección

de pruebas, y reincorporándose a la atmósfera en la sección de salida. Los principales componentes son: la sección de entrada que cuenta con una malla que impide el acceso de basura, el estabilizador de flujo y cono de contracción; la sección de pruebas o cámara de ensayos; y la sección de salida conformada por el difusor y un extractor (ventilador). A partir de aquí, el flujo regresa al exterior.

a.2) Circuito cerrado

En estos tipos de túnel, el flujo de aire circula de manera cíclica en el interior de la estructura, presentando tanto cambios en sus propiedades como un intercambio con la atmósfera prácticamente nulos. El flujo de aire se genera mediante un sistema de propulsión con ventilador, el cual circula a través de un cono de entrada, cámara de ensayos, y posterior difusor, para a través de otro conducto, regresar a las inmediaciones del ventilador para repetir el ciclo.

En la Tabla 1, se muestra una lista comparativa entre ventajas y desventajas para túneles conforme a su tipología:

Tabla 2. Ventajas y desventajas de túneles de viento con topología de circuito cerrado y abierto.

Topología	Ventajas	Desventajas
Circuito abierto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Generalmente el costo de construcción es menor comparado con un túnel de circuito cerrado.</li> <li>• Actividades como el uso de motores de combustión interna, o visualización del flujo mediante el uso de humo, no ocasionan problemas de limpieza siempre que, tanto la entrada como la salida del túnel, estén expuestos a la atmósfera.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dependiendo del entorno desde el que se incorpore el flujo de aire, es posible que se requiera mayor filtración para obtener un flujo limpio.</li> <li>• Mayor consumo de energía, si el túnel tiene altas tasas de uso.</li> <li>• Tienden a ser ruidosos, por lo que pueden causar problemas ambientales, limitando sus horarios de operación, además de adecuaciones contra ruido en las instalaciones.</li> </ul>
Circuito cerrado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite un mejor control de la calidad del flujo en el interior del circuito, ya que hay poca influencia del entorno.</li> <li>• Se requiere menos energía para su funcionamiento, debido al continuo reciclaje del flujo en</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El costo inicial es elevado, debido a que la longitud total de túnel es mayor comparado con un túnel de circuito abierto.</li> <li>• Se requiere un mayor mantenimiento si se utiliza humo para visualización o</li> </ul>

Topología	Ventajas	Desventajas
	<p>su interior, siendo muy útil para túneles con altas tasas de uso.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Son menos ruidosos durante su operación, por lo que no se requieren instalaciones que bloqueen el ruido, ni afectan de manera importante el ambiente.</li> </ul>	<p>alguna otra actividad que introduzca partículas ajenas al flujo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si el túnel se utiliza con regularidad, posiblemente requerirá algún sistema de enfriamiento como dispositivos para refrigeración o intercambiadores de calor.</li> </ul>

b) Configuración de la cámara de ensayo.

Las dos configuraciones básicas de la cámara de ensayo o sección de prueba son, cámara de ensayo abierta y cámara de ensayo cerrada. Sin embargo, estas dos opciones deben verse como los extremos del espectro de posibles configuraciones, ya que, por ejemplo, se utilizan secciones de prueba de pared ranurada en túneles de viento de baja velocidad y transónicos, las cuales podrían considerarse abiertas o cerradas parcialmente.

b.1) Sección abierta.

Es aquella en la que la sección de prueba comunica por alguno o todos sus límites con el exterior.

b.2) Sección cerrada

La sección de prueba tiene barreras sólidas que aíslan el fluido interno del exterior. Estas barreras generalmente son transparentes (vidrio) para permitir la observación del modelo.

El uso de secciones de prueba abierta puede generar algunos inconvenientes de acuerdo con el tipo de túnel que se utilice. En túneles de circuito abierto, se debe tener especial cuidado en que el fluido no ingrese por la sección de prueba en vez de la entrada propia del túnel. Mientras que, en combinación con túneles de circuito cerrado, puede ocasionar severos problemas de fluctuación del flujo (flujo inestable) que requieren correcciones durante las pruebas.

Por otro lado, las secciones de prueba cerradas son las de uso más extendido, debido a los prácticamente nulos inconvenientes que representa tanto en túneles de circuito abierto como cerrado.

En la Tabla 3, se muestran los nombres *comunes* con los que se conocen a diferentes combinaciones de configuraciones de túneles.

Tabla 3. Clasificación común de túneles de viento con base en su tipología.

Sección de prueba Tipo de circuito	Sección abierta	Sección cerrada
Circuito abierto	Tipo Eiffel	Tipo NPL
Circuito cerrado	Tipo Prandtl	Tipo Göttingen

### Velocidades de operación

Por otra parte, los túneles de viento pueden ser clasificados de acuerdo con la velocidad del flujo que transita dentro de ellos, con base al número Mach. Este número fue propuesto por el físico austriaco Ernst Mach, como una manera sencilla de expresar la velocidad de un objeto respecto a la velocidad del sonido. Esto es útil debido a que dicha velocidad es dependiente de las condiciones del medio, por ejemplo, la atmósfera, por lo que manejar un parámetro comparativo permite un mejor entendimiento de la velocidad del objeto de estudio.

En la Tabla 4 se muestra la clasificación antes descrita.

Tabla 4. Clasificación con base en la velocidad de operación del flujo al interior del túnel.

Clasificación	Velocidad operativa [Mach]
De baja velocidad	$Ma < 0.3$
Subsónico	$0.3 < Ma < 0.8$
Transónico	$0.8 < Ma < 1.2$
Supersónico	$1.2 < Ma < 3.0$
Hipersónico	$3.0 < Ma$

La mayoría de los túneles de viento para estudio de estructuras, son de *baja velocidad*, debido a que en este rango la densidad del fluido es prácticamente constante debido a que los efectos de compresibilidad del fluido son casi imperceptibles, por lo que las ecuaciones que describen el comportamiento del fluido se vuelven más sencillas ya que no se deben realizar ajustes a la densidad del fluido.

### III.1.3 Túnel de viento del II-UNAM

El túnel de viento en el que se realizaron las pruebas se encuentra en el Laboratorio de Estructuras y Materiales de Alta Tecnología (LemAT), y es operado por personal del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Conforme a la clasificación presentada previamente, el túnel tiene las siguientes características: *Circuito cerrado con retorno simple de baja velocidad, ya que el valor máximo del flujo es de 100 km/h (27.7 m/s)*. Tiene 37.75 m de largo y 13.9 m de ancho, con dos cámaras de ensayo de sección cerrada, la primera con dos áreas de pruebas de 3 m de ancho por 2 m de alto cada una, separadas por una distancia de 14 m, y la segunda es de 4.3 m de ancho por 4 m de altura y una longitud de 5 m; en la sección de prueba 1, cuenta con mesas que permiten el giro de 360° de los modelos a ensayar.

En la figura 10, se presenta un esquema general del túnel de viento:

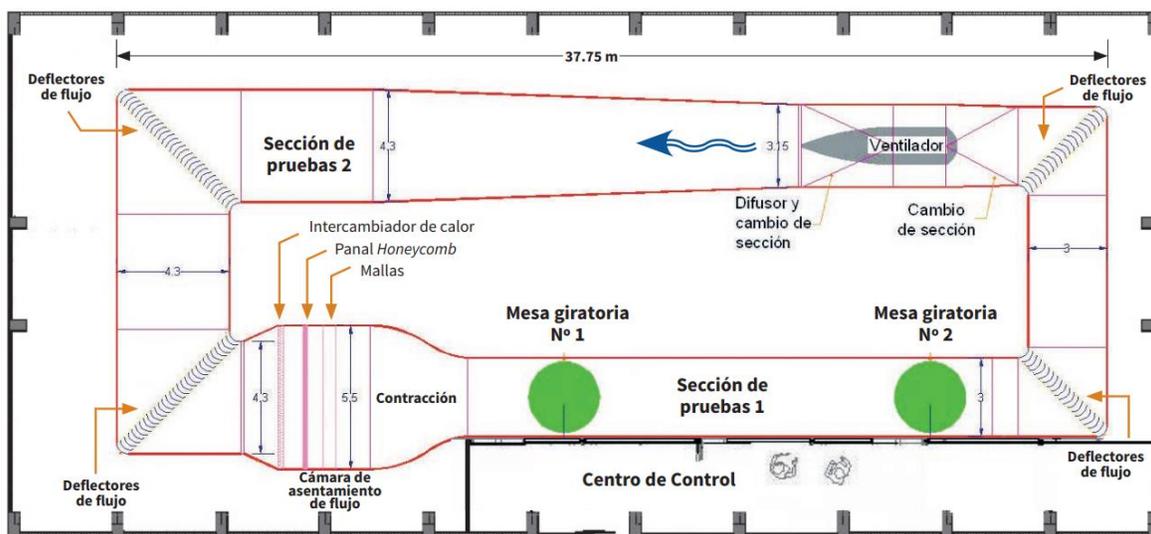


Figura 10. Planta general del túnel de viento del LemAT

Los principales componentes del túnel son:

- Ventilador. Genera el flujo de viento con una velocidad de hasta 100 km/h. Se acciona remotamente desde el centro de control, fijando una velocidad de giro en rpm, la cual se puede correlacionar con la velocidad del flujo mediante la velocidad angular. En la sección de pruebas 1 se pueden alcanzar velocidad para simular las velocidades de un huracán de categoría 4.

- Difusor de cambio de sección. Este se encuentra a la salida del ventilador, y permite uniformizar el flujo del viento, debido a que este es turbulento cuando es generado por el ventilador.
- Deflectores de flujos. Estos permiten el cambio de dirección en los giros a 90°.
- Cámara de asentamiento de flujo. Tiene el propósito de homogeneizar y uniformizar el flujo de viento antes de su llegada a la sección de pruebas. Esto se realiza mediante un panel tipo *panal de abeja* hecho de aluminio con 15 cm de espesor y dos pantallas de turbulencia.
- Cono de contracción. Aumenta la velocidad del flujo una vez uniformizado por la cámara de asentamiento, a través de una disminución de la sección transversal del túnel.
- Centro de control. Es un área fuera del túnel, desde la cual se controla el ventilador y las cámaras giratorias, y se monitorean los resultados captados en los equipos de cómputo. También tiene vista directa a las mesas giratorias, por lo que se puede observar el comportamiento físico del modelo.

### III.2 Características del modelo

Conforme al MDOC C.1.4, se pueden utilizar dos tipos de modelos, los denominados **modelos rígidos**, que son aquellos que no se deforman durante las pruebas y tienen el propósito de determinar las presiones sobre la estructura; y lo **modelos aeroelásticos**, los cuales replican las propiedades de los materiales de la estructura real, y pueden deformarse durante las pruebas, permitiendo determinar la respuesta dinámica de las estructuras. Los modelos rígidos pueden utilizarse para estructuras pocos sensibles al viento, mientras que los aeroelásticos suelen utilizarse para estructuras sensibles a los efectos dinámicos del viento, en las que puedan presentarse oscilaciones importantes transversales al flujo de viento al aparecer vórtices o remolinos periódicos que interactúan con la estructura o cuando la estructura pueda presentar problemas aerodinámicos inestables.

Para la prueba se utilizó un modelo rígido, elaborado mediante impresión 3D. Tiene dimensiones externas de 61.9 cm por 53.9 cm, y una altura de 10.5 cm. En la figura 11 se muestran las dimensiones generales

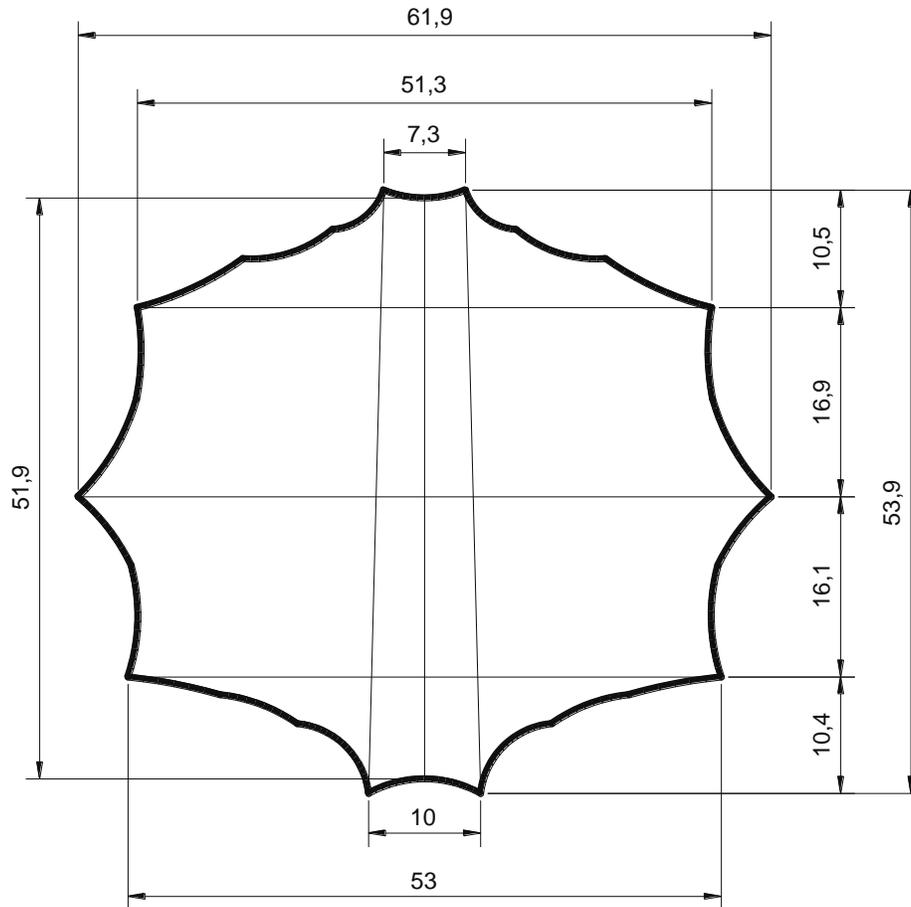


Figura 11. Medidas de modelo.

Para la prueba, el modelo se colocó sobre cuatro soportes rectangulares, con el propósito de asemejar las condiciones de altura de la estructura real. Corresponde a una cubierta tensada con un eje de simetría, conformada por dos arcos centrales que delimitan la franja principal central, y seis arcos perpendiculares que conforman las áreas laterales. En el modelo los vértices con curvatura convexa representan aquellos puntos en las que la estructura de estudio tiene soportes de los cuales cuelga y por lo tanto trabajan a tensión, mientras que las líneas antes descritas como arcos principales y secundarios, representan aquellos soportes sobre los cuales descansa la estructura, por lo que los elementos trabajan a compresión. Los *vértices* de los costados apuntan hacia arriba y hacia abajo con una secuencia intercalada, logrando la superficie anticlástica característica de estas estructuras.

### III.3 Parámetros de la prueba

Los parámetros utilizados durante la prueba se especifican a continuación.

### III.3.1 Velocidad de diseño

Se utilizaron dos velocidades diferentes, 300 rpm que, para el túnel de viento, corresponde a 8.68 m/s (31.25 km/h) y 500 rpm, que equivale a 15.53 m/s (55.91 km/h).

### III.3.2 Tiempo de muestreo

El tiempo de muestreo total fue de 120 segundos por cada ángulo de análisis, de los cuales 10 segundos aproximadamente corresponden al tiempo de giro entre posiciones, y 30 segundos en la estabilización del flujo, por lo que el tiempo neto de muestreo fue de 80 segundos.

### III.3.3 Ángulos de análisis

Se utilizaron los siguientes ángulos para la toma de datos desde 0° hasta 180° (grados sexagesimales<sup>2</sup>) en intervalos de 10°, además de 45° y 135°. No se realizó un giro completo, debido a la simetría en un eje de la estructura.

## III.4 Parámetros y leyes de similitud

Para que los efectos del viento se puedan transportar del modelo a escala al prototipo real, los principales parámetros y variables deben escalarse de manera adecuada mediante las escalas de similitud. La idea básica es que tanto el modelo como el prototipo deben tener las mismas características geométricas.

### III.4.1 Similitud dinámica

Para poder considerar que las fuerzas en un modelo sean equivalentes a las del prototipo se debe garantizar que las fuerzas ejercidas por el fluido en puntos homólogos de uno con el otro se relacionen entre si proporcionalmente. Lo anterior se garantiza si el Número de Reynolds o el Número de Froude se mantienen constantes, lo cual dependerá de las fuerzas de interés que se desea analizar.

- El Número de Reynolds es un número adimensional que relaciona las fuerzas de tipo inercial y viscosas en un fluido en constante movimiento, mediante la siguiente ecuación:

---

<sup>2</sup> Siempre que en este trabajo se especifiquen direcciones de análisis, se utilizan grados sexagesimales.

$$Re = \frac{\rho V l}{\mu} = \frac{V l}{\nu}$$

Donde:

Re, número de Reynolds;

$\rho$ , es la densidad del fluido;

V, es la velocidad del flujo;

l, dimensión lineal característica;

$\mu$ , viscosidad dinámica;

$\nu$ , viscosidad cinemática

En modelos cuyas aristas sean definidas o poco redondeadas, los coeficientes de resistencia al desprendimiento de la capa límite, son independientes del número de Reynolds, es decir, que, si tenemos aristas bien definidas, la capa límite entre el fluido y el modelo se desprenderá, incluso a velocidades moderadamente pequeñas (recordemos que las velocidades de ensayo resultan pequeñas, muy por debajo del  $Ma = 1$ ), debido a que el flujo es laminar en esa sección.

- Por otra parte, el Número de Froude, es un número adimensional que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas debidas a la gravedad, mediante la siguiente expresión:

$$Fr^2 = \frac{V^2}{gl}$$

Donde:

Fr, número de Froude;

V y l se definieron previamente,

g, aceleración de la gravedad.

Al estarse utilizando un modelo rígido, el número de Froude no influye en los resultados esperados.

#### III.4.2 Similitud cinética

Esta se logra cuando la trayectoria de las partículas del flujo tanto en el modelo como en el prototipo son geoméricamente semejantes. Lo anterior se logra diseñando adecuadamente la

capa límite para lograr que el perfil de velocidad media y la turbulencia del flujo del modelo coincidan con el flujo real.

#### III.4.3 Similitud geométrica

Para que exista semejanza dinámica y cinética, forzosamente se debe contar con una semejanza geométrica, es decir, en el modelo se deben reproducir las principales características que pueden influir de manera importante en los efectos del viento en la estructura de estudio. Por otra parte, también es vital considerar el denominado *radio de bloqueo*, el cual es la relación entre el área proyectada lateral del modelo y el área transversal del túnel. La relación de bloqueo debe ser menor al 5%, lo que propicia que se desarrollen la totalidad de los efectos que se presenta en la estructura principal, y se evita realizar correcciones posteriores a las pruebas.

Para nuestro caso, el área transversal mayor del modelo es de  $0.0444 \text{ m}^2$ , mientras que el área transversal del túnel en su sección de prueba es de  $6.0 \text{ m}^2$ , por lo que la relación de bloqueo es de 0.0074 o 0.75%, el cual es inferior a 5%, de manera que no es necesario realizar correcciones.

### III.5 Procedimiento de ensayo experimental en túnel de viento

#### III.5.1 Tubo Pitot

Una de las principales variables que intervienen en el cálculo de los coeficientes de presión, es la presión misma dentro del túnel tanto de manera estática, como durante la prueba, o dinámica. Esto se realiza mediante un tubo Pitot compuesto por dos tubos, el primero de ellos en la dirección en la que corre el flujo de viento, y el segundo conectado a orificios laterales, los cuales miden la presión total y estática respectivamente. La diferencia entre la presión total y la estática da como resultado la presión dinámica.

#### III.5.2 Instrumentación

Para la toma de datos el modelo tiene orificios en la superficie en los cuales se introducen a presión mangueras que tienen unido en su extremo sensores (tap) que recogen los datos de presión. Estos sensores se conectan directamente a una unidad computacional que realiza la recopilación de datos. El número total de puntos de toma de datos es treinta y uno en la parte superior y treinta y uno en la parte inferior; su ubicación obedece a las líneas de trayectoria

donde cambia la curvatura. Cada manguera se identificó con una etiqueta tanto en el lado del modelo como en el que se conecta al equipo computacional, con el fin de vincular las posiciones con las lecturas obtenidas. En la figura 12 se muestra la distribución de los puntos de muestreo, mientras que en la figura 13 se presenta el modelo instrumentado.

Cabe mencionar que previo al inicio de la prueba, se realiza una comprobación en cada tap introduciendo un flujo de aire con una jeringa para verificar que es capaz de recabar datos.

Para simular la altura del prototipo, el modelo se colocó sobre cuatro soportes de madera de 1.5x1.5 cm de lado, y 10 cm de altura, los cuales funcionaron como canales para agrupar las mangueras y dirigirlas hacia el orificio de la mesa giratoria por el cual se conectan al equipo de cómputo. Los soportes de madera se sujetaron de la mesa de madera mediante cinta, procurando que se tuviera un acabado curvo para evitar efectos no deseados.

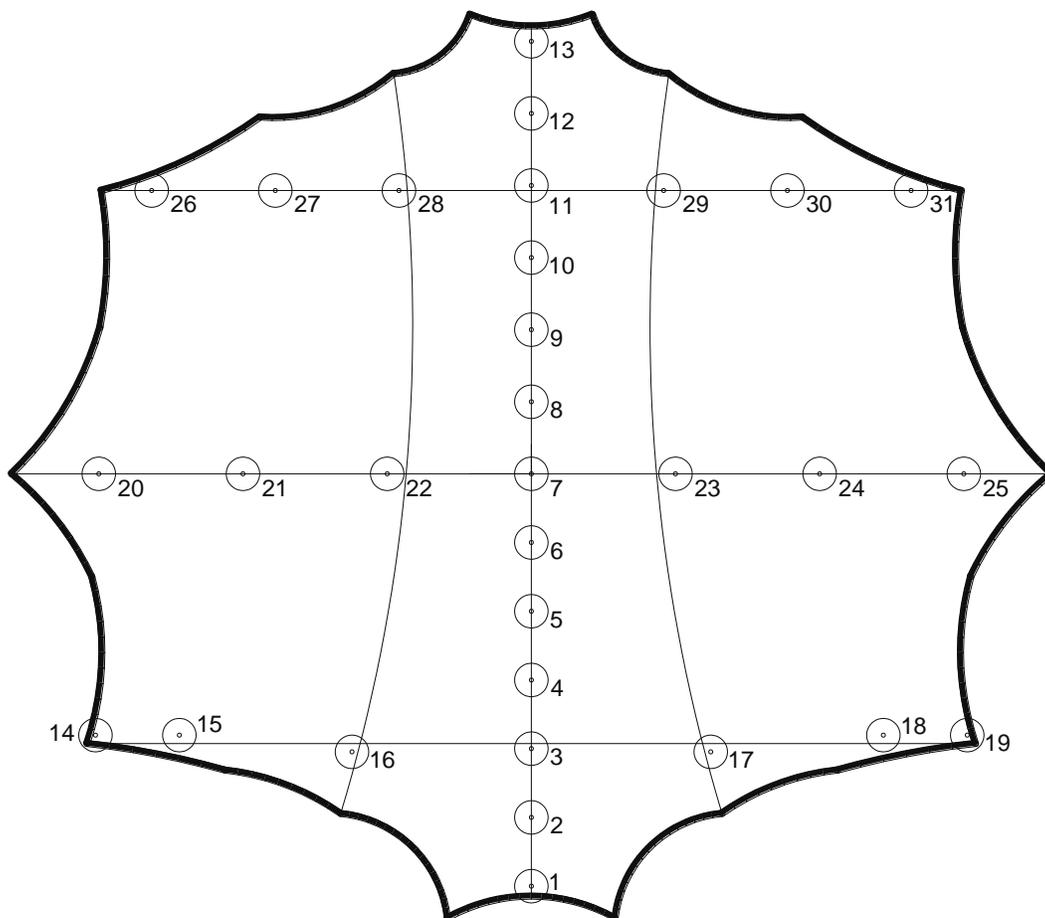


Figura 12. Numeración de puntos de muestreo.



Figura 13. Instrumentación de modelo, vista en planta

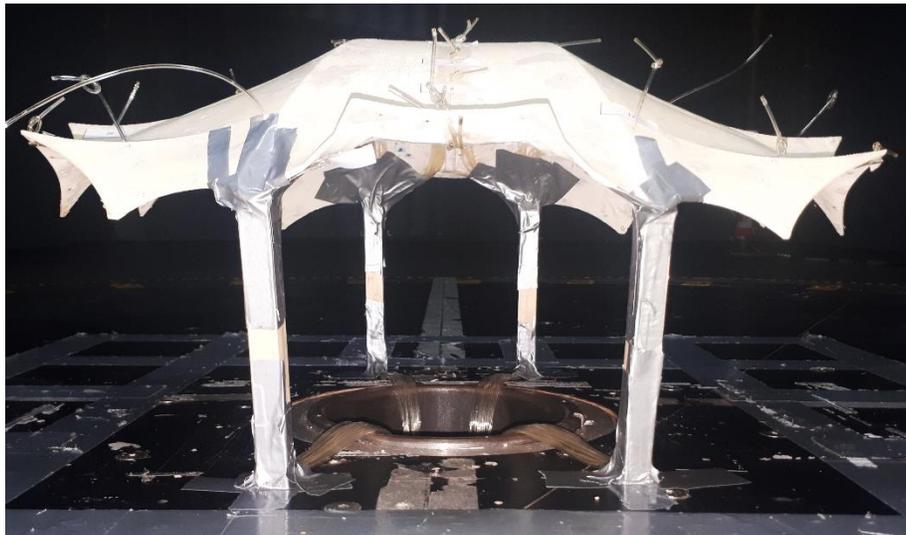


Figura 14. Instrumentación del modelo, vista en elevación.

La orientación del modelo correspondiente a los  $0^\circ$  de la mesa giratoria fue considerando el orificio número 1 como cara a frontal para que, cuando finalmente la mesa giratoria culminara los  $180^\circ$ , este quedara en la posición posterior pasando por la posición lateral. En la figura 15 se muestran las direcciones utilizadas.

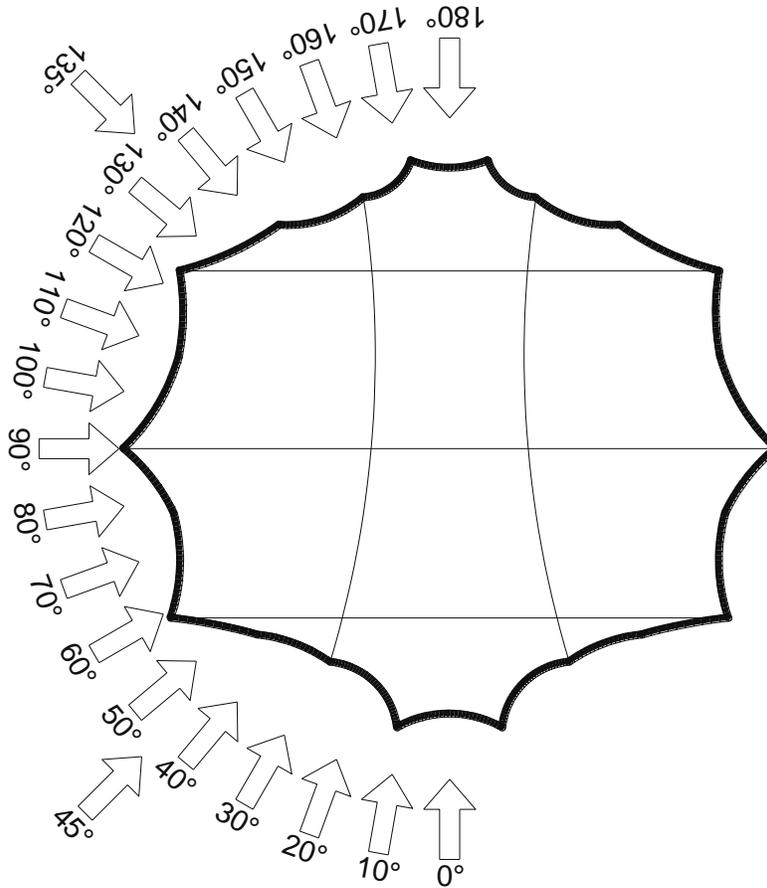


Figura 15. Direcciones de incidencia del viento durante el análisis.

### III.5.3 Adquisición de datos

La recopilación de los datos se realizó utilizando el programa computacional propio del túnel de viento, el cual permite la programación del ángulo de giro, el tiempo entre giros, así como la frecuencia de recopilación que, para nuestro caso, resulta de 312.5 datos por segundo.

Se registraron alrededor de 38 mil datos por cada tap, dirección y velocidad.

### III.5.4 Procesamiento de datos

Ya que justo al cambiar de dirección el flujo debe estabilizarse, y al hacer el giro el programa continúa recabando datos para la dirección actual, es importante depurar los resultados para obtener valores dentro de un rango de variabilidad lo más corto posible. Para esto, se decidió utilizar el tercio medio de la información recabada, es decir, alrededor de 12900 datos para un tiempo de prueba de 40 segundos, para cada tap, dirección y velocidad.

### III.5.5 Cálculo de coeficientes de presión

Para el cálculo de los coeficientes de presión se utilizó la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{P_{tap} - P_E}{P_D}$$

Donde:

$C_p$ , es el coeficiente de presión

$P_{tap}$ , es la presión medida en el tap.

$P_E$ , es la presión estática medida con el tubo Pitot

$P_D$ , es la presión dinámica obtenida de la resta de la presión total menos la presión estática, ambas medidas en el tubo Pitot.

### III.5.6 Cálculo de coeficientes de presión neta

Finalmente, los coeficientes de presión neta se obtienen sumando los coeficientes de presión obtenidos, para la misma ubicación, en la parte interna y externa:

$$C_{pn} = C_{pe} + C_{pi}$$

Donde:

$C_{pn}$ , es el coeficiente de presión neta en la ubicación

$C_{pe}$ , es el coeficiente de presión externo en la ubicación

$C_{pi}$ , es el coeficiente de presión interno en la ubicación

## III.6 Referencias

- Barlow, J. et al. (1999). Low-speed wind tunnel testing
- Gorlin, S.M; Slezinger, I.I (1965) Wind tunnels and their instrumentation.
- Hernández, B. et al. (2010) Procedimiento simplificado de diseño eólico de tenso estructuras (SMIE XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural)
- White, F. (2011) Fluid Mechanics

- Nava, R (2019) Comparación de los efectos del viento en un edificio esbelto: metodología analítica vs metodología experimental en túnel de viento
- Ortiz, S. (2018) Estudio de los efectos del viento en edificio irregular de gran altura con pruebas experimentales en túnel de viento.
- Ruiz, J. et al (2001) Aerodinámica civil. Cargas de viento en las edificaciones.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Por cada dirección, se obtuvieron alrededor de 38,380 tomas por cada orificio de muestreo, teniendo cada uno de estos dos *sensores*, los cuales corresponden a la toma de presión estática y presión total. De estos datos, como se mencionó anteriormente, únicamente se utilizó el tercio medio por cuestión de estabilización del fluido tanto al inicio de la dirección en estudio, como al final durante la prueba. Así mismo, para cada dirección se realizó una revisión general de los valores de los coeficientes de presión obtenidos, para determinar si los valores oscilaban en un rango congruente. Del análisis, se desecharon algunas direcciones por tener múltiples picos cuyo valor excedía en más de diez veces el valor promedio. Las direcciones analizadas son las siguientes: 20°, 30°, 40°, 45°, 50°, 60°, 70° y 135°, tanto para 300 como 500 rpm del túnel.

A continuación, se presenta el análisis para la dirección 20°.

### IV.1 Dirección 20°, 300 rpm

En la siguiente gráfica (ver figura 16) podemos observar la variación del coeficiente de presión neta para el **punto 1** de muestreo durante el tercio medio de la prueba. Como se observa, los valores oscilan entre 0.43 y 1.25, con un valor promedio de 0.857.

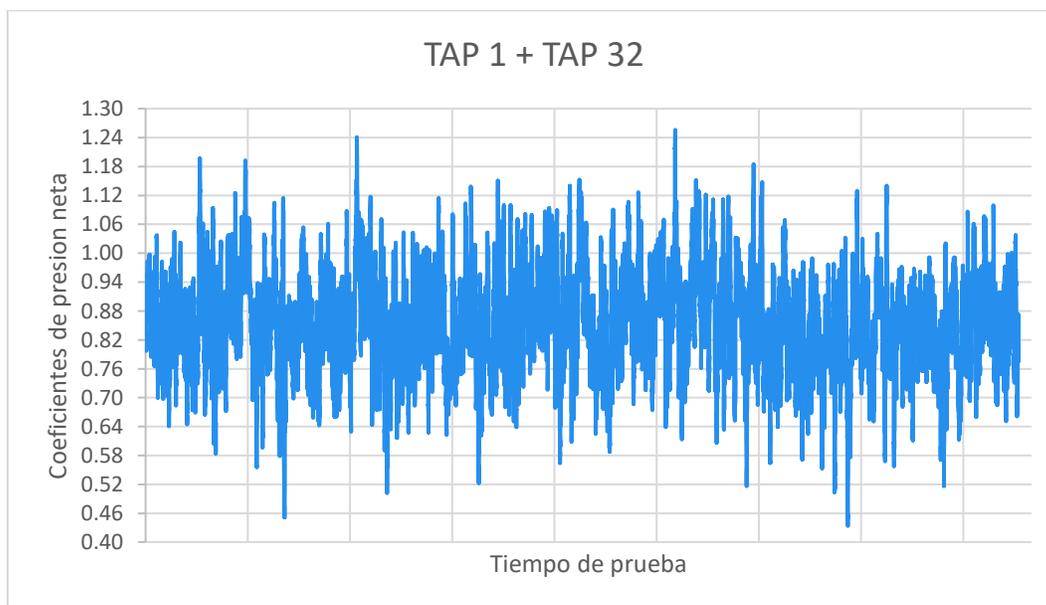


Figura 16. Variación del coeficiente de presión neta para el punto 1 de muestreo, dirección de 20° y velocidad de 300 rpm.

Si ahora observamos la gráfica para otro punto, por ejemplo, el **punto 17**, tenemos un valor máximo de 0.51 y mínimo de -0.73, con un valor promedio de 0.05.

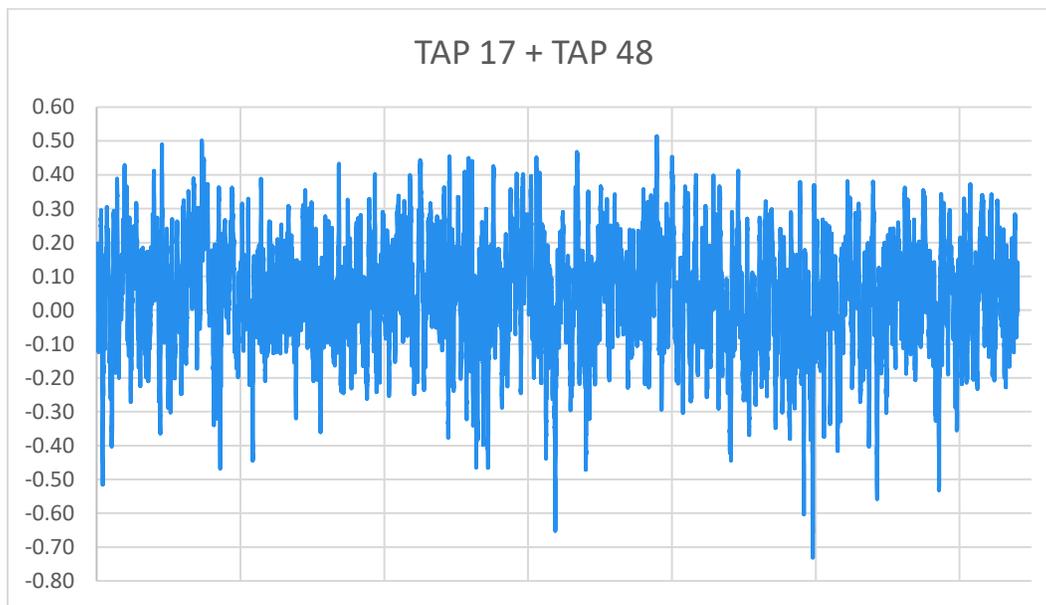
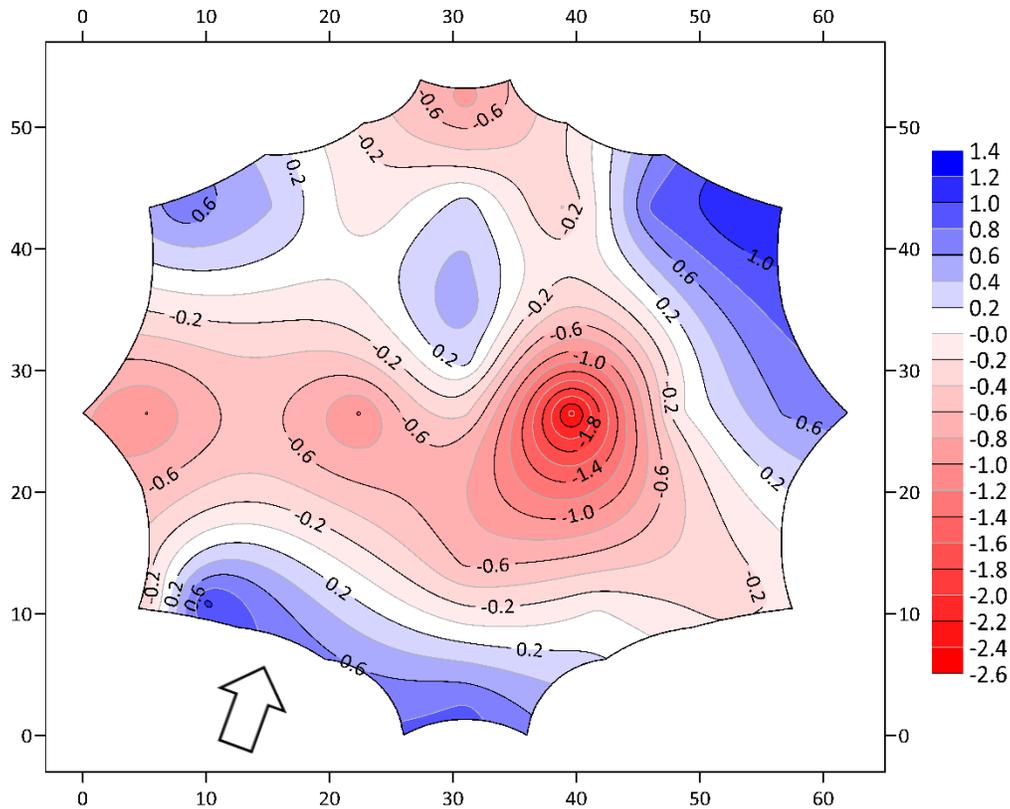


Figura 17. Variación del coeficiente de presión neta para el punto 17 de muestreo, dirección de 20° y velocidad de 300 rpm.

En el ANEXO 1. Gráficas de coeficientes de presión, se muestran las gráficas de los 31 puntos de muestreo para la dirección de 20° y 300 rpm.

Para poder obtener mayor sensibilidad de la variación de los datos sobre la superficie del modelo, se realizaron diagramas utilizando el programa SURFER que permiten extrapolar, a partir de los 31 puntos de muestreo, valores para toda la superficie. En la figura 18 se muestra el diagrama generado para la dirección de 20° y 300 rpm, con los valores promedio de los coeficientes de presión neta. En tonos rojos, se presentan los valores inferiores a cero (succión), pasando por el blanco (cero) y teniendo en azul los valores positivos (presión).



**Valor máximo = 1.17**  
**Valor mínimo = -2.46**

Figura 18. Extrapolación de la variación de los coeficientes de presión neta, 20° y 300 rpm.

Como se observa, los coeficientes en la *cara frontal* presentan valores positivos (presión), posteriormente, en la misma dirección, se presenta una franja con valores nulos, para convertirse en valores negativos (de succión) que se intensifican en una zona contraria a la cara frontal; a partir de ésta zona, nuevamente se presenta una franja de valores nulos para, finalmente, terminar con valores positivos (presión) en la *cara de sotavento*, Conforme a la escala de colores, se definen claramente tres zonas de intensidad máxima de coeficientes: *frontal*, *posterior* y *central* (un poco cargado a la derecha) de la estructura, mientras que el resto de la superficie cuenta con valores ya sea de succión o de presión, cercanos a cero.

#### IV.2 Dirección 45°, 300 rpm.

De la misma manera que para la dirección anterior, se presentan las gráficas de la variación de coeficientes para el punto 1 (figura 19) y 17 (figura 20), en los cuales se observa que la dispersión de los valores es similar a la dirección de 20°.

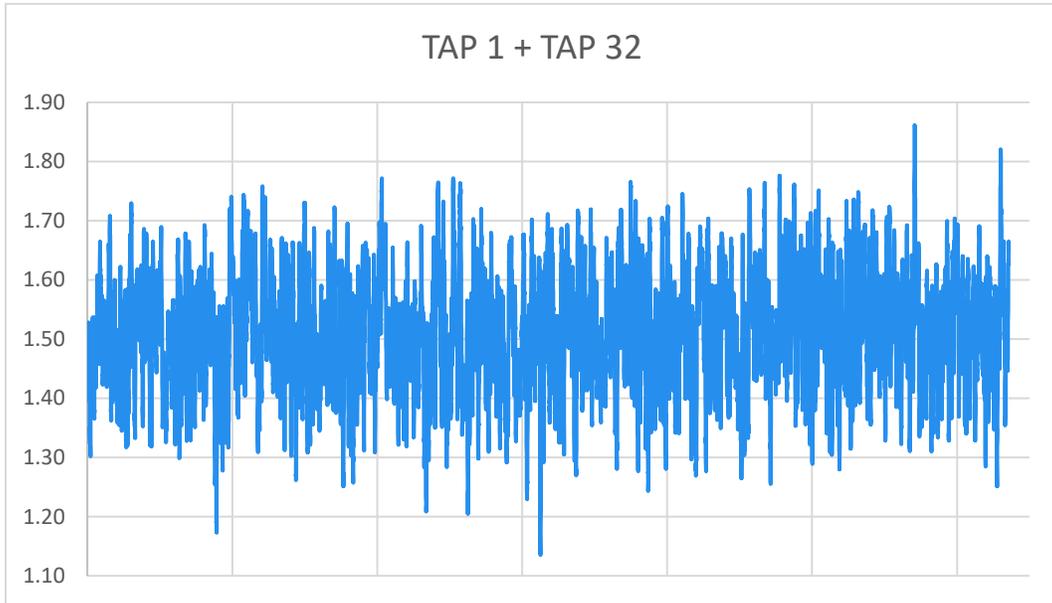


Figura 19. Variación del coeficiente de presión neta para el punto 1 de muestreo, dirección de 45° y velocidad de 300 rpm.

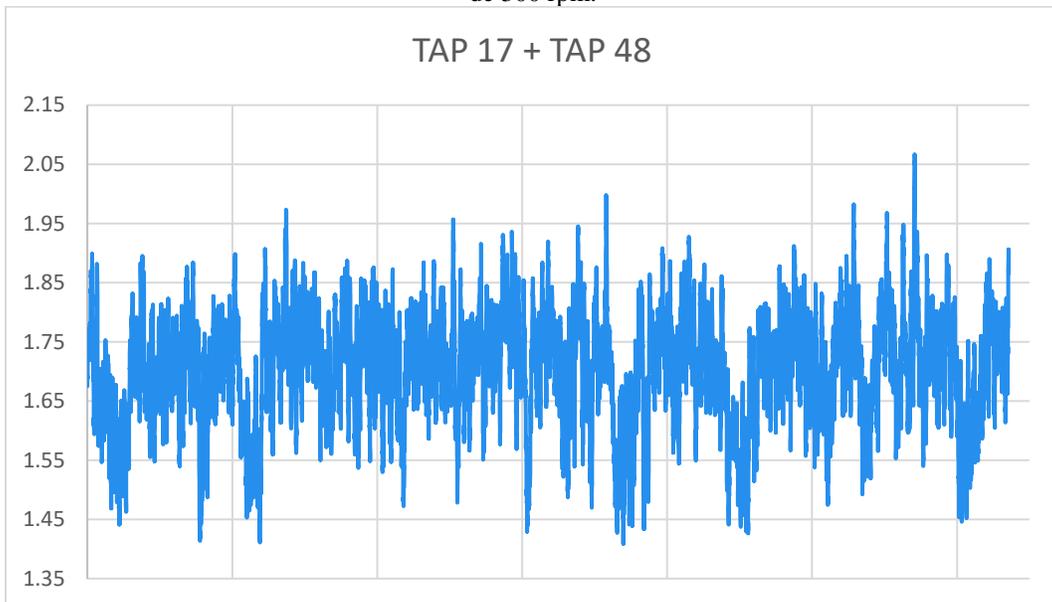
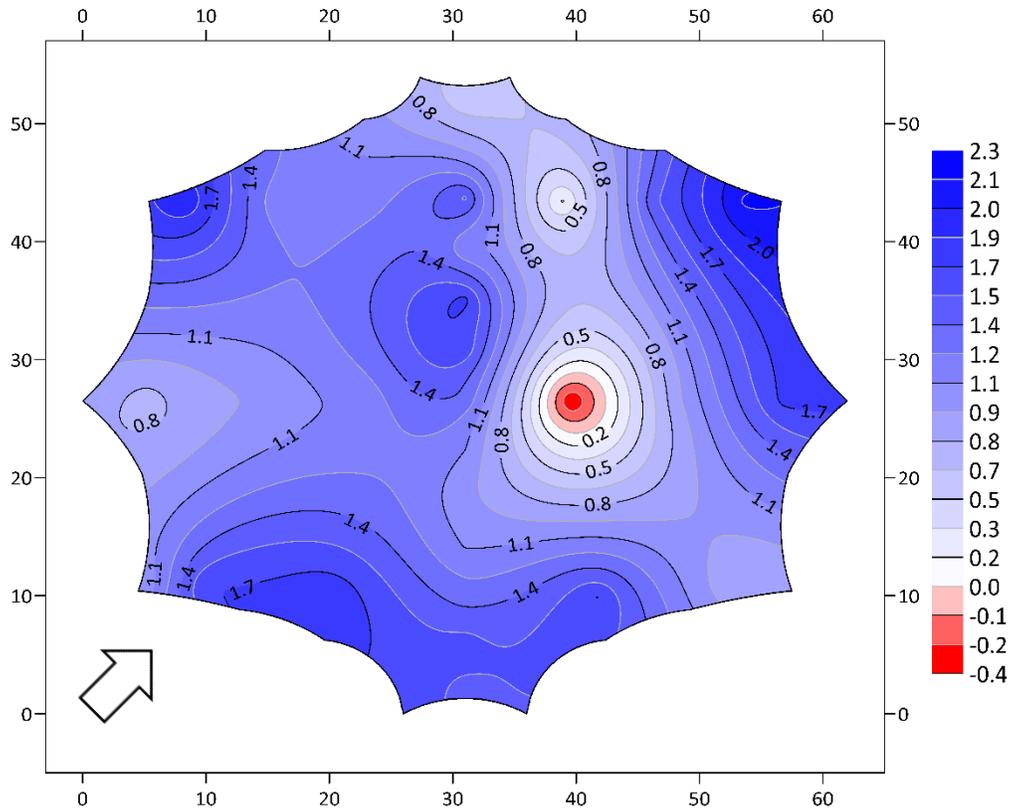


Figura 20. Variación del coeficiente de presión neta para el punto 17 de muestreo, dirección de 45° y velocidad de 300 rpm.

Así mismo, se muestra el diagrama de extrapolación para la dirección de 45° y 300 rpm. En contraposición con la dirección de 20°, el núcleo donde se concentraban los mayores coeficientes negativos disminuyó (a la par de dichos valores), dando a paso a una mayoría de valores positivos (de presión) en toda la superficie.



**Valor máximo: 2.17**  
**Valor mínimo: -0.39**

Figura 21. Extrapolación de la variación de los coeficientes de presión neta, 45° y 300 rpm.

Si observamos en los esquemas presentados en el Anexo 2 hasta la dirección de 60°, nos damos cuenta de que los coeficientes se encuentran dentro del rango de -3.0 a 3.0.

#### IV.3 Dirección 70°, 300 rpm.

Al igual que para las direcciones anteriores, se presentan las gráficas de variación en los puntos 1 (figura 22) y 17 (figura 23) de muestreo, así como el esquema de extrapolación en la superficie (figura 24). Es evidente que los valores de los coeficientes son superiores que para las direcciones de 20° y 45° siendo el máximo de 4.76, comenzando a superar el intervalo expuesto anteriormente de -3.0 a 3.0. Esta tendencia se ve reflejada más claramente en los valores para los coeficientes obtenidos con 500 rpm, en donde se presentan valores de coeficiente de presión neta de hasta 7.3.

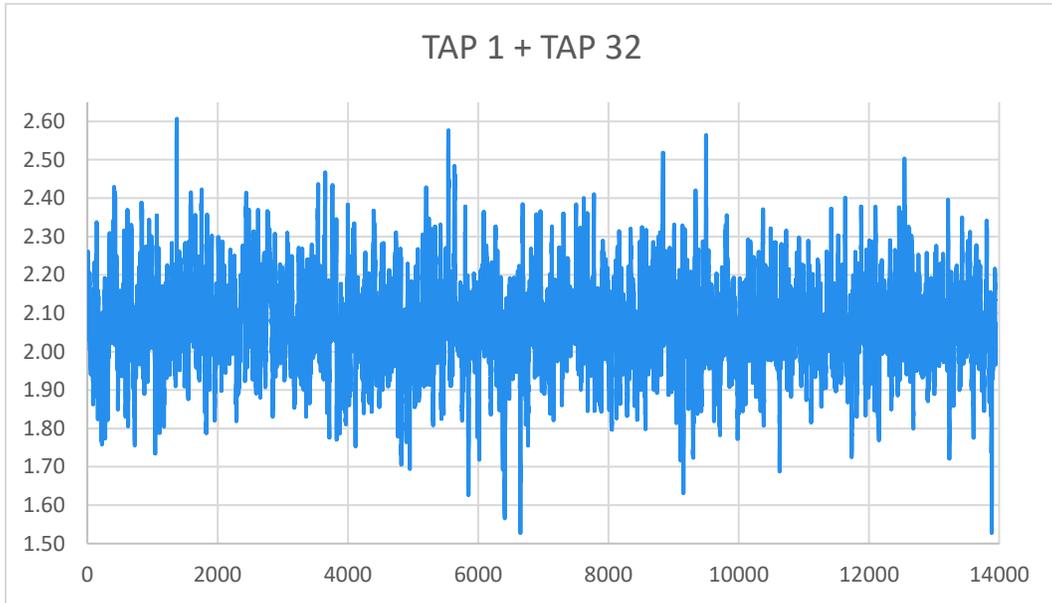


Figura 22. Variación del coeficiente de presión neta para el punto 1 de muestreo, dirección de 70° y velocidad de 300 rpm.

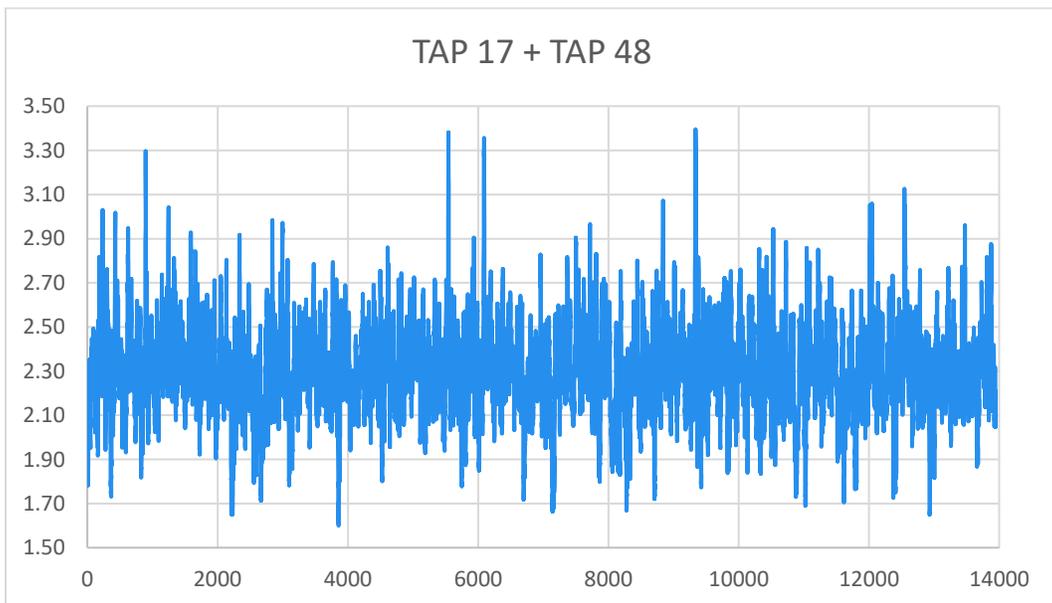
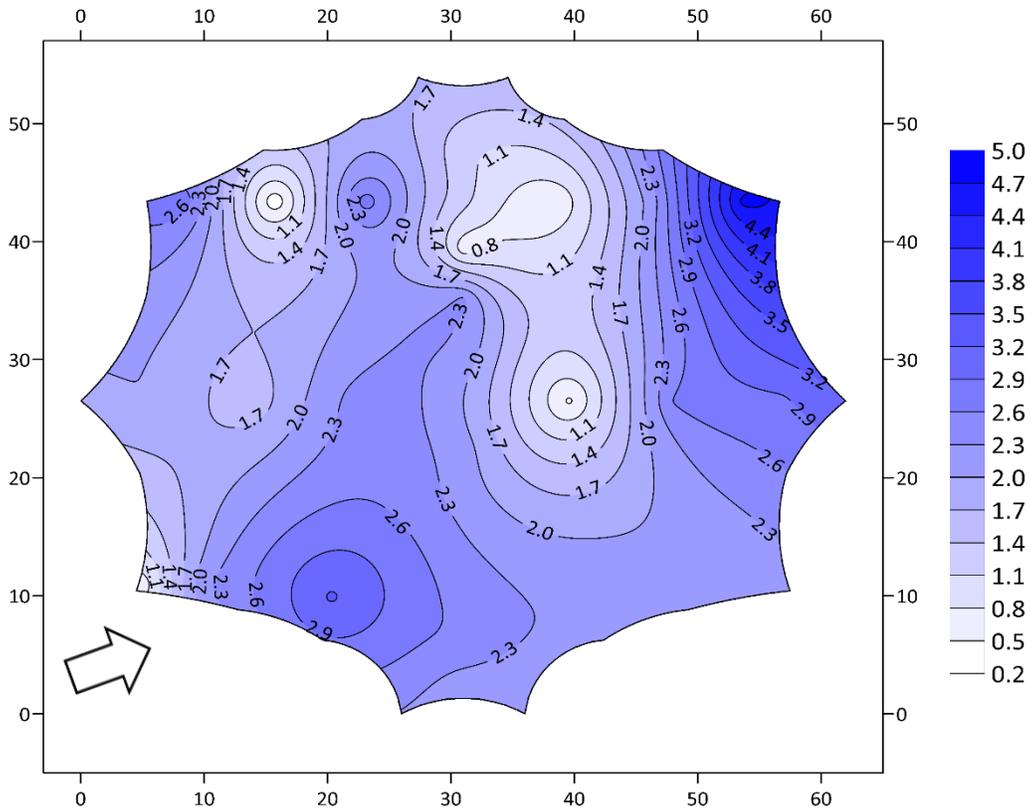


Figura 23. Variación del coeficiente de presión neta para el punto 17 de muestreo, dirección de 70° y velocidad de 300 rpm.



**Valor máximo: 4.76**  
**Valor mínimo: 0.29**

Figura 24. Extrapolación de la variación de los coeficientes de presión neta, 70° y 300 rpm.

Como se observa en la figura 24, las áreas frontal y posterior que se mencionaron en las direcciones anteriores (ahora siendo las áreas *laterales*), continúan siendo claras regiones de valores altos de los coeficientes; así mismo, el núcleo central donde anteriormente los valores eran negativos, ahora son positivos permaneciendo por debajo de los valores en los *laterales*.

En el Anexo 2, se presentan la totalidad de esquemas de extrapolación de los coeficientes de presión neta, tanto para velocidad de 300 rpm como para 500 rpm.

#### IV.4 Comparación entre coeficientes para una misma dirección y diferentes velocidades.

Como ya se explicó, se realizaron dos pruebas a diferentes velocidades con las mismas condiciones de ángulos de incidencia. Comparemos los coeficientes de presión neta presentados en la figura 16, con los coeficientes para el mismo punto de muestreo y dirección, pero para la velocidad de 500 rpm.

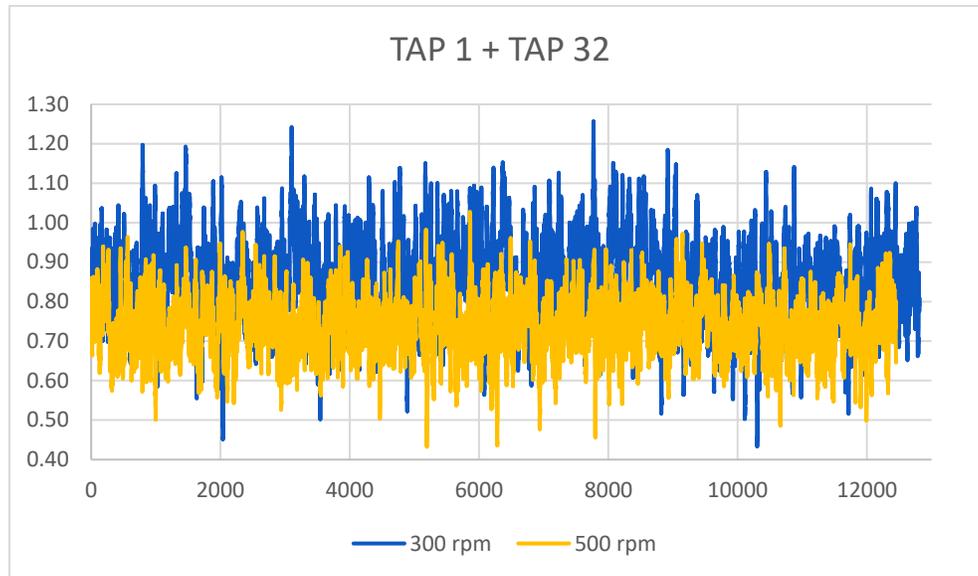


Figura 25. Comparación entre coeficientes de presión en el punto 1, dirección de 20°, para ambas velocidades

Como se observa, aunque los coeficientes para 500 rpm resultan ligeramente menores a los correspondientes a la velocidad de 300 rpm, permanecen dentro de rangos similares, lo que se comprueba comparando los valores promedios de 0.74 y 0.86 respectivamente.

Cabe mencionar que, durante la prueba en la velocidad de 500 rpm, el modelo presentó un *desplazamiento* generalizado, debido al incremento de la velocidad la cual ocasionó una rotación en los apoyos.

Así mismo, durante ambas pruebas, se presentaron vibraciones durante la segunda mitad de las direcciones: a partir de los 90°. Esto es, con alta probabilidad, el causante de la dispersión de los coeficientes de velocidad en las últimas direcciones, que se muestran en la siguiente sección.

#### IV.5 Variación de los coeficientes conforme a la dirección del viento

Para tener un panorama general de cómo varían los coeficientes de presión neta para un mismo punto a lo largo de las diferentes direcciones del viento, se presenta la figura 26, donde se muestran simultáneamente, como ejemplo, la variación para el punto 1 en la dirección 20°, 45° y 70°. Como observamos, los valores de coeficientes para la dirección de 45° varían en un rango mayor que para la dirección de 20°, siendo aún mayores para la dirección de 70°.

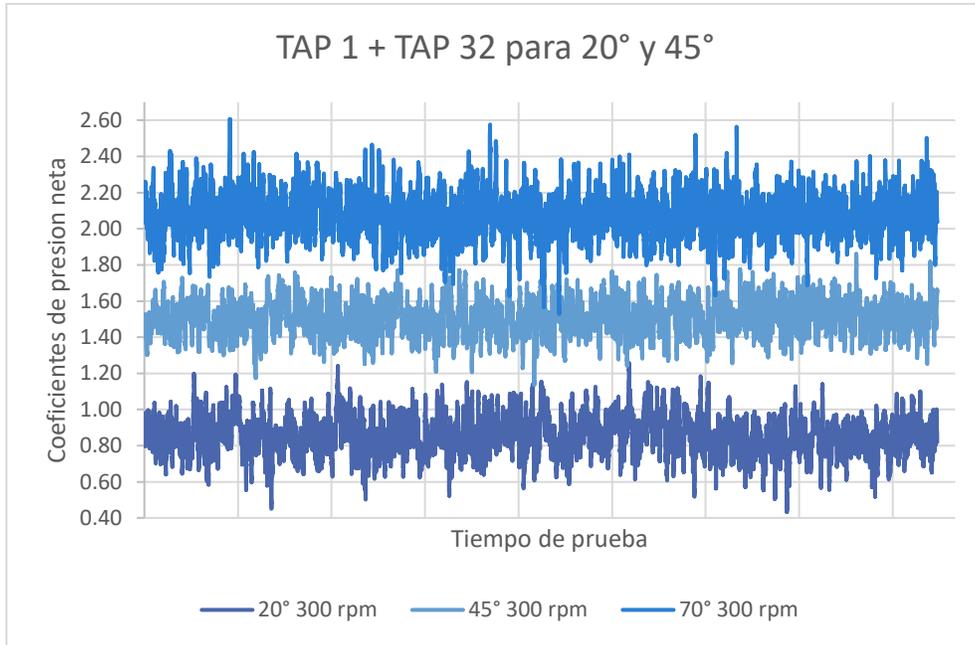


Figura 26. Comparación entre coeficientes de presión neta para 20°, 45° y 70°.

Por otra parte, en la figura 27, se presentan, para el caso del punto 1, la variación del **coeficiente promedio** para las distintas direcciones analizadas, apreciándose que los valores aumentan a la par de los grados de giro del modelo. En la parte final del gráfico, tenemos un valor de 0.46 correspondiente a un giro de 135 grados, el cual resulta incluso menor que el valor reportado para 20°.

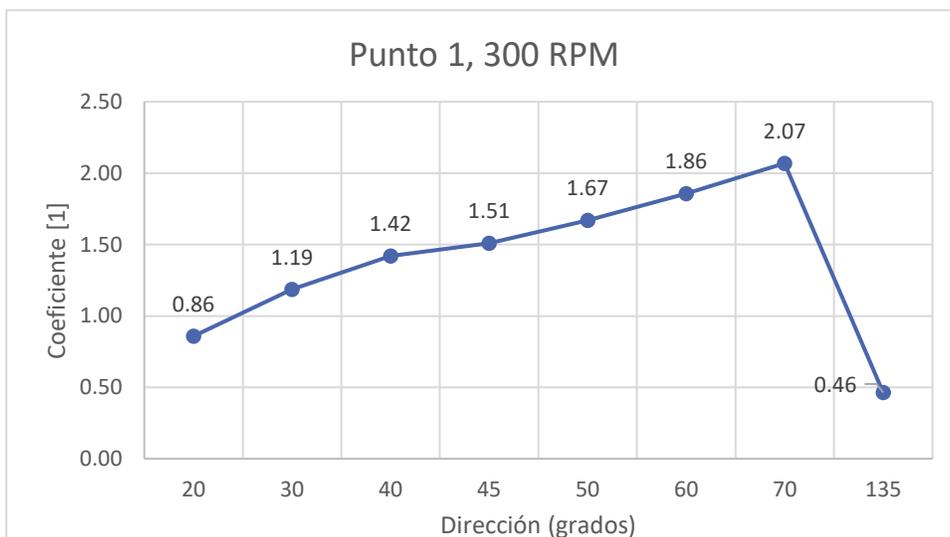


Figura 27. Variación del coeficiente promedio para el punto 1, 300 rpm.

Finalmente, en la figura 28, se muestran las variaciones en conjunto de todos los puntos de muestreo para la **velocidad de 300 rpm**, en donde claramente se ve una tendencia similar en

cada uno de ellos para las primeras direcciones hasta los 60°, a partir de ahí comienza a presentarse una dispersión en la manera en que cambian los coeficientes, siendo máxima en los 135°.

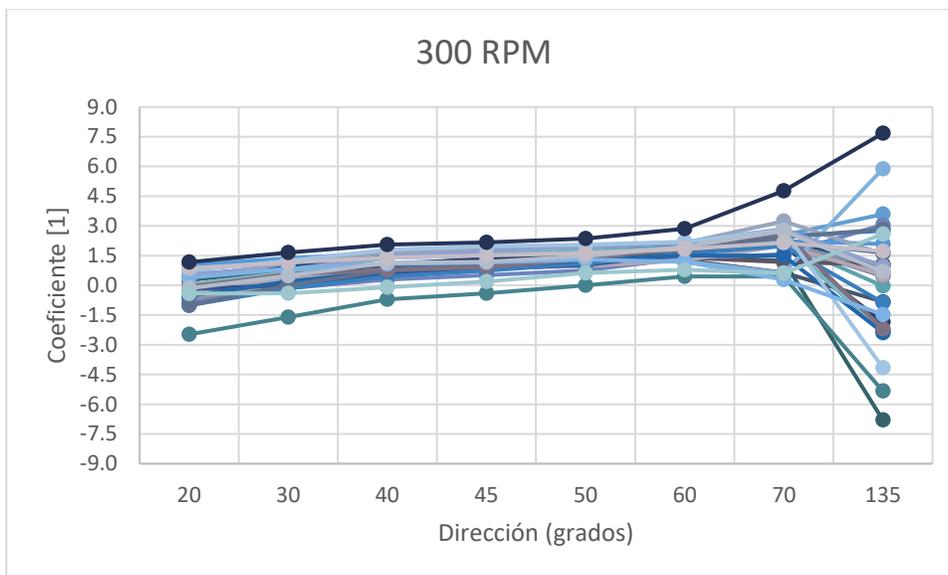


Figura 28. Variación de los coeficientes promedio en 300 rpm.

Análogamente, se presenta el gráfico para la **velocidad de 500 rpm**, en el cual se aprecia que la dispersión de valores es similar que para los 300 rpm.

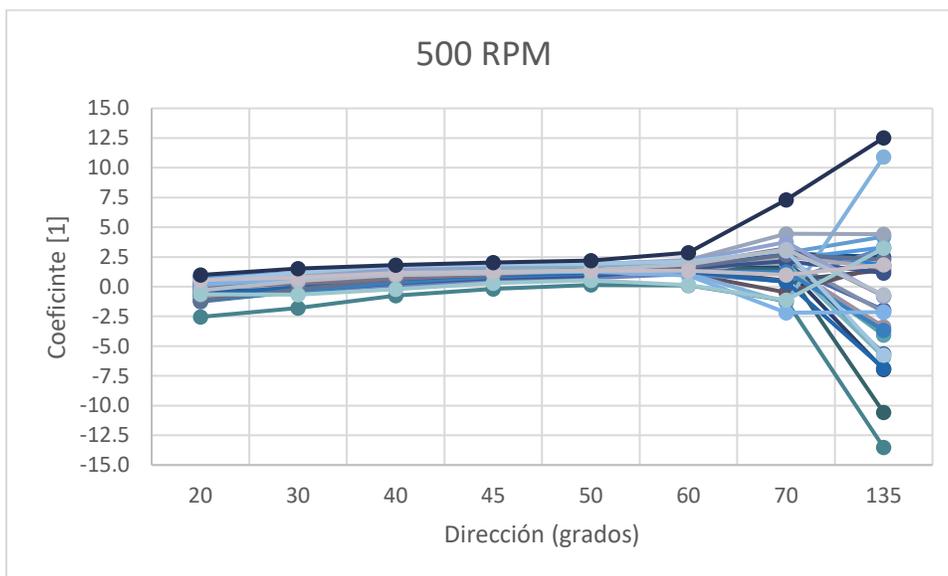


Gráfico 1. Variación de los coeficientes promedio en 500 rpm.

Como se mencionó anteriormente, durante la segunda mitad de las direcciones (a partir de  $90^\circ$ ), se presentó una inestabilidad en el modelo, que se reflejó en vibraciones, principalmente para la prueba con velocidad de 500 rpm, ocasionadas por la flexión en los apoyos. Esto derivó, con seguridad, en la dispersión de los valores de los coeficientes de presión neta para los distintos puntos de muestreo, comprobando así que la incidencia del viento se modificó debido al desplazamiento del modelo (ya que este desplazamiento ocasiona una variación de la velocidad relativa del viento respecto al modelo), y que, además, al presentarse de manera continua y dispersa, estas incidencias variaron aún más generando la dispersión de los valores de coeficiente de vibración presentadas en las últimas figuras.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

Conforme a lo expuesto en el capítulo anterior, se puede concluir lo siguiente:

1. Se realizó el ensayo en túnel de viento de un modelo a escala de una tensoestructura, para dos velocidades: 300 y 500 rpm, e incidencia del viento en direcciones desde  $0^\circ$  hasta  $180^\circ$ , pasando por  $45^\circ$  y  $135^\circ$ . Las pruebas fueron sin rugosidades. Se colocaron 31 puntos de muestreo, tanto en la parte superior como inferior del modelo. De la totalidad de datos obtenidos, se utilizó el tercio medio por ser el intervalo de tiempo con mayor estabilidad en el flujo. Así mismo, únicamente para evaluar la distribución y variación de los coeficientes, se utilizaron sus valores promedio.
2. Los coeficientes de presión neta, para las direcciones de  $20^\circ$  hasta  $60^\circ$ , tienen valores entre los intervalos de -3.0 a 3.0. Posteriormente, estos valores presentan un considerable incremento, siendo de hasta 7.31 para la dirección  $70^\circ$ , y 12.5 para los  $135^\circ$ .
3. En los esquemas de  $20^\circ$  hasta  $70^\circ$  se observan tres claras regiones de concentración de presiones, dos de ellas en extremos opuestos de la estructura, y una tercera en el parte central un poco cargado hacia el costado derecho. Las regiones extremas siempre presentan una paridad en sus valores, es decir, siempre son positivos (presión); mientras que, en la región central, los valores son siempre menores a los obtenidos en las regiones extremas, pasando de negativos a positivos durante el giro de la estructura; para el resto de la superficie los valores permanecen cercanos a 0. Este patrón se rompe cuando tenemos direcciones mayores a los  $90^\circ$ , pudiéndose observar en los resultados de los  $135^\circ$  en donde, aunque aún se perciben las áreas extremas con coeficientes positivos, ahora una franja central (y no solo un punto), presentan coeficientes negativos (succión).
4. La concentración en las regiones descritas en el punto 2, puede deberse a que el modelo presenta vértices, característicos de las tensoestructuras, en los que en la ejecución en obra se colocan postes que trabajan a compresión, y que podrían estar dirigiendo el viento a modo de una *cuchilla*. Posteriormente, al haber un cambio de curvatura en la parte central, se generan vórtices que provocan valores menores de los coeficientes (yendo desde la succión hasta una presión casi nula), y posteriormente

estabilizándose en el otro extremo del modelo generando otra concentración de coeficientes de presión directa.

5. De los puntos 2 y 3, se puede concluir que los valores en la región central son dependientes de lo sucedido en los bordes del modelo y presentan variaciones que obedecen a los cambios de curvatura característicos de las tensoestructuras.
6. Por otra parte, en general, los valores de los coeficientes de presión neta tienden a incrementarse proporcionalmente conforme se transita desde una dirección de  $20^\circ$  hasta los  $60^\circ$ . Posteriormente, se presenta una alta dispersión de los coeficientes, a partir de los  $70^\circ$ , siendo más notable en los  $135^\circ$ .
7. Comparando los coeficientes de presión neta, en un mismo punto de muestreo y dirección, para las dos velocidades, encontramos que varían en un 14% (comparando el menor respecto al mayor).
8. A partir del ángulo de incidencia de  $90^\circ$  y hasta los  $180^\circ$ , se presenta una dispersión de los valores promedio de coeficiente de presión neta, debidos a la inestabilidad presentada en el modelo, la cual resulta mayor en la velocidad de 500 rpm.

Se emiten las siguientes recomendaciones:

- a. Se recomienda realizar una mayor cantidad de ensayos de tensoestructuras en túnel de viento, para tener diferentes puntos de comparación de los resultados, así como un mayor panorama del comportamiento de los coeficientes de presión neta en las fronteras de cambio de curvatura, y cómo afectan éstas y los vértices en el flujo de viento.
- b. Mientras no exista una metodología que permita la obtención de coeficientes de presión neta para cualquier geometría de tensoestructura, se deberán realizar estudios en túnel de viento para determinar su comportamiento, y con ello su correcto funcionamiento.
- c. Desde un punto de vista estructural, una vez obtenidos los coeficientes en túnel de viento, y como fue nuestro caso de estudio, se deberá prestar especial atención en las zonas donde se concentren los mayores valores, y no utilizar valores promedio y sí valores puntuales para el diseño de todos los elementos de una tensoestructuras con grandes dimensiones, debido a que tanto compresiones como tensiones derivadas de

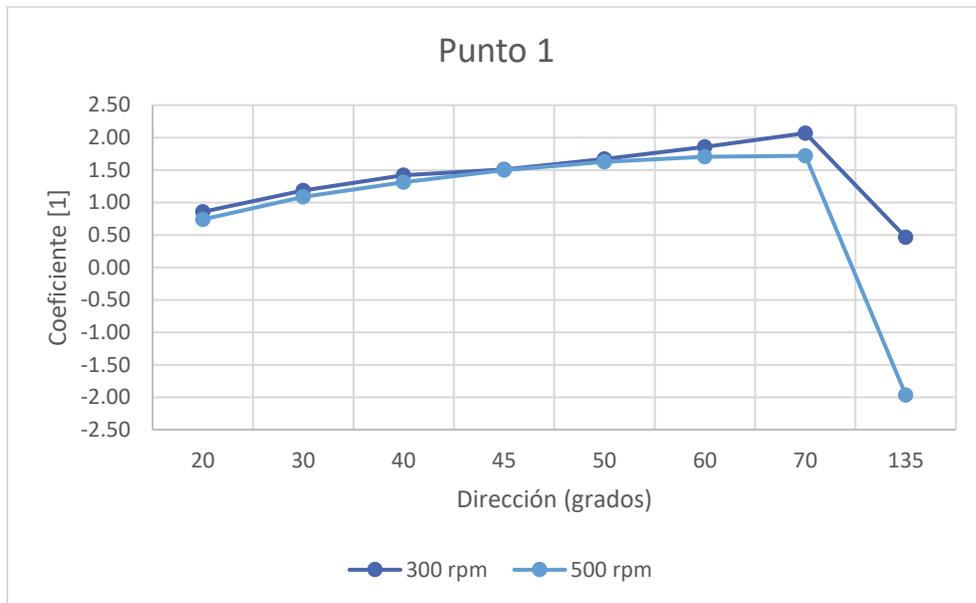
las presiones y succiones, pueden alcanzar valores extremos alejados del promedio, como se observó en este caso de estudio. La sugerencia es obtener los valores máximos y mínimos en los diferentes puntos, y con ellos realizar diferentes escenarios de análisis, con el fin de cubrir la envolvente de los efectos debidos al viento.

- d. Se sugiere la elaboración de modelos flexibles, para estudiar la no linealidad de las deformaciones debidas a ráfagas de viento en diferentes ambientes y temperaturas.

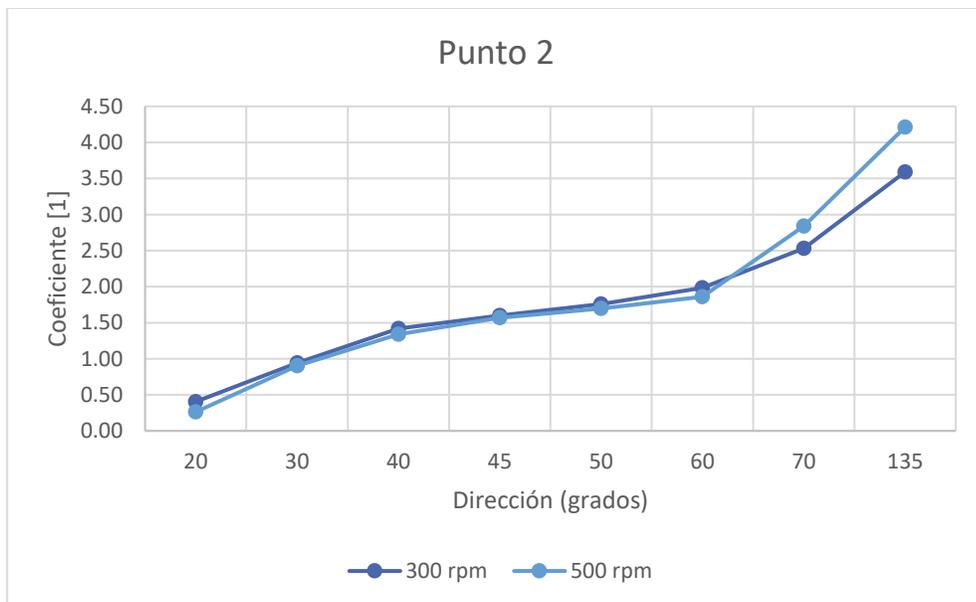
## ANEXO 1. Gráficas de coeficientes de presión neta

A continuación, se presentan las gráficas de los coeficientes de presión neta promedio para cada punto de muestreo, y para ambas velocidades: 300 rpm y 500 rpm.

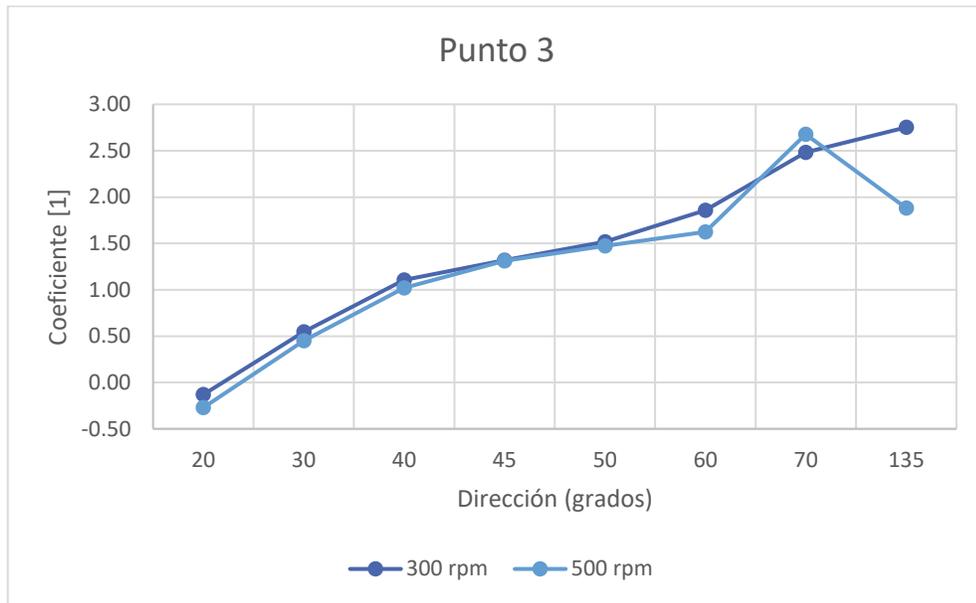
- Punto 1



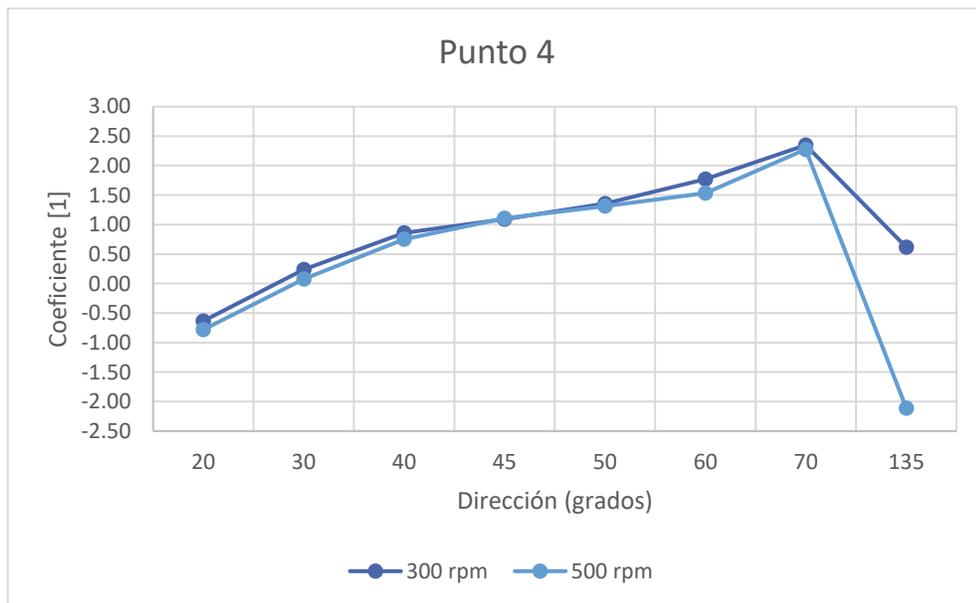
- Punto 2



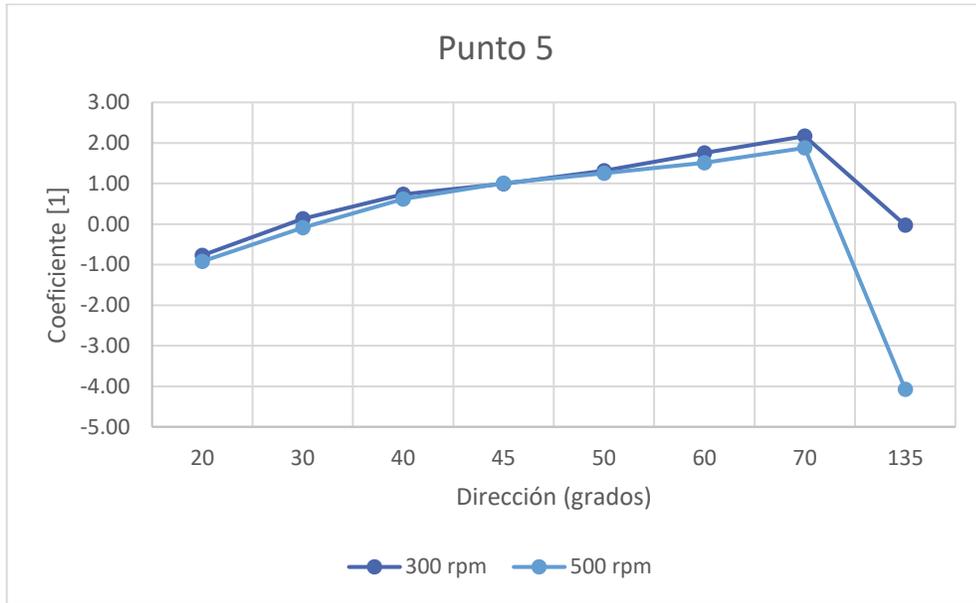
- Punto 3



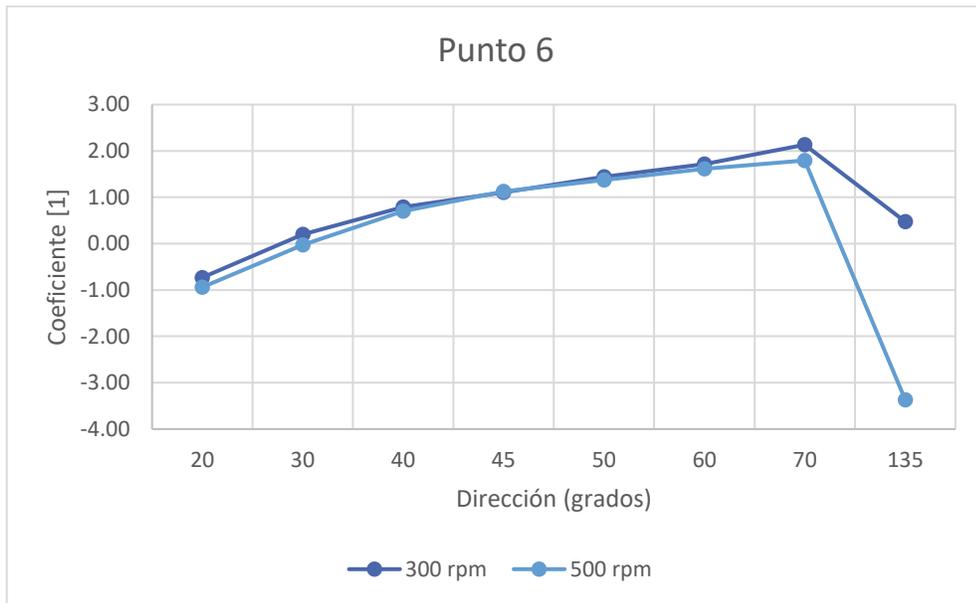
- Punto 4



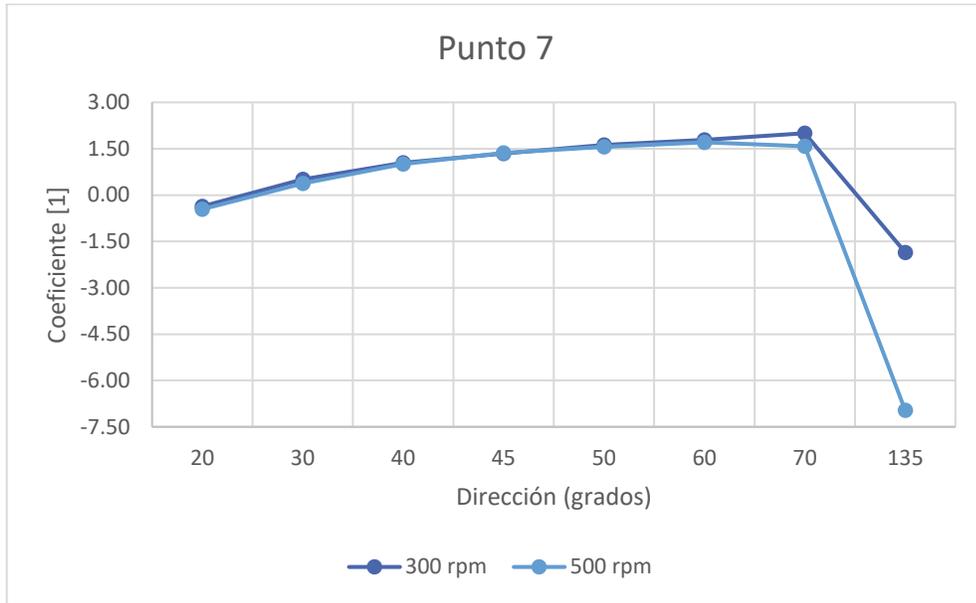
- Punto 5



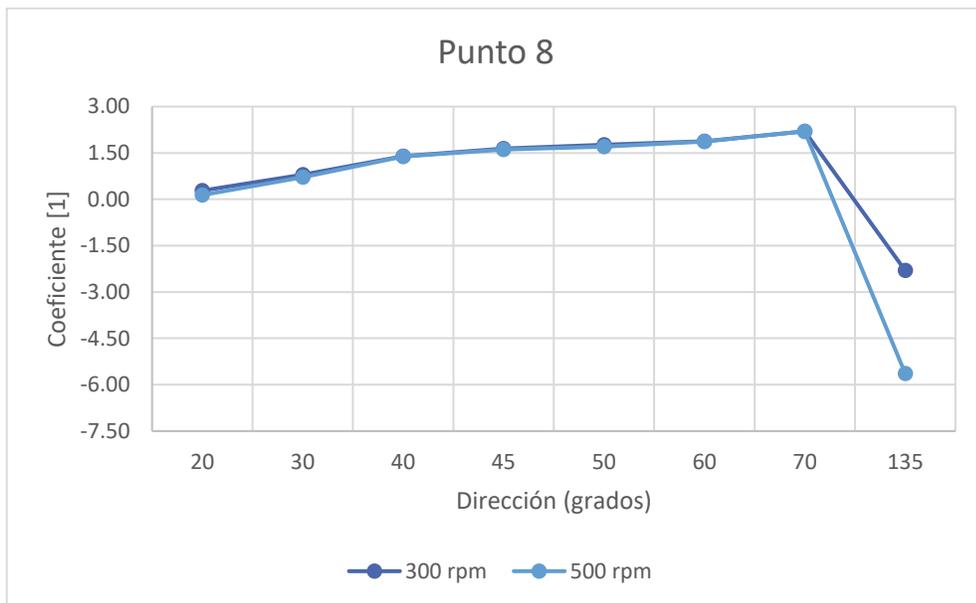
- Punto 6



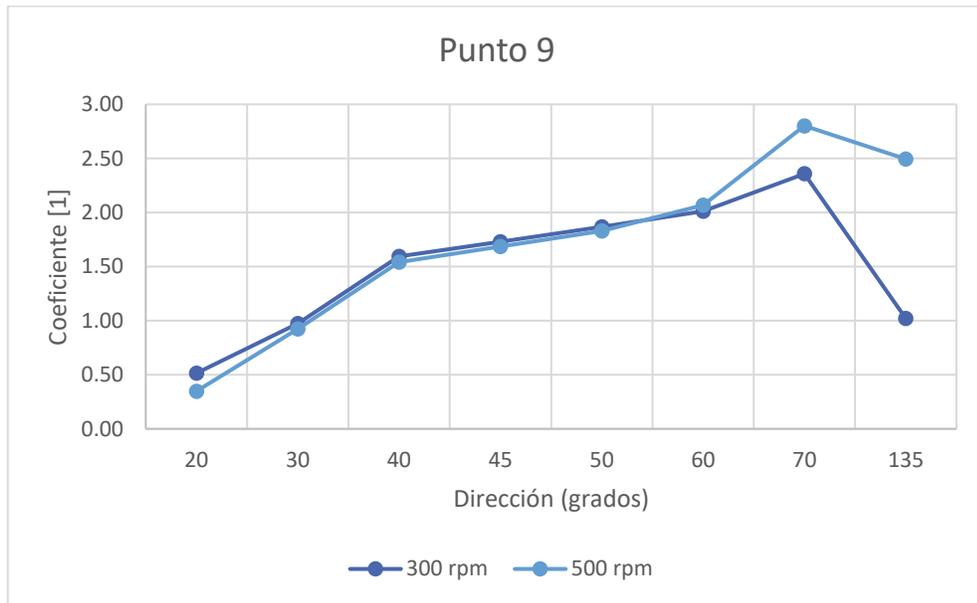
- Punto 7



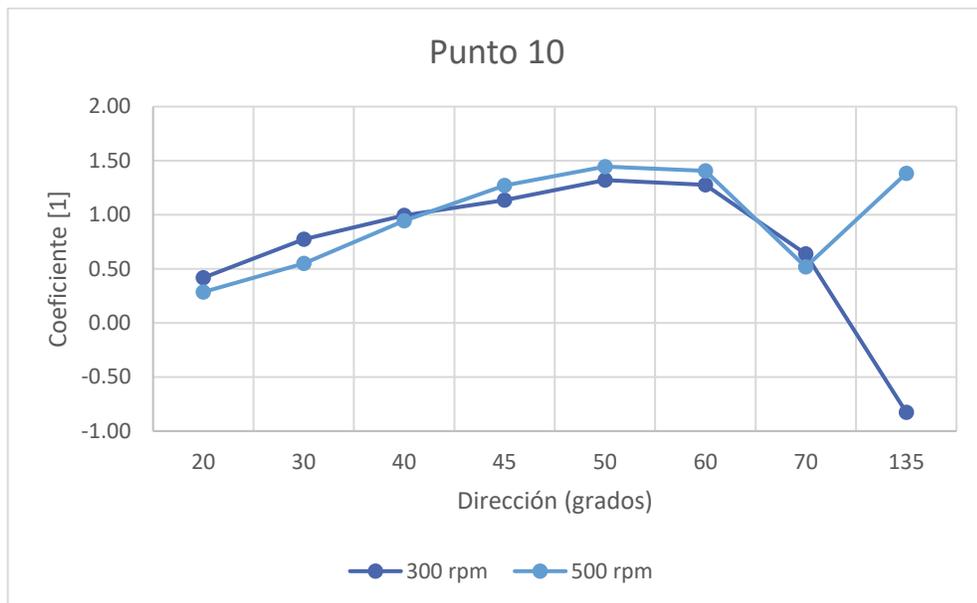
- Punto 8



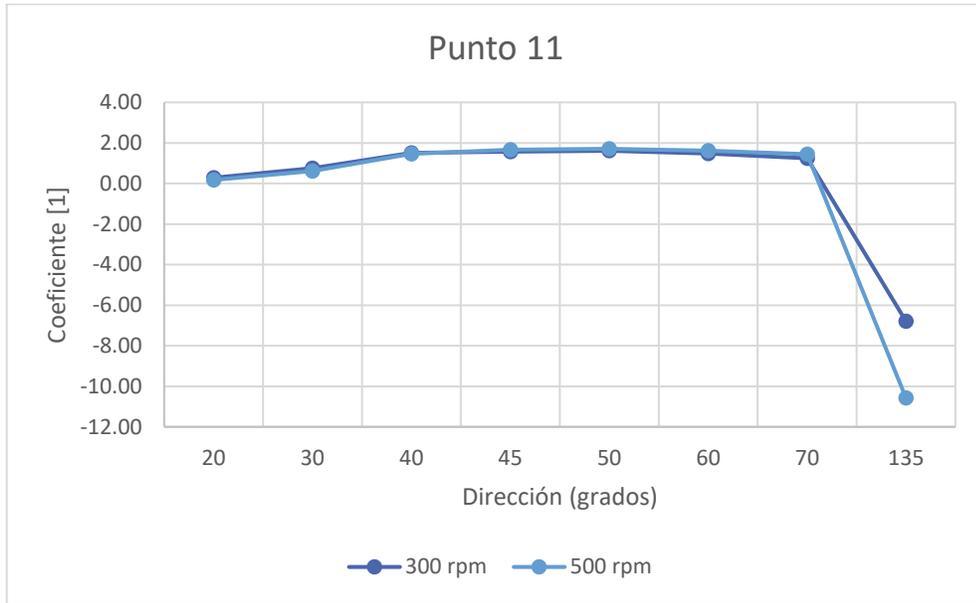
- Punto 9



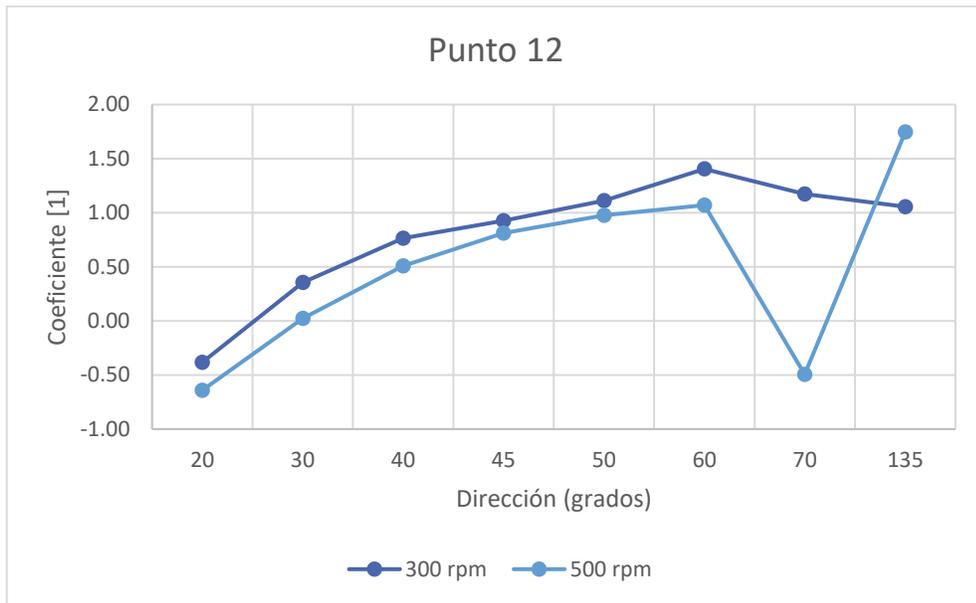
- Punto 10



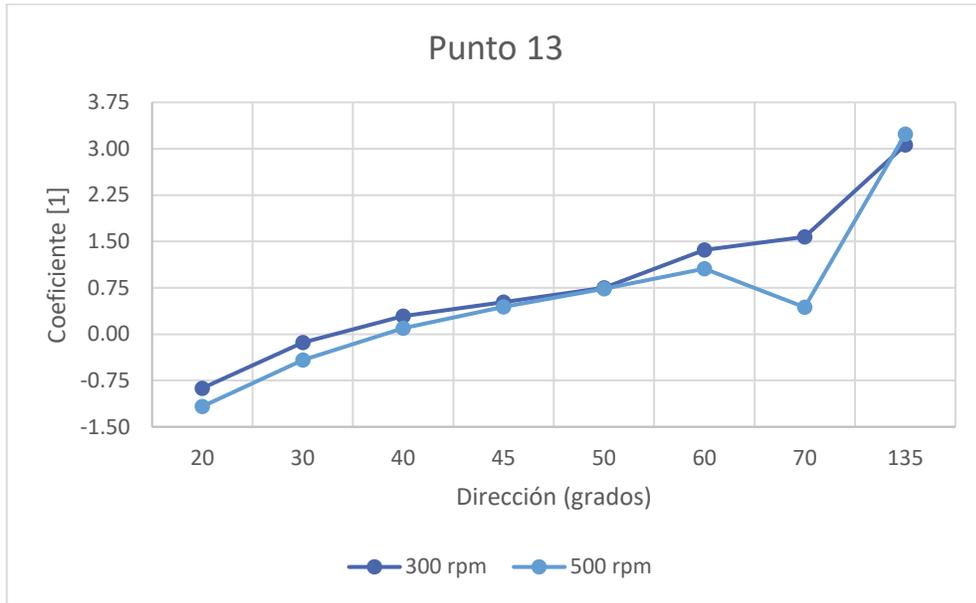
- Punto 11



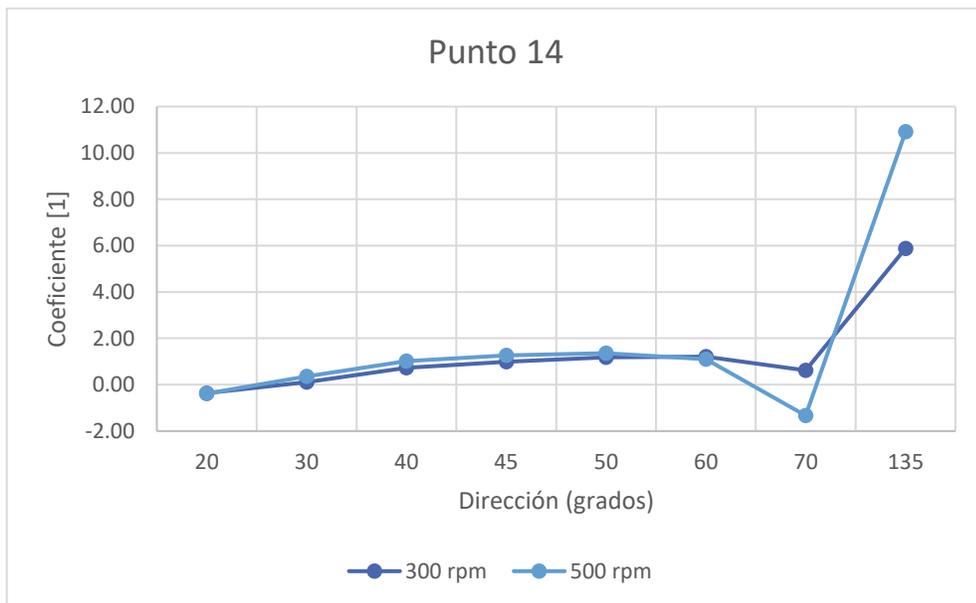
- Punto 12



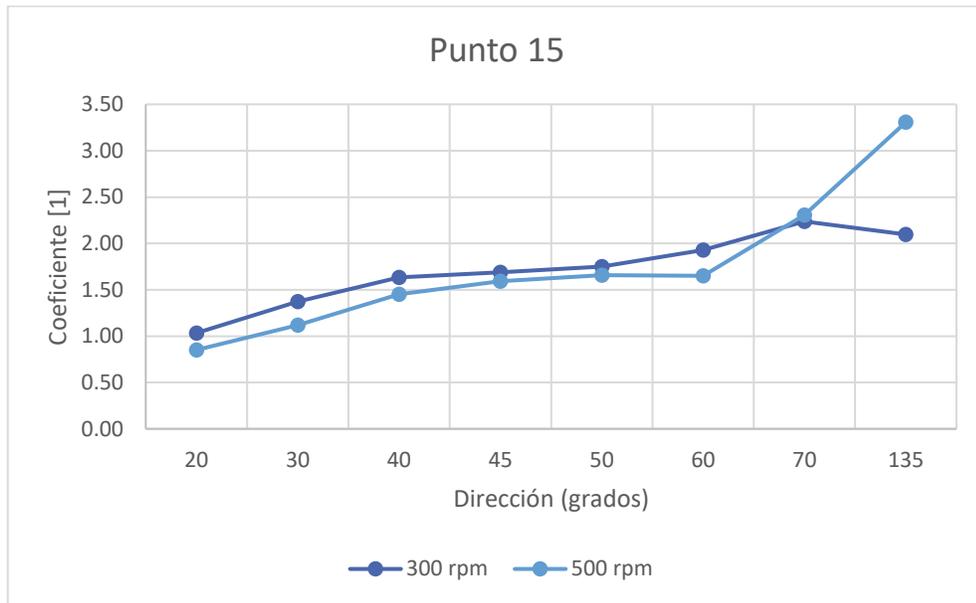
- Punto 13



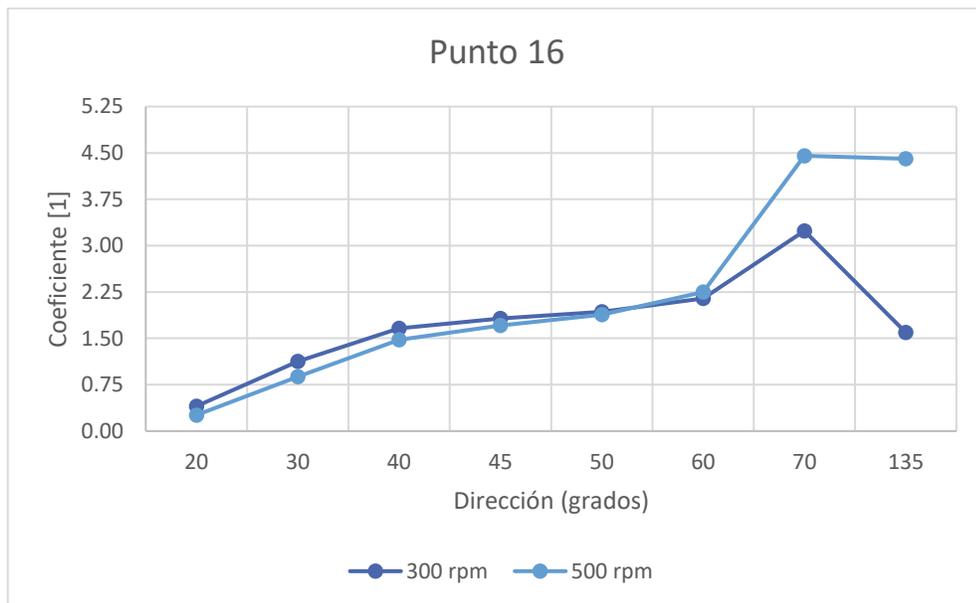
- Punto 14



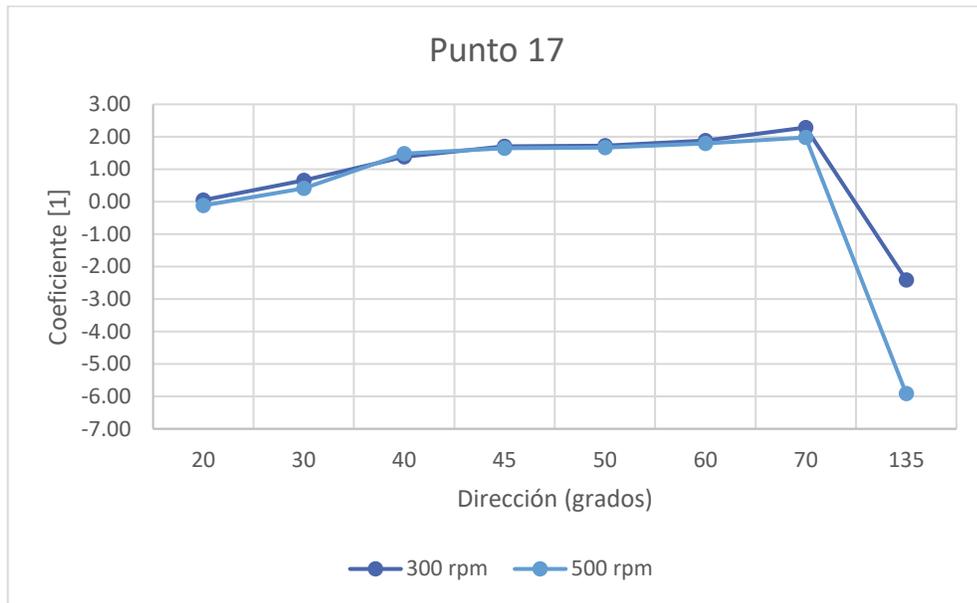
- Punto 15



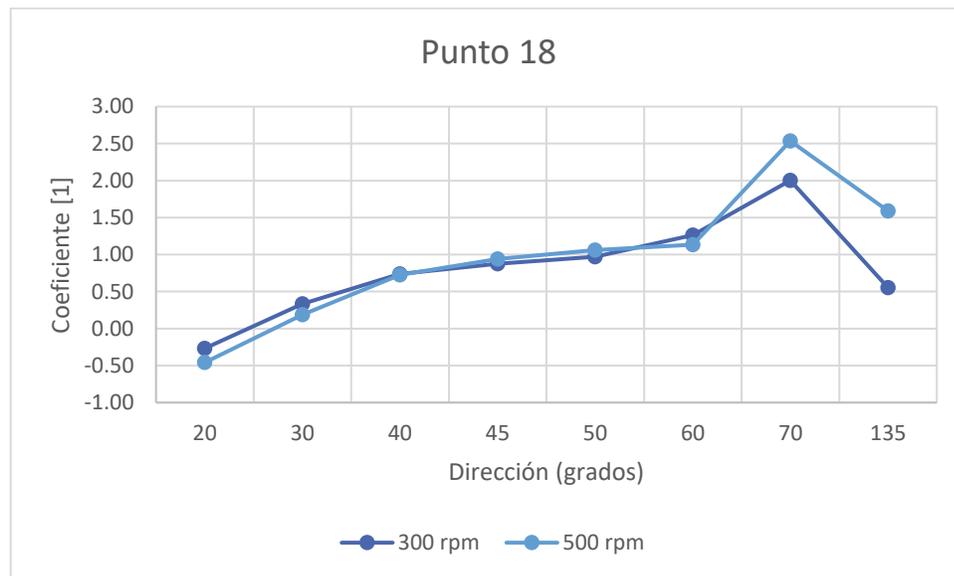
- Punto 16



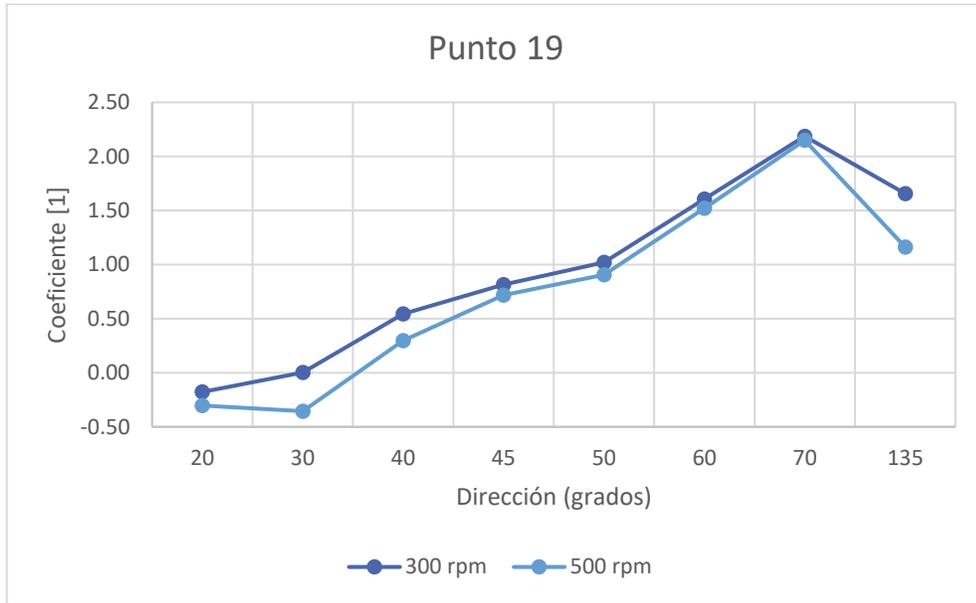
- Punto 17



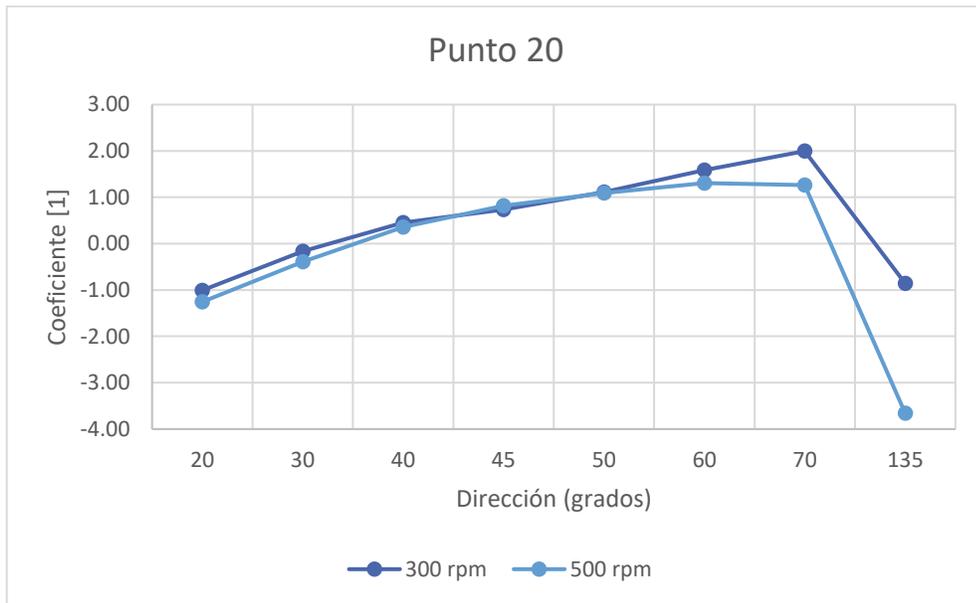
- Punto 18



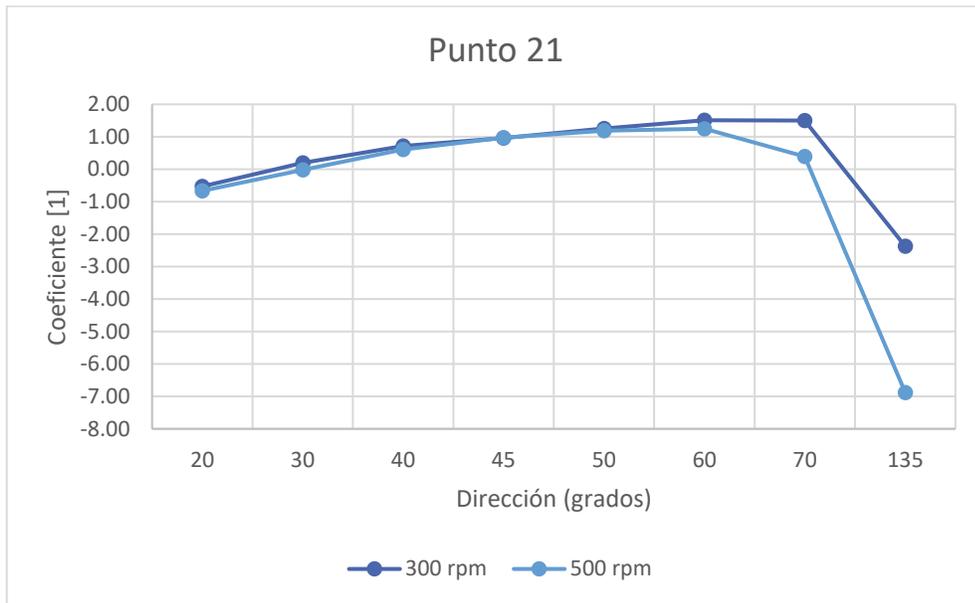
- Punto 19



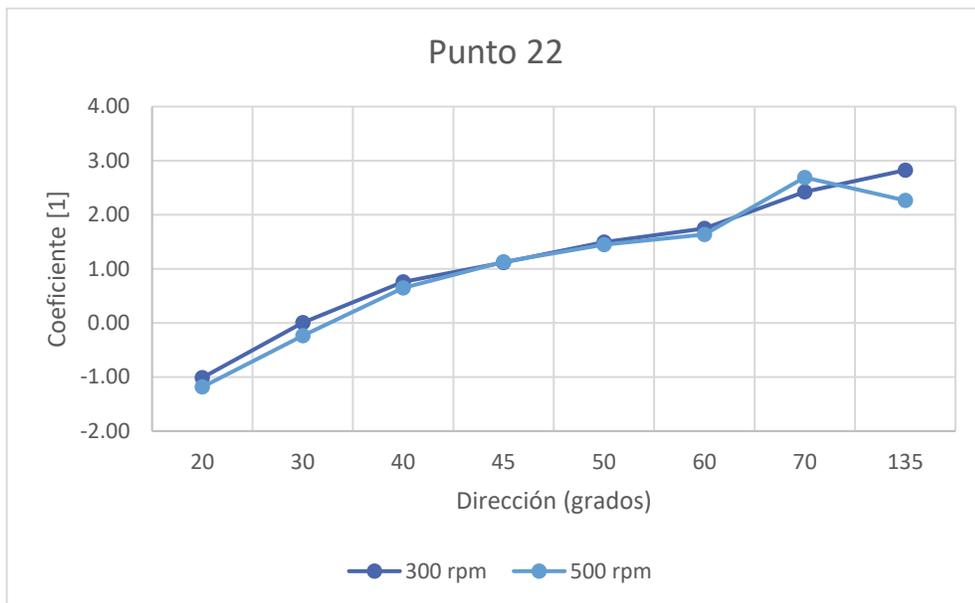
- Punto 20



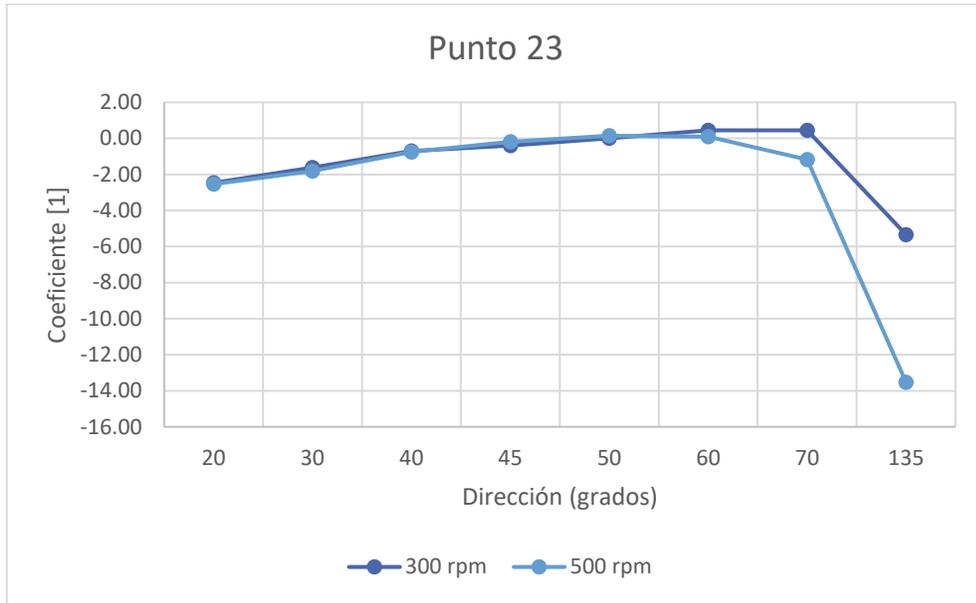
- Punto 21



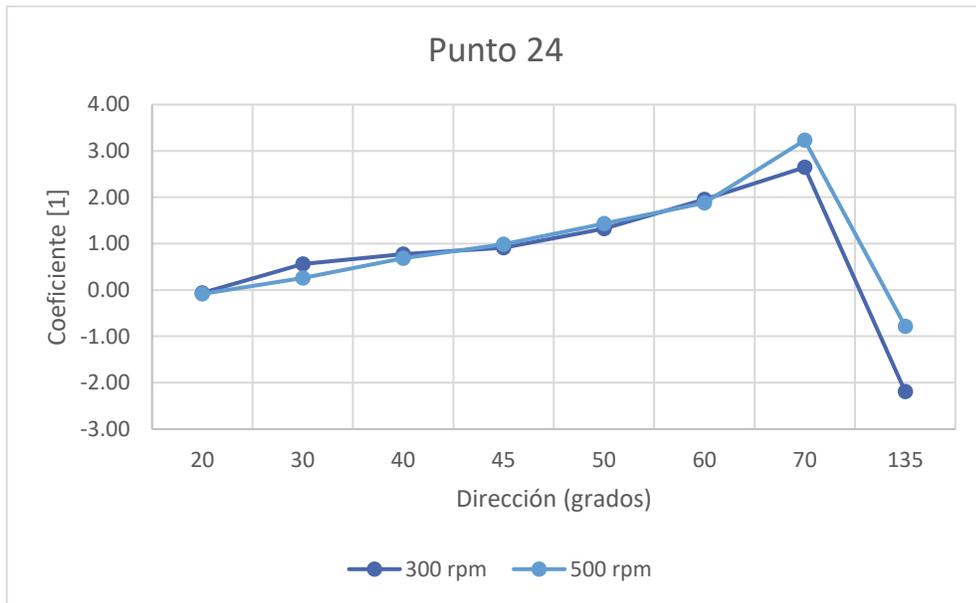
- Punto 22



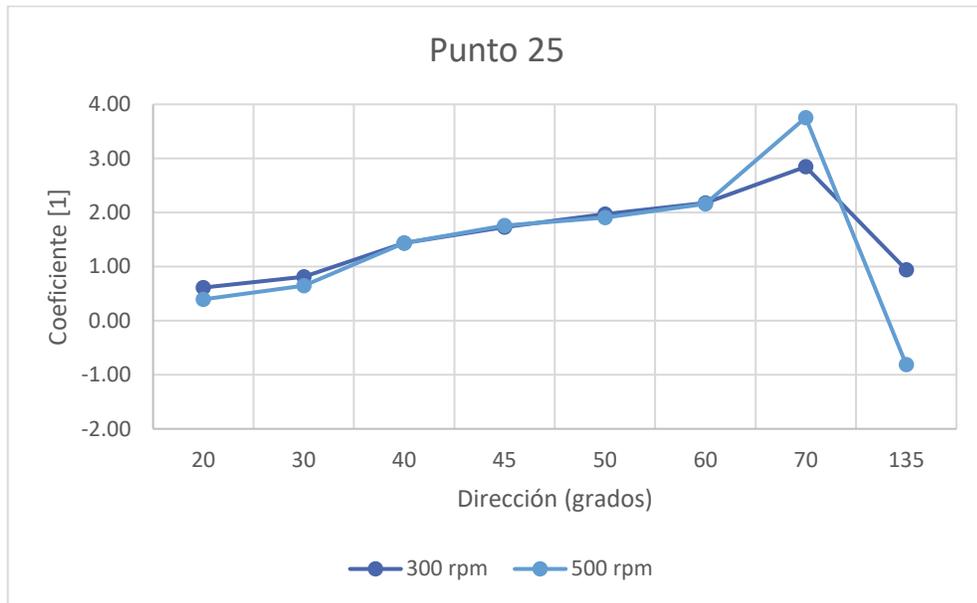
- Punto 23



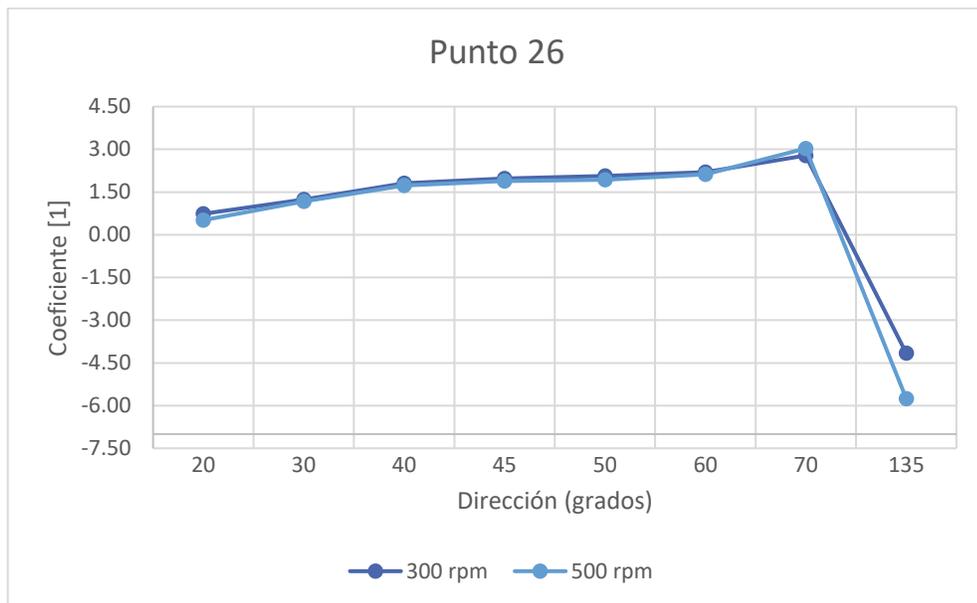
- Punto 24



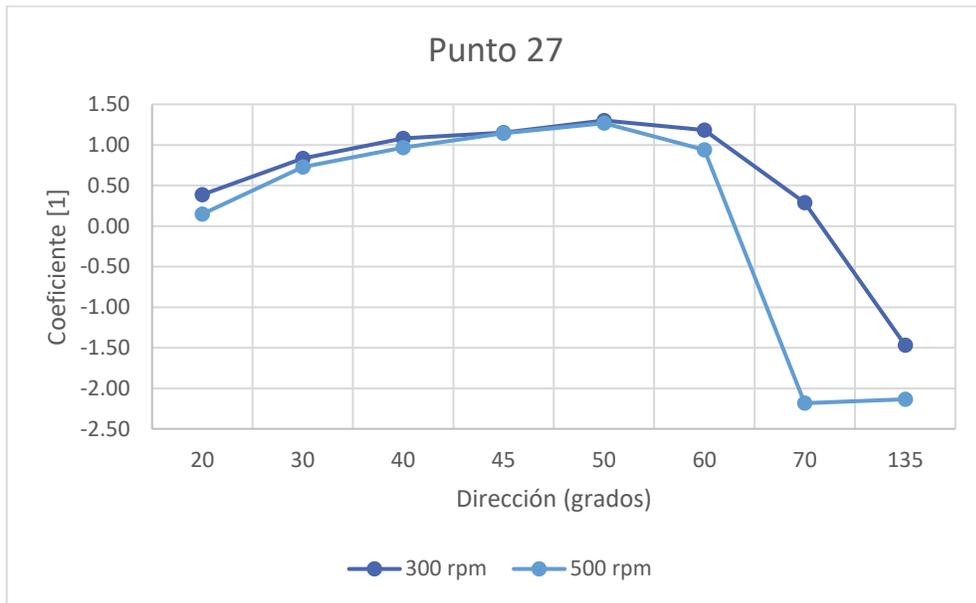
- Punto 25



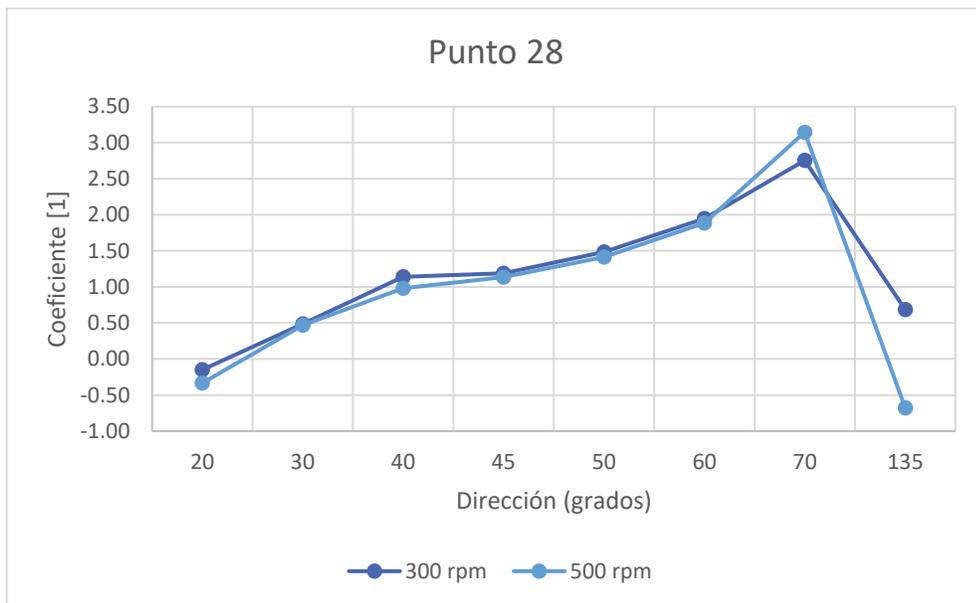
- Punto 26



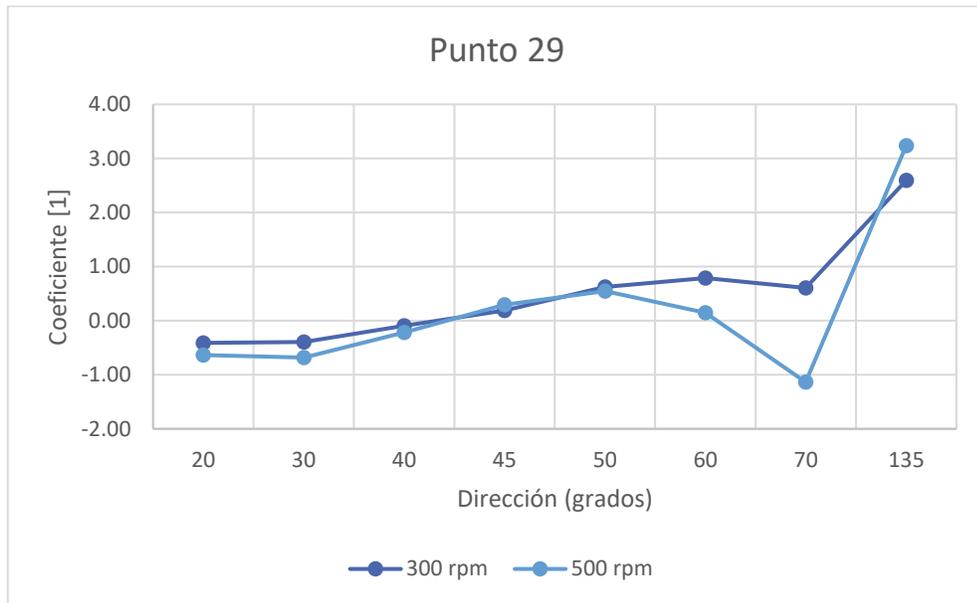
- Punto 27



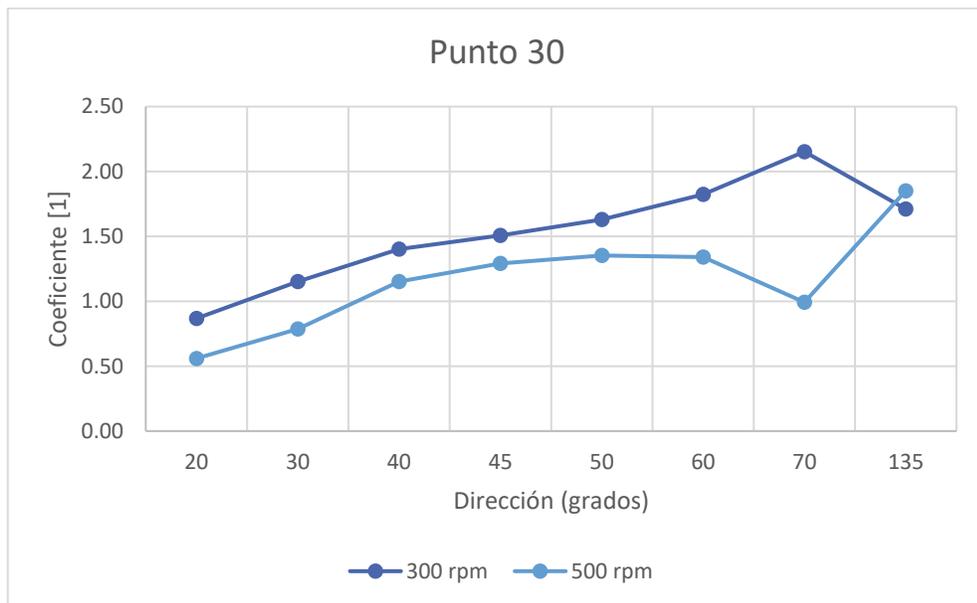
- Punto 28



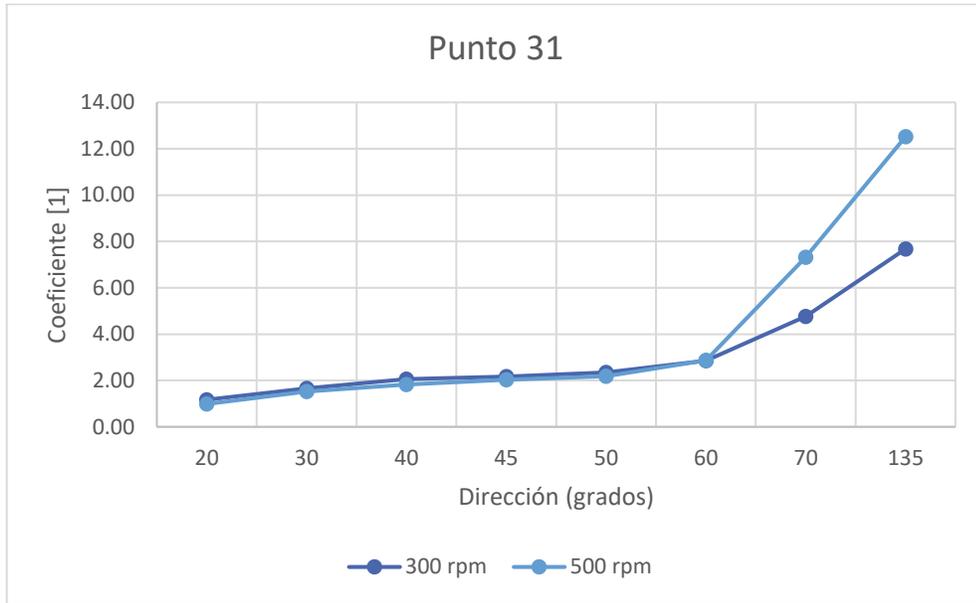
- Punto 29



- Punto 30



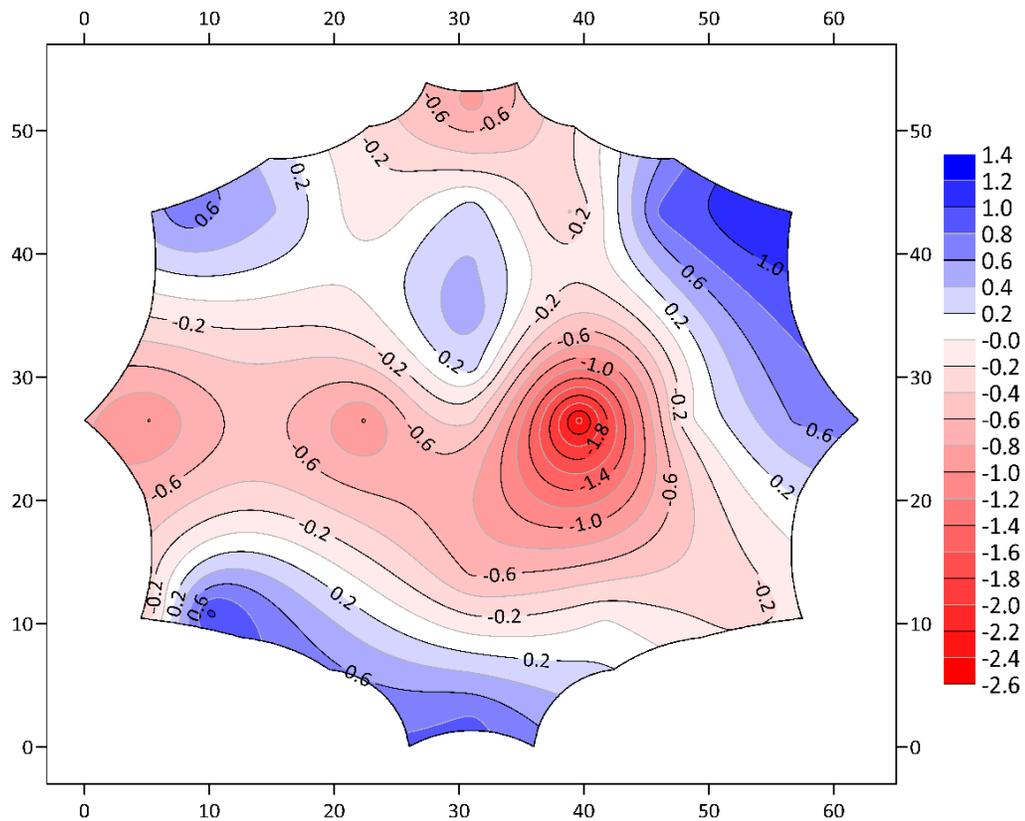
- Punto 31



## ANEXO 2. Esquemas de extrapolación de coeficientes en superficie.

En este anexo se presentan los esquemas de extrapolación para toda la superficie, para cada dirección y velocidad.

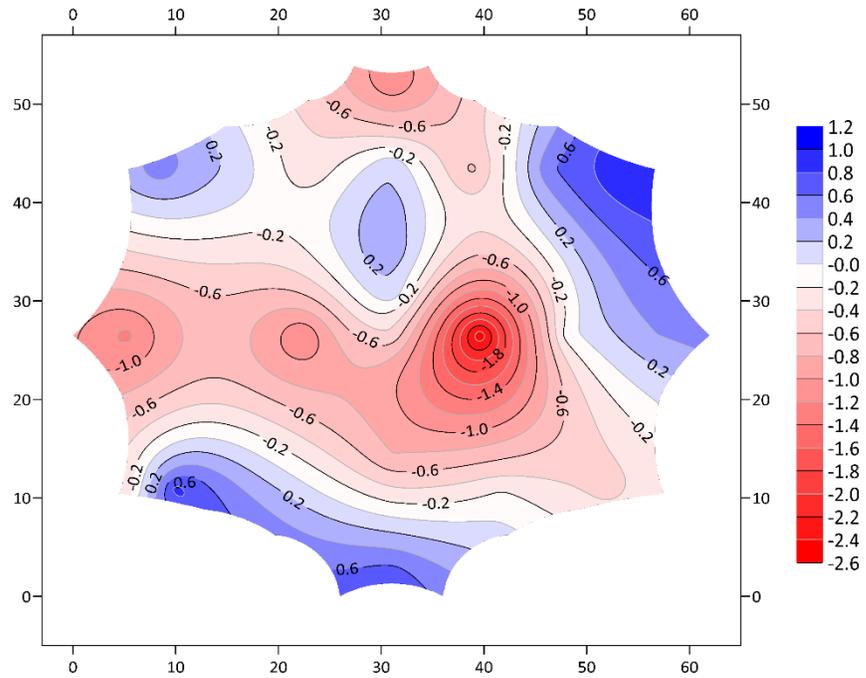
- 20°, 300 rpm



**Valor máximo = 1.17**

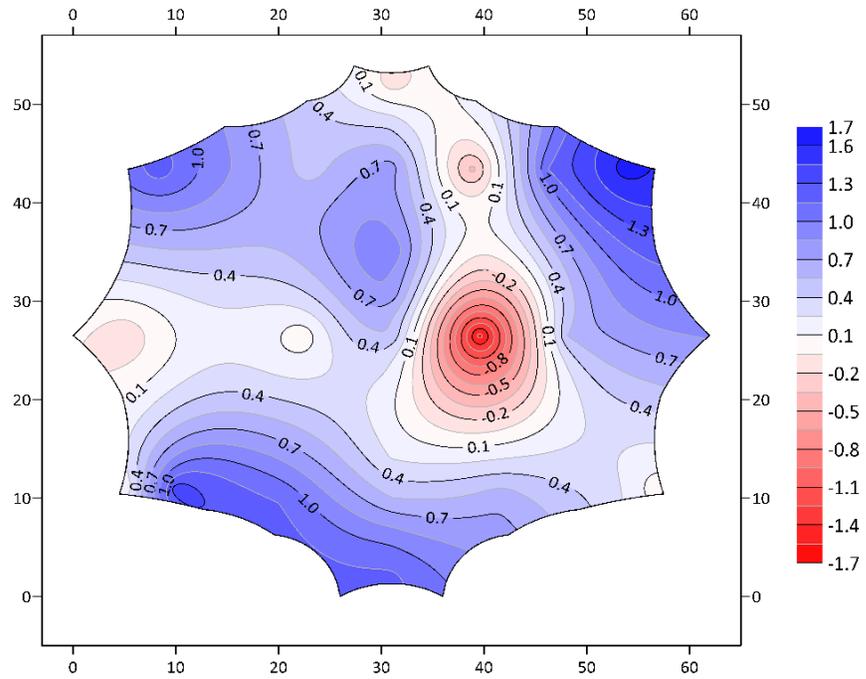
**Valor mínimo = -2.46**

- 20°, 500 rpm



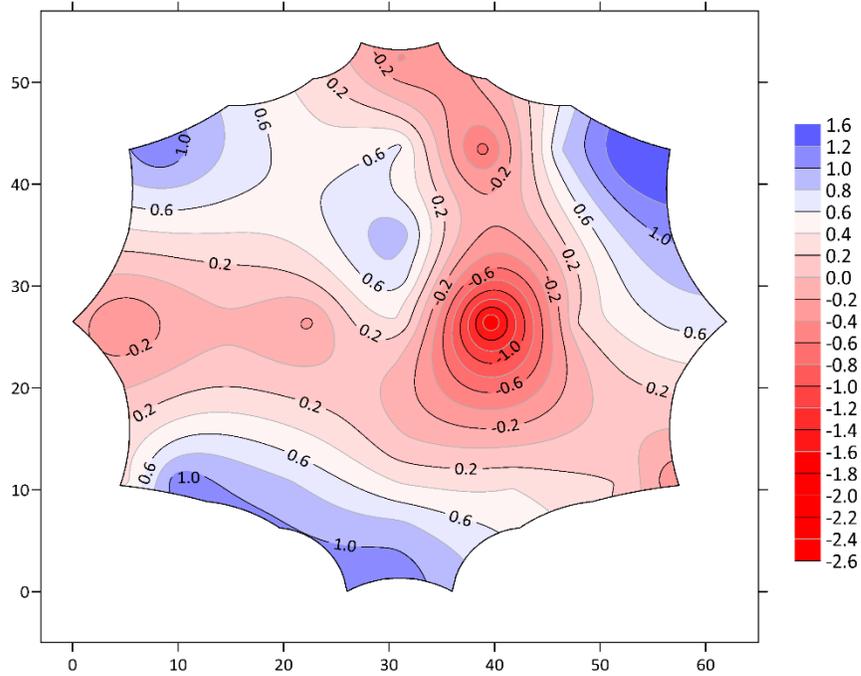
**Valor máximo = 0.98**  
**Valor mínimo = -2.53**

- 30°, 300 rpm



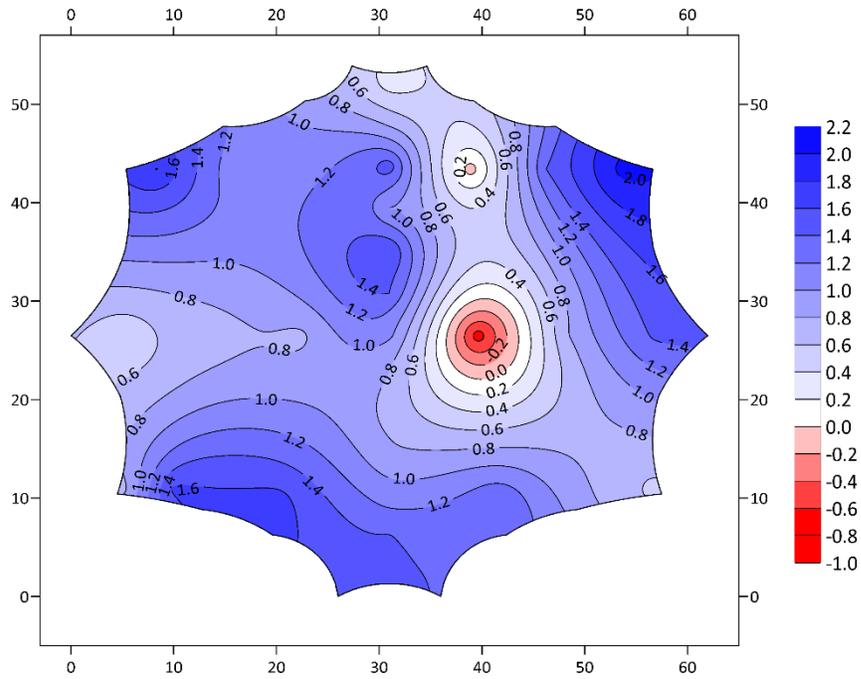
**Valor máximo = 1.65**  
**Valor mínimo = -1.61**

- 30°, 500 rpm



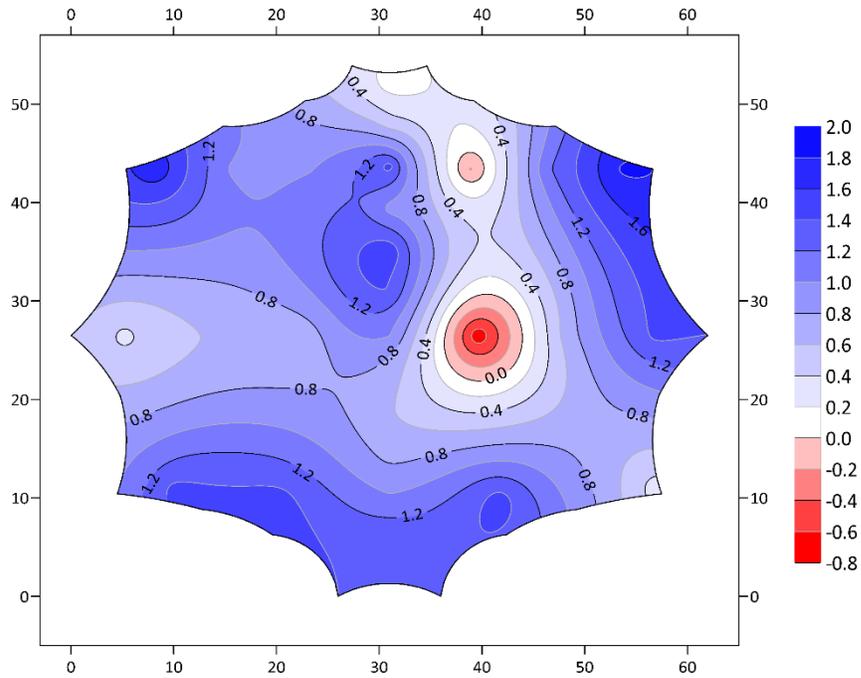
**Valor máximo: 1.52**  
**Valor mínimo: -1.80**

- 40°, 300 rpm



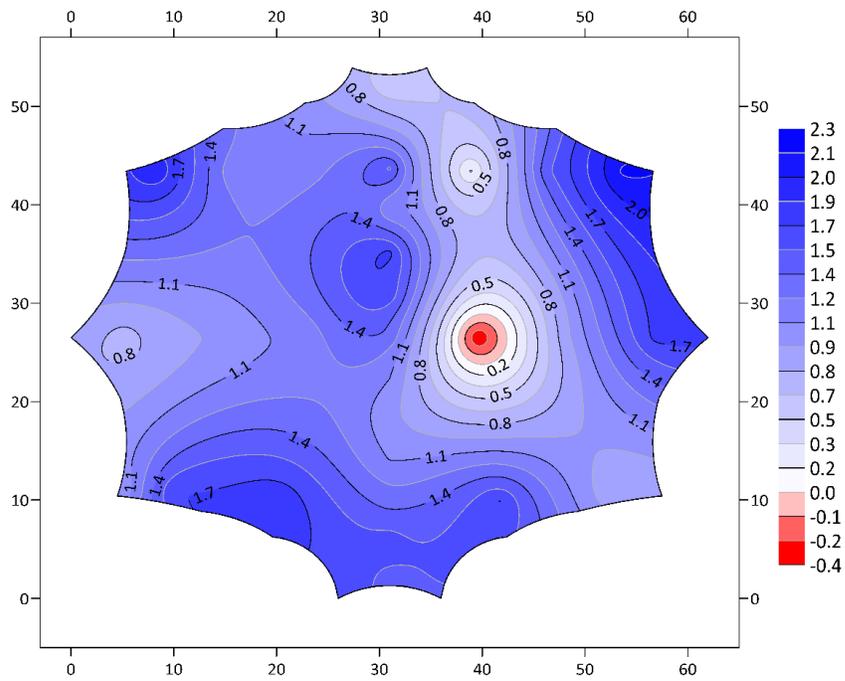
**Valor máximo: 2.06**  
**Valor mínimo: -0.705**

- 40°, 500 rpm



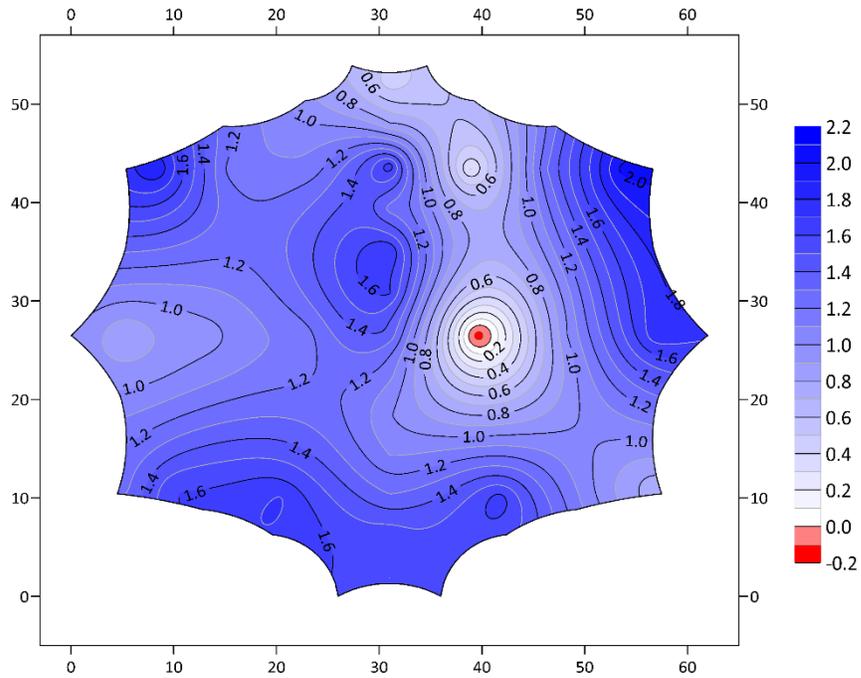
**Valor máximo: 1.83**  
**Valor mínimo: -0.75**

- 45°, 300 rpm



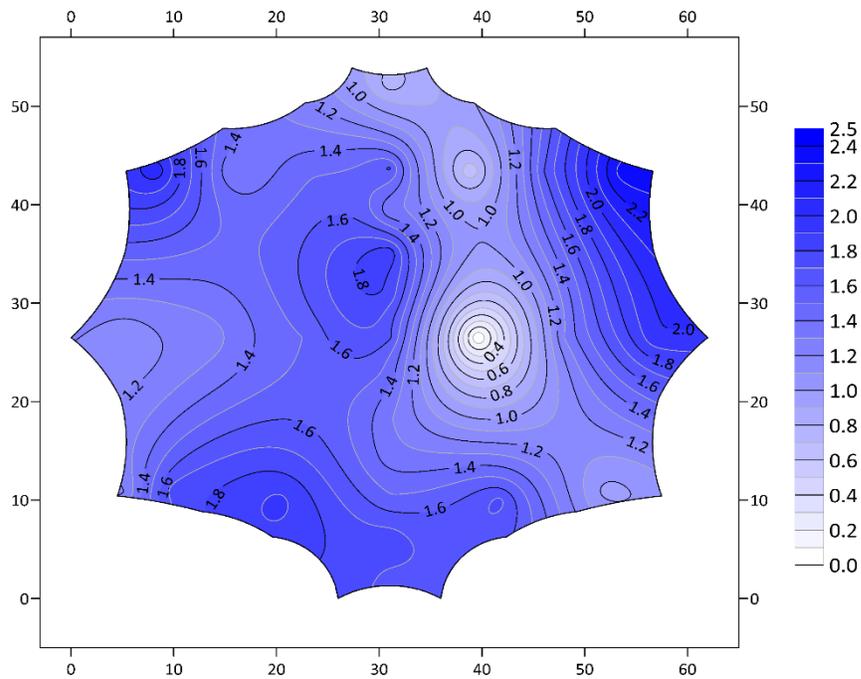
**Valor máximo: 2.17**  
**Valor mínimo: -0.39**

- 45°, 500 rpm



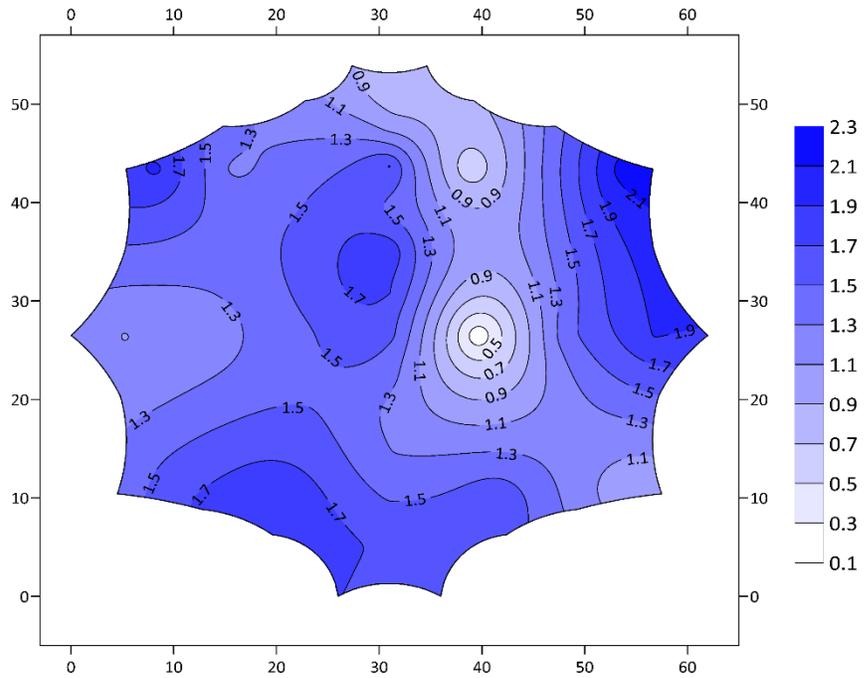
**Valor máximo: 2.03**  
**Valor mínimo: -0.18**

- 50°, 300 rpm



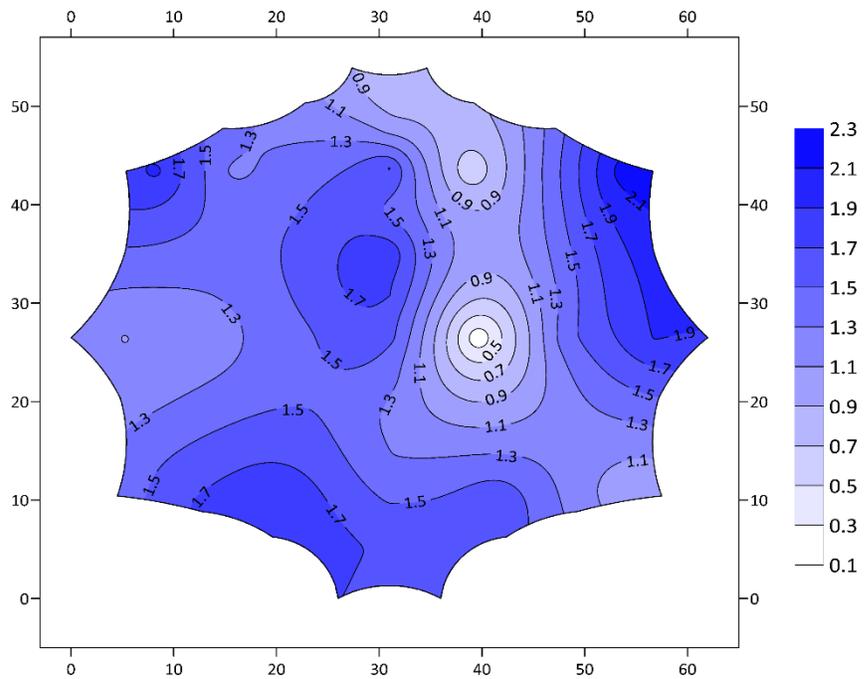
**Valor máximo: 2.35**  
**Valor mínimo: 0.00**

- 50°, 500 rpm



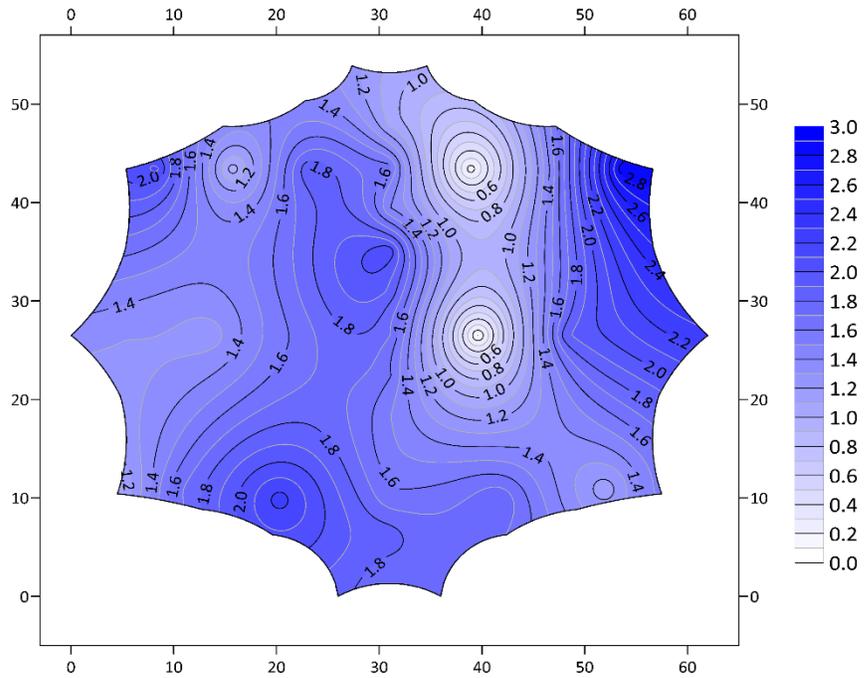
**Valor máximo: 2.18**  
**Valor mínimo: 0.15**

- 60°, 300 rpm



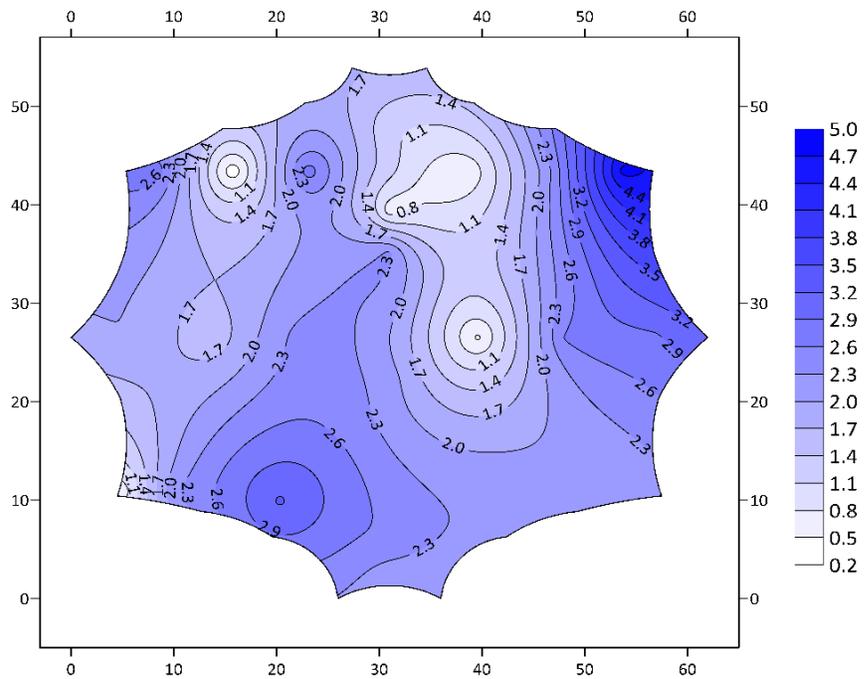
**Valor máximo: 2.18**  
**Valor mínimo: 0.15**

- 60°, 500 rpm



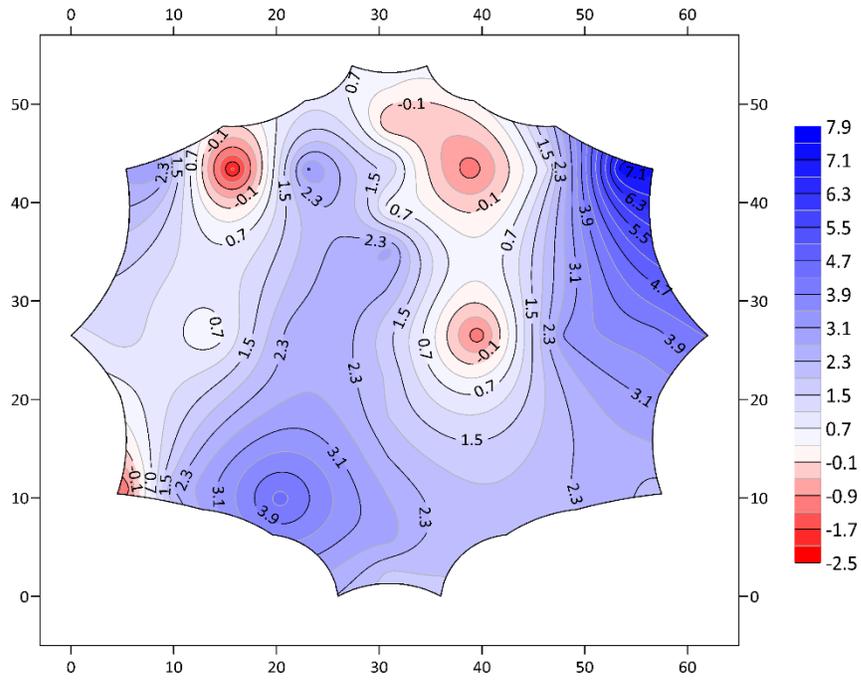
**Valor máximo: 2.86**  
**Valor mínimo: 0.09**

- 70°, 300 rpm



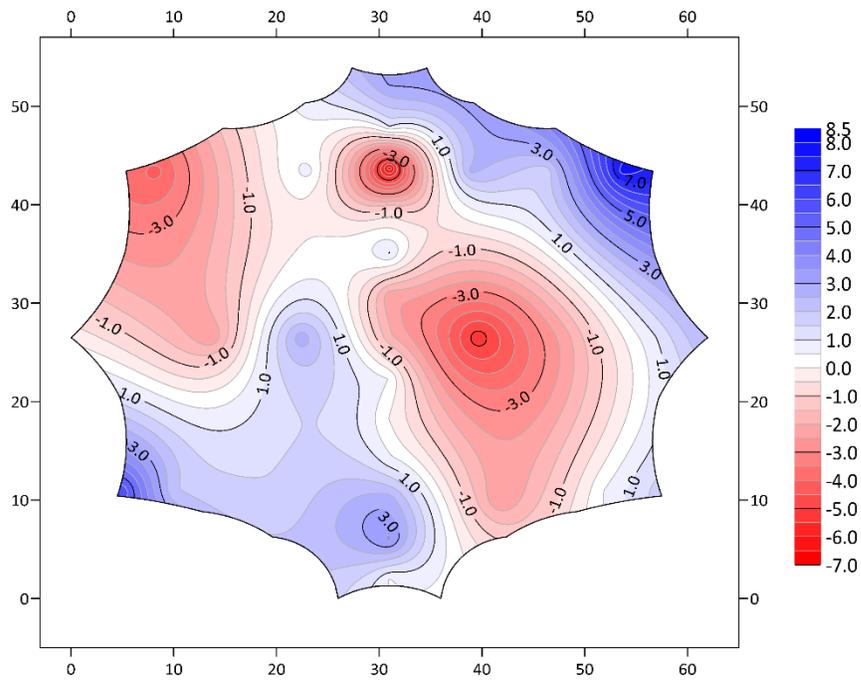
**Valor máximo: 4.76**  
**Valor mínimo: 0.29**

- 70°, 500 rpm



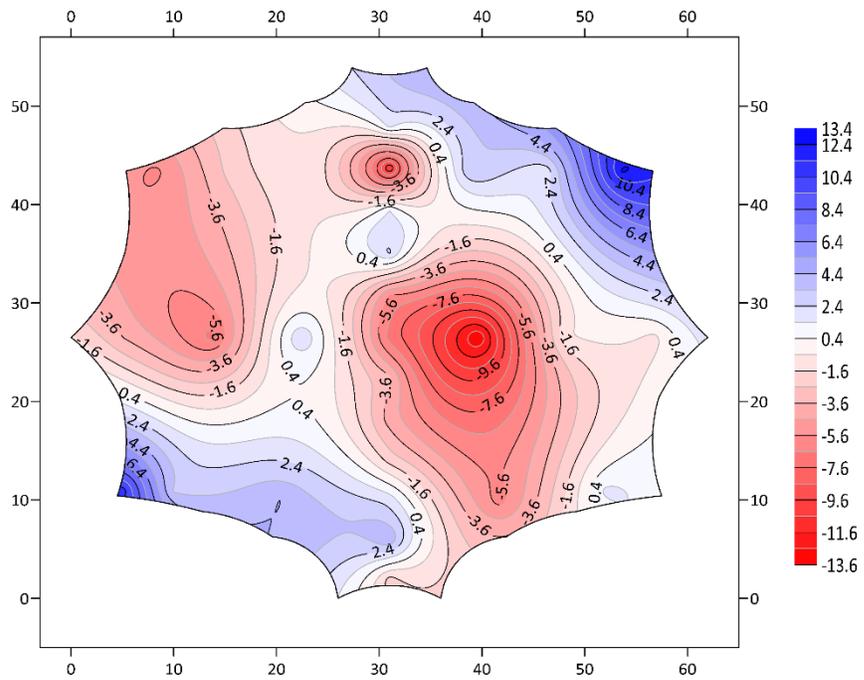
**Valor máximo: 7.31**  
**Valor mínimo: -2.18**

- 135°, 300 rpm



**Valor máximo: 7.67**  
**Valor mínimo: -6.79**

- 135°, 500 rpm



**Valor máximo: 12.52**  
**Valor mínimo: -13.52**

Así mismo, para presentar una mayor claridad de las variaciones, se presenta una tabla en donde se compilan los esquemas mostrados anteriormente.

