



CIENCIA Y TECNOLOGIA

POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

**REDUCCIÓN DE CARGAS EN UNA TURBINA EÓLICA
EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN RADIAL Y EL ÍNDICE
DE SOLIDEZ A TRAVÉS DE MICROTABS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

**MAESTRA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA
EN LA ESPECIALIDAD DE:**

DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS MECÁNICOS

PRESENTA

ING. CRISTEL GONZÁLEZ AMÉZQUITA

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, OCTUBRE DE 2017

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios por brindarme la oportunidad de realizar mi maestría, por poner a las personas adecuadas y los medios oportunos para que esta etapa empezara y culminara.

Agradezco con un amor infinito a mis padres Gerardo González y Mercedes Amézquita quienes fueron mi principal pilar y motivo para terminar, por no dejar de creer en mí en ningún momento, gracias por su amor y apoyo incondicional que me han brindado para que este proyecto llegara a su fin. Asimismo agradezco a mis hermanos Gerardo González y Luis Eduardo González, a mis sobrinos Jhostin González y Jeiden González, a mi cuñada Abigail Hernández por creer siempre en mí y motivarme a cada instante, por formar parte de este logro que también es de ustedes. ¡Gracias infinitas familia!

A mi asesor el Dr. José Alfredo Manzo Preciado por creer en mí sin conocerme, por darme la oportunidad de realizar este proyecto bajo su tutoría y por los conocimientos compartidos durante este tiempo. Por la confianza depositada en mí, la paciencia y la motivación continua para culminar lo que juntos empezamos.

A CONACYT y al CEMIE-Eólico por otorgarme el apoyo necesario para realizar mi maestría.

Al Dr. Guillermo Muñoz Hernández por su colaboración especial y fundamental para el desarrollo de este proyecto.

Al Ing. Saúl Ledesma Ledesma por su contribución en el proyecto y sus consejos para hacer posible este trabajo.

A mis amigos de la maestría gracias por el conocimiento y apoyo que cada uno de ustedes compartió y aportó, por las enseñanzas no solo en el ámbito académico sino también en lo personal.

Por último y no menos importante agradezco la participación del Dr. Vicente Bringas Rico y el Dr. Isaac Hernández Arriaga quienes aportaron sus valiosos comentarios en cada una de las evaluaciones con el afán de mejorar este trabajo.

Dedicatoria

Con mucho amor dedico este logro a dos personas muy especiales para mí, mi padre Gerardo y madre Mercedes.

Mi padre quien con su ejemplo, su responsabilidad y amor ha forjado mi carácter para ser quien soy, no dejándome caer sino siendo mi pilar en cada paso que doy.

Mi madre que con su amor incondicional me ha apoyado en cada momento difícil que he vivido y de quien reconozco su dedicación como madre.

A los dos ¡Gracias! por ser mis padres, este logro es de ustedes. ¡Los amo!

RESUMEN

En los últimos años la tecnología ha avanzado exponencialmente de manera tal que ha facilitado y mejorado la vida del ser humano. En este caso hablando específicamente de la energía, se han observado muchos avances de los cuales se ven reflejados en el empoderamiento de las energías renovables dentro del mercado, haciendo énfasis en la energía eólica, se puede observar el crecimiento y desarrollo que ésta ha mostrado en los últimos años.

El hablar de la energía eólica es hablar de aerogeneradores, palas, potencias, fuerzas, cargas que afectan al aerogenerador, cómo preservar la vida útil de una turbina eólica, entre otros temas más.

Existen diversos factores que pueden llegar a afectar una turbina eólica y generar una pérdida total de la misma, los factores más importantes que afectan el buen funcionamiento de un aerogenerador son las cargas a las que está expuesta la turbina eólica en su funcionamiento. Para ello, el presente trabajo está enfocado en el estudio de la reducción de cargas en una turbina eólica en función de la posición radial y el índice de solidez a través de Microtabs.

La presente tesis consta de cinco capítulos; en el capítulo uno se presenta una introducción al tema de estudio, los antecedentes y el estado del arte referente al control de las cargas y la tecnología de Microtabs, también se incluye el planteamiento del problema, los objetivos y la hipótesis.

En el capítulo 2 se presenta el marco teórico el cual consiste en la investigación de los temas principales que soportan el trabajo, proporcionando las bases teóricas desde los principios básicos de aerodinámica hasta el diseño de experimentos para el análisis del trabajo, entre otros temas fundamentales.

En el capítulo 3 se muestra la metodología es decir de qué manera se calculó la Fuerza Axial (principal carga que afecta a la turbina eólica) así como la creación del diseño de experimentos.

En el capítulo 4 se presentan los resultados y en el capítulo 5 las conclusiones del trabajo.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.....	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
1.3 OBJETIVOS.....	11
1.3.1 Objetivo general.....	11
1.3.2 Objetivos específicos.....	11
1.4 HIPÓTESIS.....	11
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	13
2.1 PRINCIPIOS AERODINÁMICOS.....	13
2.2 AFECTACIÓN EN LA SUSTENTACIÓN CON EL USO DE MICROPESTAÑAS..	14
2.3 ANÁLISIS CFD PARA EVALUACIÓN DE MICROTABS.....	15
2.4 MÉTODO DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO DEL ELEMENTO ASPA.....	16
2.5 TORQUE.....	20
2.6 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	26
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	33
3.1 FUERZA AXIAL A TRAVÉS DEL MÉTODO DEL ELEMENTO DE PALA (BEM).	33
3.2 CREACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	47
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	48
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	CL y CD a un ángulo de ataque de 7° [17].....	15
Tabla 2.2	Pautas generales para diseñar un experimento [20].....	26
Tabla 2.3	Selección de factores.....	27
Tabla 2.4	Bibliografía consultada.....	28
Tabla 2.5	Diseño de superficie de respuesta centrado en la cara codificado.....	29
Tabla 4.1	Resultados de las Fuerzas Axiales con Microtabs obtenida del BEM.....	53
Tabla 4.2	Fuerza Axial sin Microtab.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Capacidad y adiciones anuales mundiales de energía eólica, 2005-2015.....	1
Figura 1.2	Técnicas de control de carga de aerogeneradores.....	4
Figura 1.3	Mejoras que se obtienen al usar VariLoad™ como sistema de control de carga activa.....	8
Figura 2.1	Presión vs Velocidad.....	13
Figura 2.2	Pala segmentada en 20 elementos.....	15
Figura 2.3	Volumen de control mostrado como elemento anular para ser utilizado en el modelo BEM.....	16
Figura 2.4	Tubo de corriente alrededor de una turbina eólica.....	17
Figura 2.5	Comportamiento de la velocidad y presión axial antes y después del rotor...	18
Figura 2.6	Tubo giratorio de flujo anular.....	20
Figura 2.7	Modelo del elemento de pala.....	22
Figura 2.8	Velocidades en el plano del rotor.....	23
Figura 2.9	Cargas locales de una pala.....	24
Figura 2.10	Diseño de Superficie de respuesta Centrado en la Cara.....	28
Figura 2.11	Pala segmentada con micropestañas al 72% de índice de solidez.....	30
Figura 2.12	Pala segmentada con micropestañas al 81% de índice de solidez.....	30
Figura 2.13	Pala segmentada con micropestañas al 100% de índice de solidez.....	31
Figura 2.14	Pala segmentada al 35% de posición radial.....	31
Figura 2.15	Pala segmentada al 44% de posición radial.....	32
Figura 2.16	Pala segmentada al 55% de posición radial.....	32
Figura 3.1	Datos iniciales para una pala de 9 metros en el método BEM.....	33
Figura 3.2	División de pala en 20 elementos.....	34
Figura 3.3	División de pala en 25 elementos.....	35
Figura 3.4	División de pala en 31 elementos.....	35
Figura 3.5	Configuración de pala 100% de índice de solidez y 55% de posición radial...	36
Figura 3.6	Configuración de pala 81% de índice de solidez y 55% de posición radial....	37
Figura 3.7	Configuración de pala 72% de índice de solidez y 55% de posición radial....	38
Figura 3.8	Configuración de pala 100% de índice de solidez y 44% de posición radial...	39

Figura 3.9	Configuración de pala 81% de índice de solidez y 44% de posición radial....	40
Figura 3.10	Configuración de pala 72% de índice de solidez y 44% de posición radial....	41
Figura 3.11	Configuración de pala 100% de índice de solidez y 35% de posición radial...	42
Figura 3.12	Configuración de pala 81% de índice de solidez y 35% de posición radial....	43
Figura 3.13	Configuración de pala 72% de índice de solidez y 35% de posición radial....	44
Figura 3.14	Configuración de pala 81% de índice de solidez y 44% de posición radial- segundo punto central.....	45
Figura 3.15	Configuración de pala 81% de índice de solidez y 44% de posición radial- tercer punto central.....	46
Figura 4.1	Efecto de las interacciones de los principales factores para la Fuerza Axial..	50
Figura 4.2	Efectos de principales factores para la Fuerza Axial.....	50
Figura 4.3	Interacciones de los principales factores para la Fuerza Axial.....	51
Figura 4.4	Resultado óptimo para minimizar la Fuerza Axial con Microtabs.....	52

TERMINOLOGÍA

C_L	Coeficiente de sustentación
C_D	Coeficiente de resistencia
c	Cuerda
Ω	Velocidad de rotación del rotor
p_0	Presión en el primer punto de la ecuación de Bernoulli
p	Presión en el segundo punto de la ecuación de Bernoulli
BEM	Blade Element Momentum
DU	Delft University
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
CFD	Computational Fluid Dynamics
MT	Microtab (micropestaña)

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La concientización sobre la importancia de la energía renovable y la eficiencia energética en el mundo es cada vez mayor y más fuerte, no sólo para atender la problemática del medio ambiente, sino también para generar nuevas oportunidades económicas.

De acuerdo a la REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century) la energía renovable proporcionó un estimado de 19,1% del consumo mundial total de energía en el 2013, y continuando con su crecimiento, en el 2014 la energía renovable se extendió significativamente en términos de capacidad instalada y energía producida [1].

En el 2015, la energía eólica añadió un récord de 63 GW a nivel mundial, sumando un total aproximado de 433 GW como se muestra en la Figura 1.1. [2].

ENERGÍA EÓLICA

Capacidad y adiciones anuales mundiales de energía eólica, 2005-2015

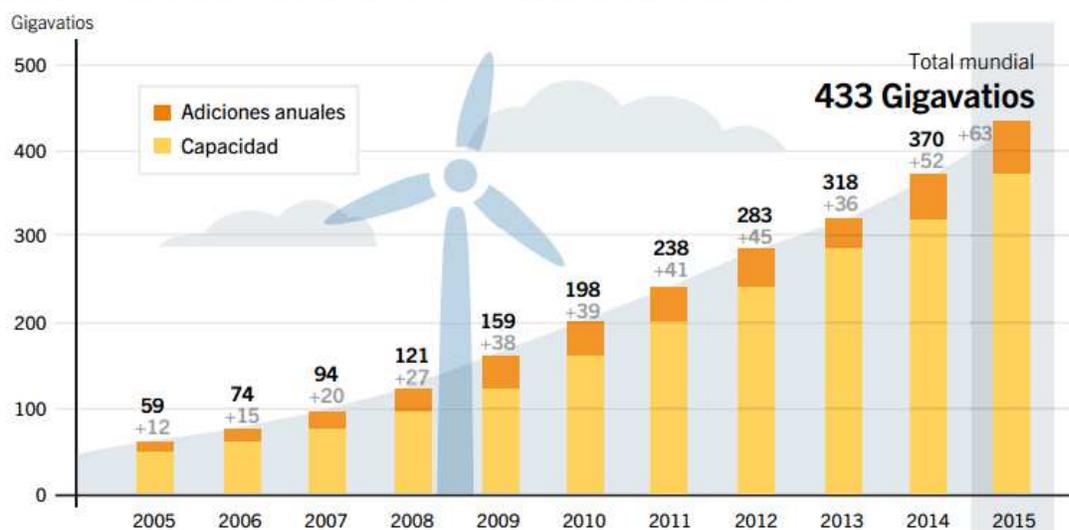


Figura 1.1 Capacidad y adiciones anuales mundiales de energía eólica, 2005-2015 [2]

La energía eólica representa una de las alternativas renovables más viables para generar energía eléctrica. La transición de molinos de viento que suministran energía mecánica a turbinas eólicas generadoras de electricidad comenzó alrededor de 1900 en los Estados Unidos y Dinamarca; a partir de 1973 resurgió la energía Eólica en Europa y en Estados Unidos [3].

En México, hasta el 2014 se tenían 2,551 Mega Watts operando, y se tiene una proyección de 15,000 Mega Watts para el periodo 2020-2022. Actualmente, se cuenta con 31 parques eólicos en operación que hacen un total de 1,570 aerogeneradores trabajando [4].

Las regiones con mayor potencial eólico se encuentran en la Península de Baja California, Sinaloa, Zacatecas, Hidalgo, Tamaulipas, Veracruz, Oaxaca y en la Península de Yucatán. El mayor potencial eólico se encuentra en el Estado de Oaxaca, en la zona del Istmo de Tehuantepec, que es una de las zonas con mejores condiciones eólicas en el mundo [5]; esta zona alberga la mayoría de los parques eólicos del país, el más famoso de ellos siendo el Parque Eólico La Venta, situado en La Ventosa, municipio de Juchitán de Zaragoza [6].

Un parque eólico es un conjunto de aerogeneradores que transforman la energía eólica en energía eléctrica. Un aerogenerador es una máquina formada principalmente por una turbina eólica y un generador eléctrico. La turbina eólica transforma la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional, la cual es transformada en energía eléctrica por el generador. Existen dos tipos de aerogeneradores, según la orientación de su eje de rotación: horizontal y vertical. Por eficiencia y mayor rendimiento, el tipo de aerogenerador más utilizado en la actualidad es el de eje horizontal, en el cuál el eje de rotación se encuentra paralelo a la superficie terrestre [5].

Las máquinas de eje horizontal pueden ser lentas o rápidas, según sea la velocidad típica de la punta de la pala, definida a través de su velocidad específica. Las máquinas rápidas tienen una velocidad específica entre 8 y 10, su velocidad de rotación

es elevada y poseen un número de palas reducido (2, 3 o 4); su par de arranque es menor y necesitan que el viento tenga mayor velocidad para poder iniciar su giro [3].

Sin embargo las palas de un aerogenerador están expuestas a cargas que pueden salir del diseño original y a su vez ser afectadas, uno de los principales problemas que pueden presentar las palas al someterse a grandes cargas es el incremento de la velocidad de giro de las mismas y de la energía que se genera.

Cuando un aerogenerador se encuentra en condiciones fuera de diseño existe un descontrol de las palas y de la energía que se está generando el cual puede ocasionar un choque entre las mismas con ello destruyendo el aerogenerador por completo generando una pérdida total.

En la actualidad existen técnicas de control de carga que ayudan a minimizar esas cargas protegiendo la turbina eólica y aumentando su vida útil, de esta manera esta investigación está enfocada en el estudio de una de esas técnicas en este caso los Microtabs en donde su principal objetivo es controlar las cargas que se presenten fuera del diseño por condiciones externas al mismo y salvaguardar al aerogenerador, encontrando el mejor diseño de pala con Microtabs.

Así con esto se procede a explicar los antecedentes y el estado del arte que se tiene para seguir con el planteamiento del problema.

1.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

La velocidad del viento puede variar en algunos casos, por lo que la turbina entra en riesgo si no se cuenta con un sistema de control de carga. El control de la turbina se puede dividir en dos categorías: control pasivo y control activo. Las técnicas pasivas mejoran el rendimiento de la turbina y/o reducen las cargas sin gasto energético externo a diferencia del control activo ya que éste requiere energía externa, algunos ejemplos de las técnicas de control de carga se muestran en la figura 1.2 [7]

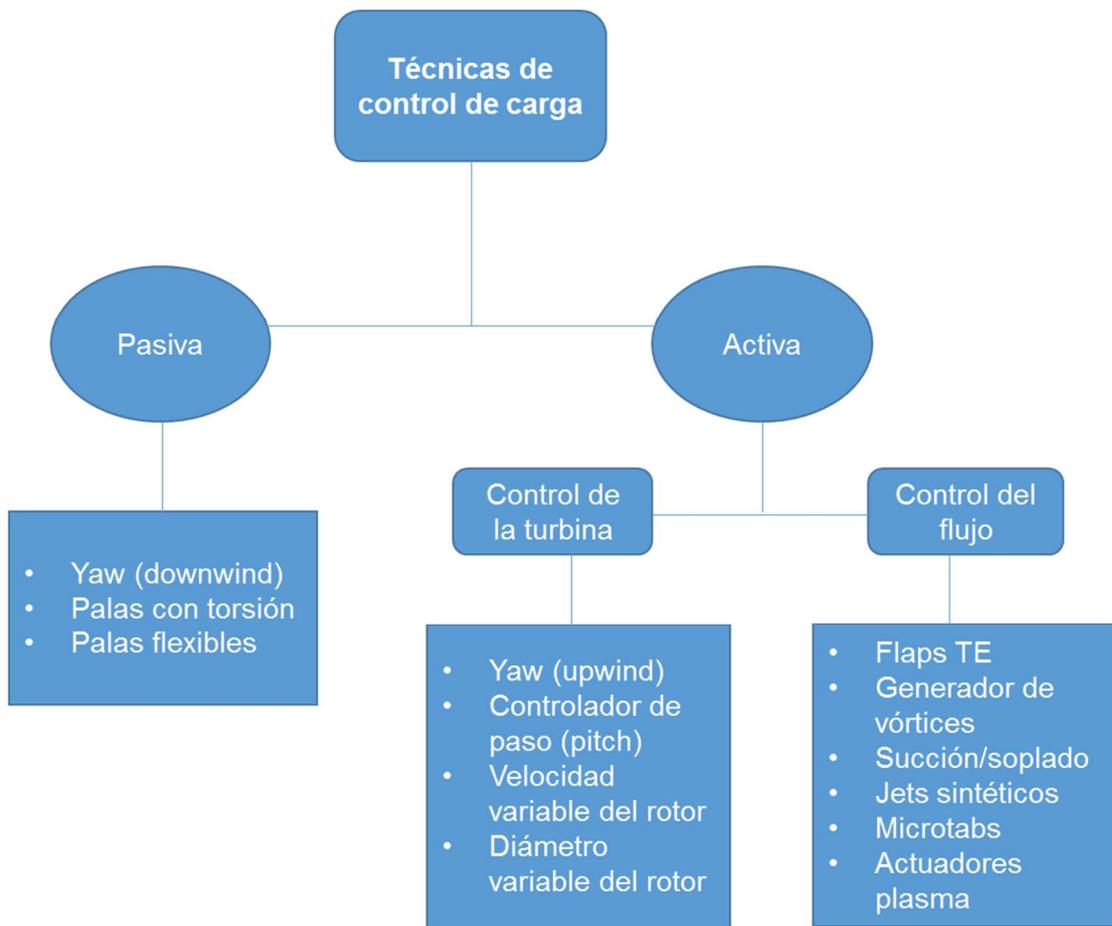


Figura 1.2 Técnicas de control de carga de aerogeneradores [7]

En este proyecto se trabajó con el control de carga activa con control del flujo, específicamente con Microtabs (micropestañas). Cuando se controla el flujo, lo que se busca es mejorar las cargas aerodinámicas, reducir las cargas extremas que se producen mediante la actividad de vientos fuertes y así también mitigar las cargas de fatiga que se producen a lo largo de la pala. Los Microtabs son pequeñas pestañas que se colocan cerca del borde de salida de un perfil aerodinámico y se despliegan, afectando así las características aerodinámicas del perfil aerodinámico. Se caracterizan por su sencillez mecánica, el tamaño pequeño, el tiempo de respuesta rápida y la pequeña cantidad de energía requerida para el despliegue [8].

Se han realizado diferentes estudios acerca del control activo de carga en las palas de un aerogenerador con microtabs. En 2003, van Dam [9] hace una aportación importante basándose en los resultados de cálculos con dos herramientas computacionales, INS2D y OVERFLOW, las cuales resuelven las ecuaciones RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) que rigen el flujo viscoso de fluidos, por medio de un análisis en dos dimensiones en el que determinan que la mejor ubicación para la colocación de las micropestañas es a una distancia de 2% a 6% de la longitud de la cuerda, medida a partir del borde de salida, obteniendo un C_L (coeficiente de sustentación) máximo en torno al 3% de la cuerda. Adicional a ello, van Dam señala que los microtabs con altura de despliegue mayor a 2% de la cuerda, no representan beneficio adicional para el C_L , opuesto al C_D el cual sí mostró un aumento notable.

En el 2008 Johnson et al. en el reporte de Sandia [7], muestran las técnicas de control de carga activa para aerogeneradores donde hacen mención de la importancia de los microtabs. En este reporte comentan que tanto estudios computacionales como experimentales de micropestañas en la superficie inferior en el perfil GU25-5(11)-8 se realizaron en 2D y 3D donde los resultados indicaron que una pestaña de 1% c de altura, localizada a $x/c = 95%$ en la superficie inferior proporciona la mejor sustentación, resistencia y restricciones de volumen; aunado a ello se observó un incremento en el C_L del 30%-50% en la región de elevación lineal con pestañas de 1% c. Mayda et al. realizaron investigaciones computacionales más detalladas sobre los efectos 3D de micropestañas modelando pestañas de anchura finita en un ala semi-infinita. Los estudios mostraron que la efectividad de la pestaña reduce a medida que se incrementó el tamaño del intervalo. La cantidad de intervalo puede ser identificado como una relación de solidez, SR , definida anteriormente como:

$$SR: \frac{\text{Distancia cubierto por pestañas}}{\text{Distancia total del modelo}}$$

En donde muestran la importancia del radio de solidez al ver que los estudios computacionales indican que para obtener una efectividad adecuada se debe contar con un radio de solidez del 85% o mayor a éste. Un radio de solidez menor al 75% permite que el flujo se reacomode en el borde de salida lo que reduce drásticamente el rendimiento de la pestaña.

Por su lado, en 2011 Cooperman et al. [10] ejecutaron un estudio que proporciona datos experimentales y computacionales que ponen de manifiesto las ventajas de la implementación de micropestañas para el control de carga activa de las palas de un aerogenerador. Ellos utilizaron un perfil aerodinámico S819 con micropestañas, el cual fue probado en un túnel de viento donde simularon ráfagas de viento para obtener datos más precisos; estos resultados fueron comparados con los resultados computacionales generados a través del OVERFLOW2, donde los microtabs fueron colocados a un 95% de la cuerda en el lado de presión y a un 90% de la cuerda en el lado de succión, con una relación de solidez del 93%. En este estudio se observa que al emplear las micropestañas en el área de succión se obtiene un decremento del C_L de 0.20 mientras que aplicado en la parte de presión, se obtiene un aumento del C_L de 0.25.

En 2013 Senosiain [11] realizó un estudio para corroborar el efecto aerodinámico con micropestañas, llevando a cabo mediciones a diferentes ángulos de ataque en un rango de 0° a 20° , en pasos de 2° . Se utilizaron perfiles de la Universidad de Glasgow GU25 (5) 8-11, a los que se les añadieron micropestañas con una relación de solidez del 96%, localizado en la superficie de succión a una distancia de 90% de la cuerda desde el borde de ataque del perfil aerodinámico. Los resultados experimentales muestran un C_L aproximado de 0.5 a un ángulo de ataque de 0° , mientras que los valores calculados computacionalmente muestran un valor de 0 al mismo ángulo de ataque; el autor atribuye esta diferencia a dos posibles causas: la primera es que la superficie de la sección de prueba no es completamente lisa y, la segunda a los efectos de contorno dada la dimensión de la sección de prueba.

Por otro lado, en 2014, Macquart et al. [12] llevaron a cabo una investigación sobre la eficacia de las micropestañas en el alivio de cargas, con la finalidad de aumentar la vida útil de las palas de las turbinas de viento, a través de un modelado dinámico de micropestañas. En esta investigación, se seleccionó una turbina de viento con dos palas que abarcan un diámetro de 27.5 m y una potencia nominal de 300 KW, cada pala está equipada con 9 secciones de micropestañas distribuidas sobre 2.83 m de la longitud de la pala de 10 a 12.83 m, lo cual representa una longitud de trabajo del 21% a una posición radial del 72% al 93%, las micropestañas tienen una altura máxima de despliegue del 1.1% de la longitud de la cuerda, y están situados a un 85% de la cuerda desde el borde de ataque en el lado de succión, y a un 95% de la cuerda desde el borde de ataque en el

lado de presión, donde el coeficiente de arrastre aumenta más del 90% de su valor de estado estable con el despliegue de la micropestaña.

En 2015 Macquart y Maheri [13] señalaron que, experimentos y simulaciones para los perfiles S809 y DU-96-W-180 han demostrado que la altura de una micropestaña mayor a 2% de la longitud de la cuerda da como resultado un aumento significativo en el arrastre. Además, hace referencia a los trabajos de investigación computacional que muestran que las micropestañas de altura igual a 1%, localizadas a un 95% de la cuerda en el lado de presión, a menudo ofrecen buenos coeficientes de sustentación y de arrastre.

Por otro lado también se tiene conocimiento que la industria está trabajando con esta tecnología, la empresa Frontier Wind es el líder mundial en tecnologías de gestión de cargas activas para aerogeneradores de escala industrial. Tiene más de 30 años en la explotación de parques eólicos, cuenta con experiencia en diseño de aerogeneradores y aeroespaciales, trabaja con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), así como el análisis de carga y control [14].

Las turbinas equipadas con los sistemas de gestión de carga activa VariLoad™ de Frontier Wind pueden reaccionar y gestionar rápidamente a las condiciones de viento dinámicas y ampliamente fluctuantes. Este sistema único puede aumentar los factores de capacidad, reducir los costos de reparación y mantenimiento y hacer que la energía eólica sea más económica y rentable.

El sistema Frontier Wind VariLoad™ es el primer sistema de gestión de carga activa comercialmente disponible que puede reducir rápidamente las cargas de viento en la pala de turbina, permitiendo:

- Rotores más grandes / curva de potencia superior
- Rendimiento optimizado de la turbina
- Mayor vida de los componentes
- Menores costos de producción

- Mayor rentabilidad económica

Al reducir instantáneamente la carga en la pala, VariLoad™ cambia el perfil de carga de la turbina para que responda como un rotor significativamente menor, trayendo las cargas de vuelta a la zona segura. VariLoad™ es rápido: reacciona y reduce cargas 20 veces más rápido que los sistemas de tono convencionales. Ningún otro esquema de gestión de carga es tan rápido y efectivo como VariLoad™.

Dado que VariLoad™ gestiona rápidamente las condiciones fluctuantes del viento, las cargas de pico y fatiga se reducen significativamente, permitiendo una mayor producción de energía, reduciendo los costos planeados y no planeados de Operación y Mantenimiento [14].

- Aumentar el tamaño del rotor en sólo un 10% = 15% más de energía anualmente.

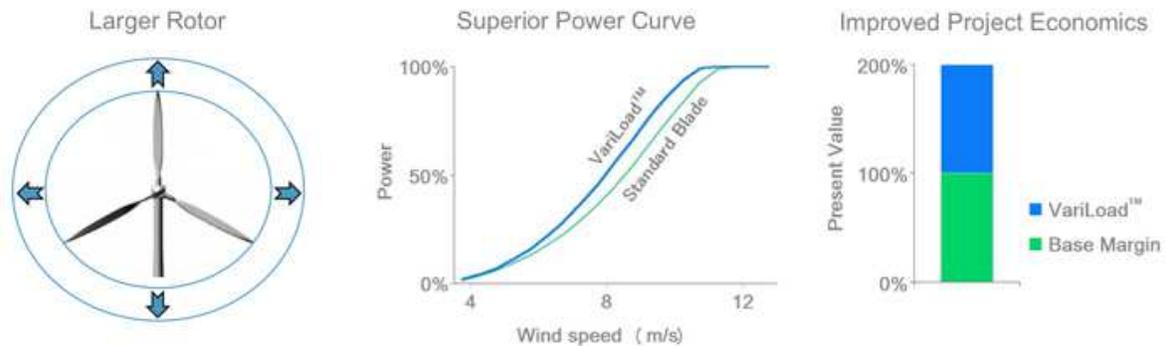


Figura 1.3 Mejoras que se obtienen al usar VariLoad™ como sistema de control de carga activa [14]

Haciendo un análisis de los antecedentes y estado del arte, se concluye que los Microtabs han demostrado ser un control de cargas activo eficiente en cuanto a manejo, utilidad y resultados se refiere. Sin embargo se puede ver que hay factores de suma importancia para su buen funcionamiento, dentro de los cuales se observan la distancia y la ubicación de las mismas; ya sea en la parte de succión o de presión así como la posición radial a la que se encuentren, el tamaño del cual deben estar compuestos, la correlación fundamental que hay entre las micropestañas y la relación de solidez, de la

cual se desprende investigar la mejor configuración de pala que pudiera existir al combinar la relación de solidez y la posición radial para obtener una mayor reducción de cargas posible.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas de control son parte esencial de un aerogenerador, ya que estos se hacen cargo del funcionamiento seguro y eficiente del equipo, así como de salvaguardar su integridad física. El exceso de cargas se produce por el flujo ascendente del viento, la inclinación del eje, las ráfagas del viento, la turbulencia en el flujo del viento, entre otros. Al usar control de cargas se logra establecer límites superiores y limitar el par y la potencia experimentados por el tren de transmisión, minimizar la fatiga del tren de transmisión del rotor y otros componentes estructurales debido a cambios en la dirección del viento, velocidad o turbulencias así como ciclos de arranque o de paro del aerogenerador, asimismo el sistema debe ser capaz de detectar cambios en las condiciones de flujo y responder rápidamente para contrarrestar cualquier impacto negativo en la pala [7].

Al utilizar microtabs como un sistema de control de carga activa en las palas, se obtiene como resultado la mitigación de las cargas mecánicas de los componentes, la reducción de costos de reparación y mantenimiento, conservando de forma eficiente a los aerogeneradores e incrementando su vida útil con ello lograr que la energía eólica sea más económica y rentable.

Teniendo esta tecnología se puede gestionar rápidamente las condiciones fluctuantes del viento, las cargas de pico y fatiga se reducen significativamente permitiendo con ello mayor producción de energía, reduciendo costos planeados y no planeados tanto de producción como de mantenimiento. Cuando se tienen rotores muy grandes y no se cuenta con un sistema de control de carga activo, suelen dañarse y muchas veces se opta por tener un rotor pequeño que no dé como resultado mucha energía, sin embargo con este sistema el simple hecho de aumentar en un 10% el tamaño del rotor da como resultado un 15% más de energía anualmente, lo que conlleva una curva de potencia superior y una mejor rentabilidad de la energía eólica [14].

Es importante destacar que para lograr mitigar las cargas mecánicas, y así obtener dichos beneficios, se tienen que estudiar a fondo dos factores importantes que son: la posición radial de los microtabs en las palas del aerogenerador y la relación de solidez de los microtabs.

Cabe señalar que la ubicación de la micropestaña juega un papel importante dentro del estudio, ya que ésta define si se gana sustentación o se pierde sustentación. Según Johnson et al. [7] la mejora de sustentación se obtiene al colocar la micropestaña en la superficie de presión (inferior) y la mitigación de la sustentación se logra colocando la micropestaña en la superficie de succión (superior). Como el objetivo de este trabajo es mitigar las cargas lo máximo posible, la ubicación será en la superficie de succión.

El índice de solidez es importante ya que estudios mostrados en el apartado de antecedentes indican que la efectividad de la micropestaña reduce mientras incrementa el intervalo de las mismas pero aumenta la efectividad cuando reduce el intervalo. Es decir entre más pequeño es el espacio de separación, se encuentra una mayor efectividad en el trabajo de las micropestañas.

Por lo tanto, el problema de investigación queda definido de la siguiente manera: La determinación de una configuración de pala que consiga disminuir las cargas así como la fuerza de sustentación y cumpla con las siguientes características:

- Se encuentre en función de la posición radial y el índice de solidez a 3 porcentajes: 35%, 44% y 55% para la posición radial y 72%, 81% y 100% para el índice de solidez.
- La configuración esté diseñada para ser ubicada en el área de succión.
- El diseño sea para una pala de 9 metros.
- Disminuya las cargas que se propicien cuando las condiciones de velocidad del viento y de velocidad de rotación de la pala sean mayores a las condiciones de diseño.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Encontrar la mejor configuración de pala en función de la posición radial y el índice de solidez con micropestañas rectangulares en la cara de succión de las palas de 9 metros de un aerogenerador, para disminuir la fuerza de sustentación en un 30%.

1.3.2 Objetivos específicos

- Deducir ecuaciones del Método de Elemento de Pala (*BEM*).
- Seleccionar los factores y la respuesta del diseño de experimento que conlleve a la determinación de la configuración de la pala.
- Elegir el diseño de experimentos que se utilizará en el estudio.
- Realizar corridas con el Método del Elemento de Pala (*BEM*) con diferentes configuraciones con micropestañas.
- Llevar a cabo corridas del diseño de experimentos de la fuerza axial de la pala con micropestañas.
- Determinar la mejor configuración de pala con micropestañas.

1.4 HIPÓTESIS

Es posible mediante un análisis con el Método del Elemento de Pala (*BEM*), encontrar la configuración de pala en función de la posición radial a un 35%, 44% y 55% de la pala y el índice de solidez con microtabs a 72%, 81% y 100% en las cercanías del borde de salida de la cara de succión de un perfil aerodinámico, que permitirá modificar las cargas aerodinámicas en un 30% de modo que pueda tenerse un mejor control del funcionamiento de un aerogenerador.

1.5 JUSTIFICACIÓN

El uso de los perfiles aerodinámicos con microtabs como control de carga genera un cambio en la sustentación, dependiendo de la posición de los mismos al colocarlos cerca del borde de salida y del índice de solidez. Los microtabs pueden incrementar la sustentación si son ubicadas en la parte de presión o, en su defecto, pueden disminuir la sustentación, si son colocados en el área de succión.

En la actualidad hay estudios que demuestran la aplicación de las micropestañas como control de carga para palas grandes, sin embargo no se han encontrado estudios para palas pequeñas.

Con este trabajo se busca generar una configuración de pala que permita modificar las cargas aerodinámicas cuando ocurran fenómenos tales como ráfagas de viento, que alteran el funcionamiento de los aerogeneradores. Se presentará un estudio ordenado de posicionamiento a lo largo de una pala de 9 metros, que incluya un funcionamiento adecuado de las micropestañas como control de carga, para reducir considerablemente los costos de mantenimiento, así como garantizar un mayor tiempo de vida útil de los componentes que conforman el aerogenerador.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 PRINCIPIOS AERODINÁMICOS

Un perfil aerodinámico, es un cuerpo que tiene un diseño capaz de aprovechar las fuerzas que se originan por la variación de velocidad y presión cuando este perfil se encuentra en una corriente de aire. El ala produce un flujo de aire en medida del ángulo de ataque y a la velocidad con que el ala se mueve con respecto a la masa de aire que lo rodea; de este flujo de aire el que rodea la parte superior del ala tendrá una velocidad mayor que el que rodea la parte inferior, esa mayor velocidad implica una menor presión [15].

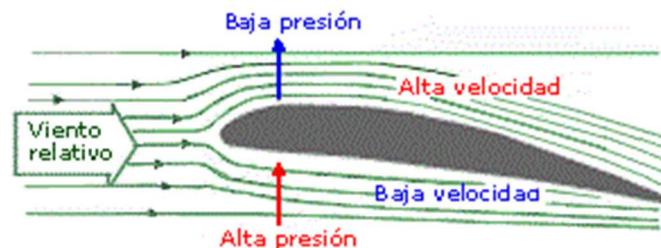


Figura 2.1 Presión vs Velocidad [15].

La superficie superior (succión) del ala soporta menos presión que la parte inferior (presión), lo que produce una diferencia de presiones, provocando una fuerza aerodinámica que empuja al perfil del lado de presión al lado de succión, dicho en otras palabras de la zona de mayor presión (superficie inferior) a la zona de menor presión (superficie superior) como se aprecia en la figura 2.1.

La velocidad relativa del fluido que impacta al perfil y la diferencia de presiones que genera esta condición da origen a la fuerza de sustentación.

2.2 AFECTACIÓN EN LA SUSTENTACIÓN CON EL USO DE MICROPESTAÑAS

De acuerdo al estado del arte, los perfiles aerodinámicos se ven afectados en la sustentación al usar microtabs, ya que estos pueden incrementar la sustentación al ser colocados en la parte inferior del ala es decir en el lado de presión y pueden a su vez lograr una reducción al ser colocados en la parte superior también llamado lado de succión.

Cuando se presenta un perfil aerodinámico en presencia de un flujo de aire las líneas de corriente a través del perfil son continuas, sin embargo cuando se coloca un microtab en la trayectoria del fluido, actúa como una barrera que ocasiona que las velocidades con las que se presenta el flujo se reduzcan y con ello exista un cambio de presiones ocasionando por ende un impacto en la sustentación.

Al colocar microtabs en la parte inferior se genera una reducción de velocidad y con ello un incremento de presión estática provocando que la diferencia de presiones sea mayor que sin el microtab obteniendo como resultado una mayor sustentación positiva. Cuando el microtab es colocado en la parte de succión, afecta de igual forma a la velocidad que lleva el flujo de aire impactando tanto a la fuerza de sustentación como a la fuerza de arrastre.

Los microtabs surgen como un sistema que pueda controlar las cargas aerodinámicas en presencia de ráfagas para asegurar un mayor tiempo de vida de las turbinas eólicas. Estas pequeñas pestañas tienen características que las hacen muy atractivas para un sistema dinámico las cuales son un tamaño pequeño, bajos requerimientos de potencia, activación rápida, simplicidad de diseño mecánico y distancias cortas de despliegue [16].

2.3 ANÁLISIS CFD PARA EVALUACIÓN DE MICROTABS

La evaluación en CFD de los microtabs en este trabajo se realizó para el diseño de una pala de 9 metros basada en la distribución de perfiles de las familias DU y NACA. La implementación de los microtabs con fines de control activo en la pala de 9 metros se propone para evaluar a lo largo de la sección desde 4.275m a 8.325m, que equivalen a los elementos 9-19 del Método del Elemento de Pala. Se tomó esta zona de implementación de los microtabs por la mayor contribución aerodinámica [17].

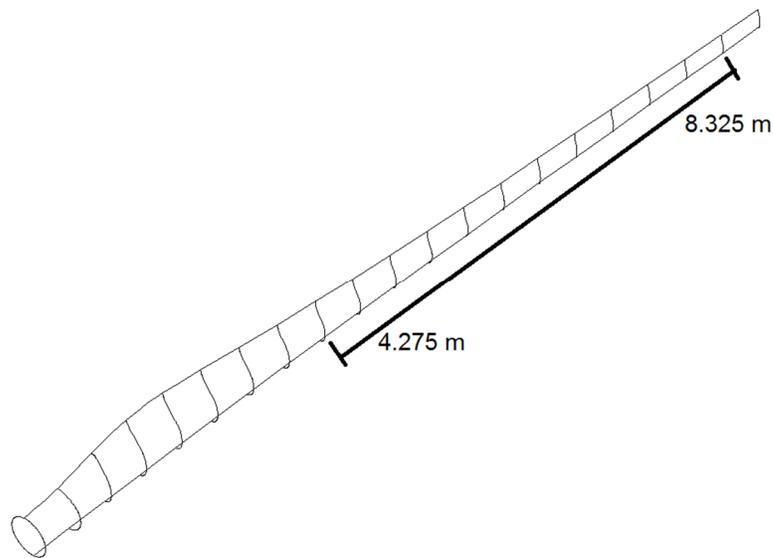


Figura 2.2 Pala segmentada en 20 elementos

Los resultados que se obtuvieron en el estudio experimental y en CFD fueron los siguientes:

α	CL		CD	
	Experimental sin MT	CFD con MT	Experimental sin MT	CFD con MT
7°	1.27	0.76606	0.011	0.06386

Tabla 2.1 CL y CD a un ángulo de ataque de 7° [17]

La Tabla 2.1 muestra el análisis con un ángulo de ataque de 7° de la información correspondiente al estudio realizado experimentalmente sin MT y en CFD con MT por colaboradores de CIDESI ya que ese es el objeto de estudio para este proyecto. Con estos datos se obtuvo el factor de actualización por Microtab el cuál se toma como la división del coeficiente con MT entre el coeficiente sin MT.

$$\text{Factor de actualización por MT} = \frac{\text{CFD con MT}}{\text{Experimental sin MT}}$$

Es decir para el CL es un factor de actualización de 0.6031 y para el CD es un factor de actualización de 5.8, los cuáles se colocarán en el CL y CD del Método de cantidad de movimiento del elemento de aspa para estudiar las correspondientes fuerzas que se presentan con las diferentes configuraciones con Microtabs.

2.4 MÉTODO DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO DEL ELEMENTO ASPA

EL método de cantidad de movimiento del elemento aspa conocido por sus siglas en Ingles BEM (Blade Element Momentum) parte de un número finito de aspas del rotor, centrándose en el cálculo de las cargas estables, el empuje y la potencia para diferentes tipos de velocidades y ángulos según Hansen [18]. Este método señala que el aspa se puede dividir en un número finito de elementos o secciones de altura dr como se muestra en figura 2.3, de esta manera cada elemento aporta su empuje para hacer un total de carga.

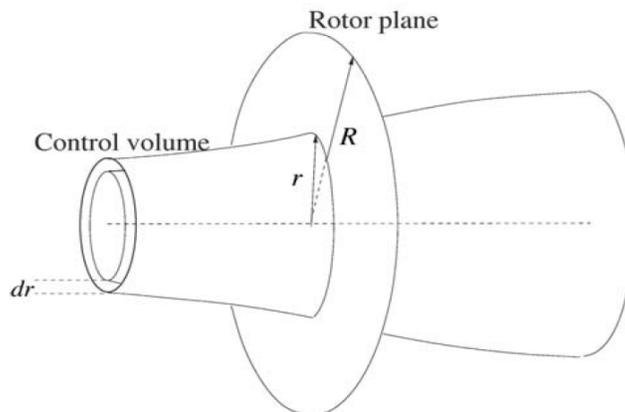


Figura 2.3 Volumen de control mostrado como elemento anular para ser utilizado en el modelo BEM [18]

Una explicación del modelo BEM consiste en utilizar un balance de la cantidad de movimiento en un tubo de flujo anular giratorio que pasa por una turbina y examinar las fuerzas generadas por los coeficientes de sustentación y de arrastre en las secciones a través de la pala. Con base a estos dos puntos necesarios en el método se derivan una serie de ecuaciones que pueden resolverse iterativamente [19].

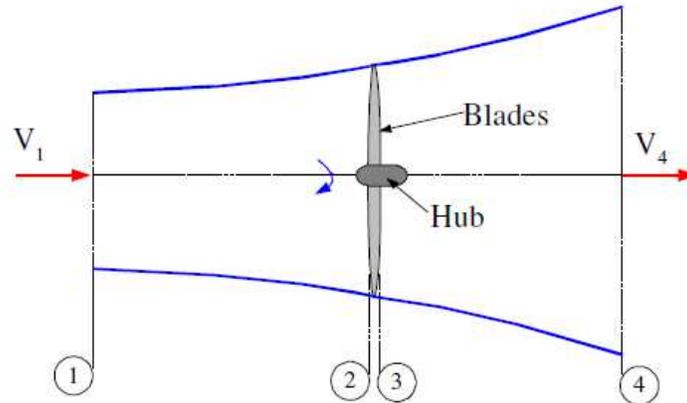


Figura 2.4 Tubo de corriente alrededor de una turbina eólica [19]

La figura 2.4, muestra las cuatro estaciones que se perciben en un tubo de corriente alrededor de una turbina eólica:

- I. Velocidad contracorriente de la turbina
- II. Velocidad justo antes de la turbina
- III. Velocidad justo después de la turbina
- IV. Velocidad con la corriente de la turbina

El empuje es la fuerza en la dirección de la corriente resultante de la caída de presión sobre el rotor.

$$T = \Delta p A \quad (1)$$

$$\text{Donde } A = \pi R^2$$

Para esto entre la estación 2 y 3 se extrae energía del viento y se produce un cambio de presión. De acuerdo a la Figura 2.5 se toma en cuenta que $P_1 = P_4$ y que $V_2 = V_3$.

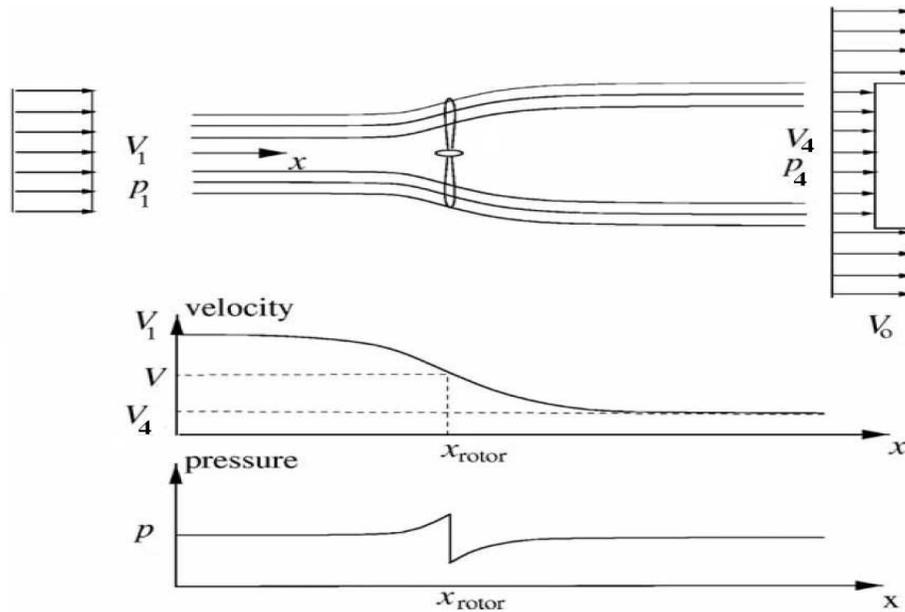


Figura 2.5 Comportamiento de la velocidad y presión axial antes y después del rotor

Asimismo se supone que entre la estación 1 y 2, 3 y 4 el flujo es sin fricción por lo que se puede aplicar la ecuación de Bernoulli.

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2)$$

y

$$p - \Delta p + \frac{1}{2} \rho V^2 = p_0 + \frac{1}{2} \rho V_4^2 \quad (3)$$

Combinando la ecuación (2) y (3)

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2) \quad (4)$$

$$p_2 - p_3 = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2) \quad (5)$$

Debido a la caída de presión en el rotor, se puede determinar la fuerza de empuje axial dF_x , por la sumatoria de fuerzas o momentum lineal sobre un elemento anular con área dA :

$$dF_x = (p_2 - p_3) dA \quad (6)$$

Al usar la ecuación (5), se obtiene:

$$dF_x = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_4^2) dA \quad (7)$$

Para ello se introduce el factor de inducción axial el cual expresa el efecto de la reducción de velocidad justo antes del rotor, este es:

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_1} \quad (8)$$

Esto también puede mostrarse como:

$$V_2 = V_1(1 - a) \quad (9)$$

$$V_4 = V_1(1 - 2a) \quad (10)$$

Usando estas ecuaciones la ecuación (7) se puede expresar como:

$$dF_x = 4\pi r \rho V_1^2 a(1 - a) dr \quad (11)$$

Donde:

$$2\pi r dr = dA$$

Lo cual representa el área de un elemento anular.

Debido a la existencia de pérdidas asociadas a la punta y a un número finito de aspas. Hansen [18] toma en cuenta las pérdidas de Prandtl a través de un factor F que adquiere valores entre 0 y 1, así entonces, la ecuación (11) adquiere la forma:

$$dF_x = F 4 \pi r \rho V_1^2 a(1 - a) dr \quad (12)$$

Quedando de esta manera la ecuación que define a la fuerza axial dF_x en un elemento anular.

2.5 TORQUE

Para el estudio del torque dT en un elemento anular, se tienen las 4 estaciones del volumen de control que se observan en la Figura 2.6, sin embargo en las estaciones 2 y 3 la estela del viento tendrá movimiento rotacional por la reacción del torque del rotor y esta rotación implica una pérdida de energía adicional. En la figura 5 se puede observar que la estela gira con una velocidad angular ω y las palas giran con una velocidad angular de Ω en sentido contrario a la estela.

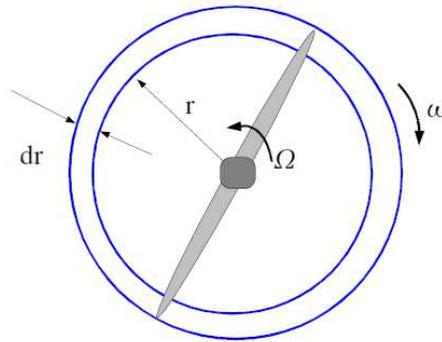


Figura 2.6 Tubo giratorio de flujo anular [19]

ω = Velocidad angular de la estela
 Ω = Velocidad angular de las palas
 r = Radio
 dr = Diferencial

Debido a que el momento de Inercia de un anillo es:

$$I = mr^2 \quad (13)$$

El momento angular:

$$L = I\omega \quad (14)$$

Torque:

$$T = \frac{dL}{dt} \quad (15)$$

$$T = \frac{dI\omega}{dt} = \frac{d(mr^2\omega)}{dt} = \frac{dm}{dt}r^2\omega \quad (16)$$

Para un elemento pequeño el torque correspondiente será:

$$dT = d\dot{m}\omega r^2 \quad (17)$$

Para el elemento anular giratorio:

$$d\dot{m} = \rho dAV_2 \quad (18)$$

$$d\dot{m} = \rho 2\pi r dr V_2 \quad (19)$$

$$dT = \rho V_2 \omega r^2 2\pi r dr \quad (20)$$

Para ello también existe el factor de inducción rotacional, el cual relaciona las velocidades angulares de la estela y el rotor:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (21)$$

Recordando que $V_2 = V_1(1 - a)$:

$$dT = 4a'(1 - a)\rho V_1 \Omega r^3 \pi dr \quad (22)$$

De forma similar a la ecuación de la fuerza axial, se considera un factor de pérdidas:

$$dT = 4Fa'(1 - a)\rho V_1 \Omega r^3 \pi dr \quad (23)$$

El método BEM se basa en dos grandes supuestos para los elementos anulares:

- I. No hay interacción aerodinámica entre los diferentes elementos de aspa
- II. Las fuerzas sobre los elementos de aspa están solamente determinadas por los coeficientes de arrastre y sustentación.

Para el análisis se considera una pala dividida en N elementos como se muestra en la Figura 2.7, cada uno de los elementos de la pala experimentará un flujo diferente ya que tienen características diferentes como lo son velocidad de rotación Ωr , longitud de cuerda (c), y un ángulo de giro (γ). La teoría como ya se ha mencionado implica dividir en un número suficiente (entre 10 y 20) de elementos y calcular el flujo en cada uno de ellos para que cada elemento pueda aportar la parte de la fuerza de empuje que se

genera en toda la pala, así las características generales de rendimiento se determinan mediante la integración numérica a lo largo de la pala.

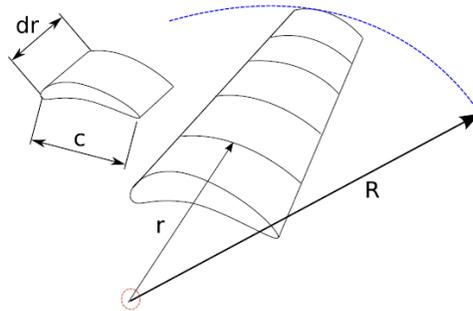


Figura 2.7 Modelo del elemento de pala [19]

El flujo alrededor de las palas comienza en la estación dos y termina en la estación tres (figura 2.4). En la estación 2 el flujo de la estela no rota, en la estación 3 el flujo gira a una velocidad de rotación de ω . Por lo tanto la velocidad angular sobre el elemento aspa, será el promedio entre la estación 2 y 3, esto es $\frac{\omega}{2}$.

Si el aspa rota a una velocidad angular y de sentido contrario a la estela, la velocidad tangencial relativa al aspa (V_v) en una posición r , será: $\Omega r + \frac{1}{2}\omega r$.

Así en función del coeficiente de inducción rotacional, la velocidad relativa tangencial es:

$$V_v = \Omega r(1 + a') \quad (24)$$

La velocidad axial V_a en el aspa es:

$$V_a = V_1(1 - a) \quad (25)$$

De esta manera la velocidad relativa del viento (V_{rel}) sobre el aspa, es la suma vectorial de las velocidades V_v y V_a como se puede apreciar gráficamente en la figura 2.8, en la cual se muestran los vectores de velocidad y los ángulos más importantes que son parte de la geometría del aspa los cuales se describen a continuación:

ϕ , denominado ángulo relativo, el cual indica la dirección de la velocidad relativa V_{rel} con respecto al plano de rotación de las aspas o rotación del rotor.

θ , denominado ángulo de paso, el cual señala la dirección de la cuerda del aspa con respecto al plano de rotación del rotor.

α , denominado ángulo de ataque, indica la dirección de la velocidad relativa V_{rel} con respecto a la cuerda del aspa.

$$\alpha = \phi - \theta. \quad (26)$$

En la Figura 2.8 se puede observar claramente la relación de la $\tan \phi$:

$$\tan \phi = \frac{V_1(1-a)}{\Omega r(1+a')} \quad (27)$$

Esta misma ecuación se puede expresar en términos de la velocidad típica (λ). Definida como la relación de velocidad tangencial del rotor y la velocidad del viento.

$$\lambda = \frac{\Omega r}{V_1} \quad (28)$$

Entonces la $\tan \phi$ se puede expresar como:

$$\tan \phi = \frac{(1-a)}{\lambda(1+a')} \quad (29)$$

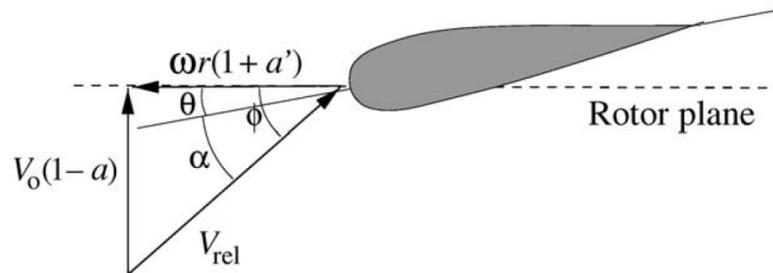


Figura 2.8 Velocidades en el plano del rotor [18]

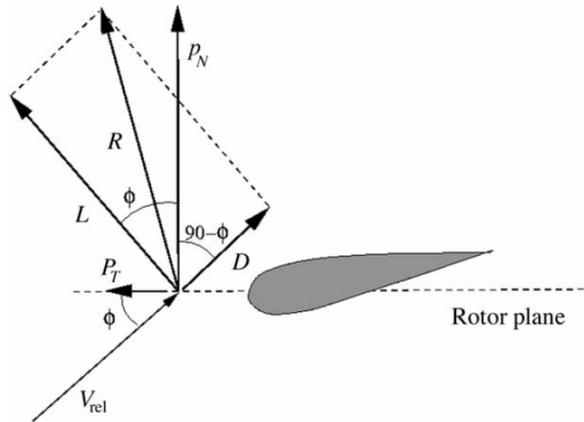


Figura 2.9 Cargas locales de una pala [18]

En la figura 2.9 se muestran las fuerzas presentes en un elemento aspa. Las fuerzas por unidad de longitud radial, de sustentación L y arrastre D se definen de la siguiente manera:

$$L = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c C_L \quad (30)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c C_D \quad (31)$$

Donde:

C es la longitud de la cuerda del perfil del aspa

C_L es el coeficiente de sustentación

C_D es el coeficiente de arrastre

La fuerza resultante en la dirección axial dF_x es:

$$dF_x = B P_N dr \quad (32)$$

Donde:

$$P_N = L \cos \phi + D \operatorname{sen} \phi \quad (33)$$

De forma similar para el torque:

$$dM = r B P_T dr \quad (34)$$

Donde:

$$P_T = L \operatorname{sen} \phi - D \cos \phi \quad (35)$$

Con base a las consideraciones anteriores, se igualan las ecuaciones (12) y (32), para obtener el factor de inducción axial a .

$$a = \frac{1}{\frac{4F \operatorname{sen}^2 \phi}{\sigma C_n} + 1} \quad (36)$$

Donde:

$$C_n = C_L \cos \phi + C_D \operatorname{sen} \phi \quad (37)$$

$$\sigma = \frac{c(r)B}{2\pi r} \text{ Es el coeficiente de solidez local o dependiente de } r. \quad (38)$$

Similarmente, al igualar las ecuaciones (23) y (34) se puede resolver el factor de inducción a' :

$$a' = \frac{1}{\frac{4F \operatorname{sen} \phi \cos \phi}{\sigma C_t} - 1} \quad (39)$$

Donde:

$$C_t = C_L \operatorname{sen} \phi - C_D \cos \phi \quad (40)$$

Todas las ecuaciones para el procedimiento de cálculo del método BEM se han descrito y el algoritmo se puede resumir en los siguientes 8 pasos [18].

- Paso 1. Inicialice en a y a' , normalmente $a = a' = 0$.
- Paso 2. Calcule el ángulo relativo ϕ usando la ecuación (29).
- Paso 3. Calcule el ángulo de ataque usando la ecuación (26)
- Paso 4. Lea C_D y C_L de la tabla de coeficientes aerodinámicos.
- Paso 5. Calcule C_n y C_t de las ecuaciones (37) y (40).
- Paso 6. Calcule a y a' a partir de las ecuaciones (36) y (39).
- Paso 7. Si a y a' han cambiado más de una cierta tolerancia vaya al paso 2 o bien terminar.
- Paso 8. Calcule las cargas locales en el segmento de la pala.

2.6 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos muestra los efectos de las variables de entrada sobre la variable de salida. Experimentos que consisten en corridas o pruebas en las que se realizan cambios intencionales en las variables de entrada. Para llevar a cabo un buen análisis se necesita cumplir con las pautas generales de un diseño de experimentos según Montgomery [20] las cuales se muestran en la tabla 2.2.

1. Identificación y exposición del problema.
2. Elección de los factores, los niveles y los rangos.
3. Selección de la variable de respuesta.
4. Elección del diseño experimental.
5. Realización del experimento.
6. Análisis estadístico de los datos.
7. Conclusiones y recomendaciones.

Nota: En la práctica, los pasos 2 y 3 suelen hacerse simultáneamente o en el orden inverso.

Planeación previa
al experimento

Tabla 2.2 Pautas generales para diseñar un experimento [20]

Para encontrar cuál es la máxima reducción de cargas posible en función de la posición radial y el índice de solidez de los microtabs, se procede a definir cada una de las pautas para el estudio de la pala de 9 metros.

Identificación y exposición del problema para el desarrollo del diseño de experimentos: Las ráfagas de viento y las alteraciones de la naturaleza hacen que no se tenga un control sobre la velocidad del viento que actúa sobre el aerogenerador, por lo que genera un descontrol en los mismos provocando daños a las palas e incluso pérdida total de la turbina eólica. Es por ello que al introducir las micropestañas como sistema de control de carga activa en los aerogeneradores se busca encontrar la máxima reducción de cargas posible en función de la posición radial, y el índice de solidez de los microtabs.

Para ello se busca generar una configuración de pala que permita modificar las cargas aerodinámicas de tal manera que sean más eficientes cuando ocurran fenómenos que alteran el funcionamiento de los aerogeneradores y con ello tener una mejor protección hacia los mismos reduciendo costos de mantenimiento y de vida útil.

Elección de los factores, los niveles y los rangos: De acuerdo a la revisión de la literatura y en función de la variable respuesta que se quiere conocer, se definieron como factores para el estudio, la posición radial que indica en donde se van a localizar las micropestañas en la pala radialmente y el índice de solidez que señala la continuidad de las micropestañas en la pala.

Factores	Bajo	Medio	Alto
Posición Radial	35% (-1)	44% (0)	55% (1)
Índice de Solidez	72% (-1)	81% (0)	100% (1)

Tabla 2.3 Selección de factores

Como se observa en la tabla 2.3, los autores mencionados estudiaron la posición radial (r %) en rangos del 72% al 96% con base en lo anterior, en este estudio se trabajó con rangos de 45% al 95% con el afán de tener mayor cobertura y asimismo estudiar el comportamiento en esas zonas que no muestra la literatura.

Para el índice de solidez muestra que los porcentajes a los cuales se ha trabajado son arriba del 85% ya que Johnson en su estudio *Active Load Control Techniques for Wind Turbines* menciona que un radio de solidez menor al 75% permite que el flujo se reacomode en el borde de salida lo que reduce drásticamente el rendimiento de la pestaña, sin embargo para comprobar este resultado, los niveles del índice de solidez que se escogieron para este trabajo son 72%, 81% y 100% para así corroborar lo estudiado.

Autor (año)	Índice de solidez (i %)	Posición radial (r %)
S. J. Johnson and D. E. Berg (2008)	85% o más No menor a 75%	
Cooperman y cols. (2011)	93%	
Senosiain (2013)	96%	
Macquart y Maheri (2015)		76% - 96%
Macquart (2014)		72%-93%

Tabla 2.4 Bibliografía consultada

Selección de la variable de respuesta: La Fuerza axial es la variable de respuesta para este estudio, ya que lo que se busca es disminuir la misma para minimizar los daños que puedan ser ocasionados en el aerogenerador.

Elección del diseño experimental: Para este estudio se usó un Diseño de Superficie de Respuesta Centrado en la Cara de 2 factores con 3 niveles y 3 puntos en el centro, para poder evaluar si existe curvatura en la superficie de respuesta y con ello calcular los valores ajustados en los puntos de vértice y el punto central del diseño.

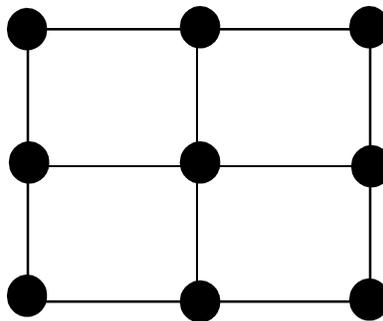


Figura 2.10 Diseño de Superficie de respuesta Centrado en la Cara

Corridas	Factor A	Factor B
1	-1	-1
2	0	-1
3	1	-1
4	-1	0
5	0	0
6	1	0
7	-1	1
8	0	1
9	1	1
10	0	0
11	0	0

Tabla 2.5 Diseño de superficie de respuesta centrado en la cara codificado

Factor i (índice de solidez) equivalente a tres niveles que son 72% (-1) figura 2.11, 81% (0) figura 2.12, 100% (1) figura 2.13.

Factor r (posición radial) equivalente a tres niveles que son 35% (-1) figura 2.14, 44% (0) figura 2.15, 55% (1) figura 2.16.

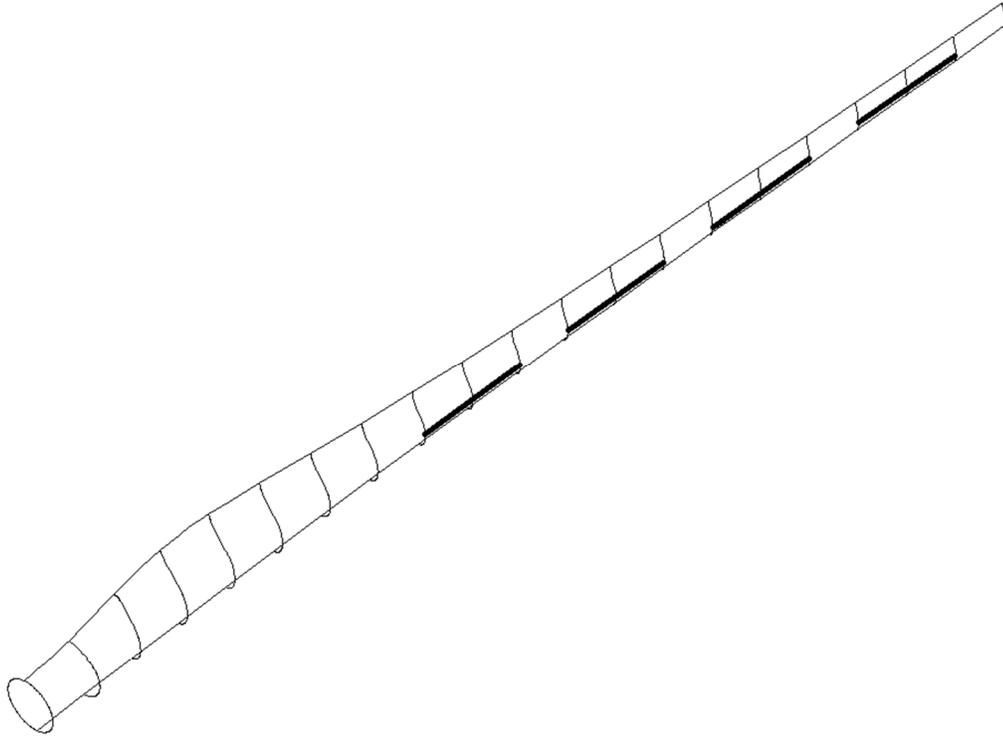


Figura 2.11 Pala segmentada con micropestañas al 72% de índice de solidez

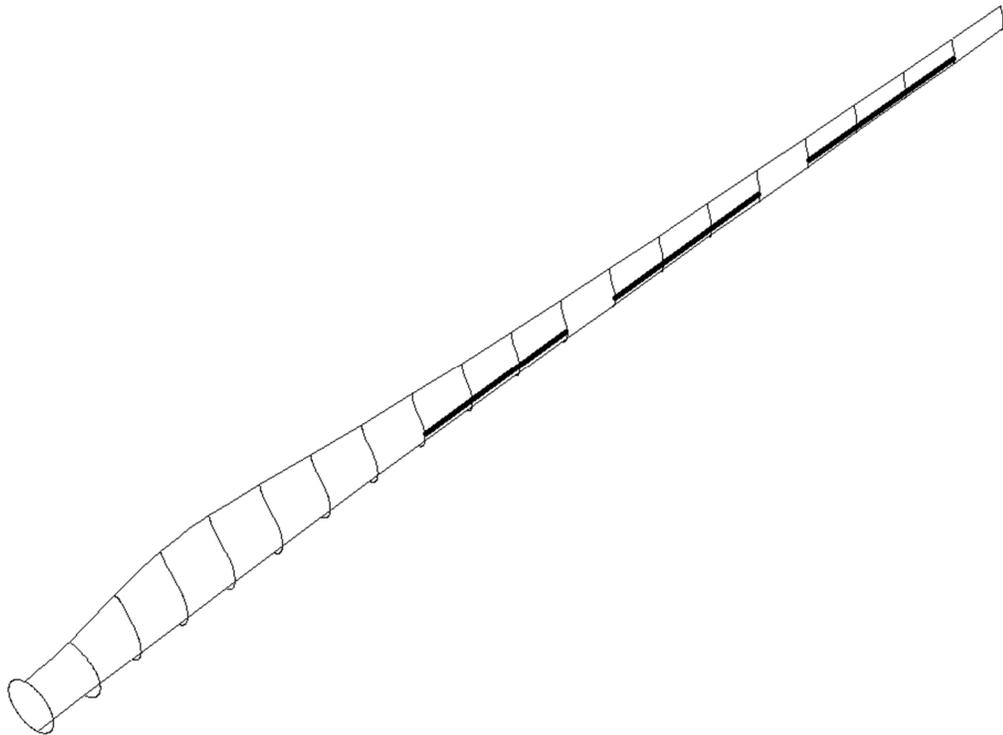


Figura 2.12 Pala segmentada con micropestañas al 81% de índice de solidez

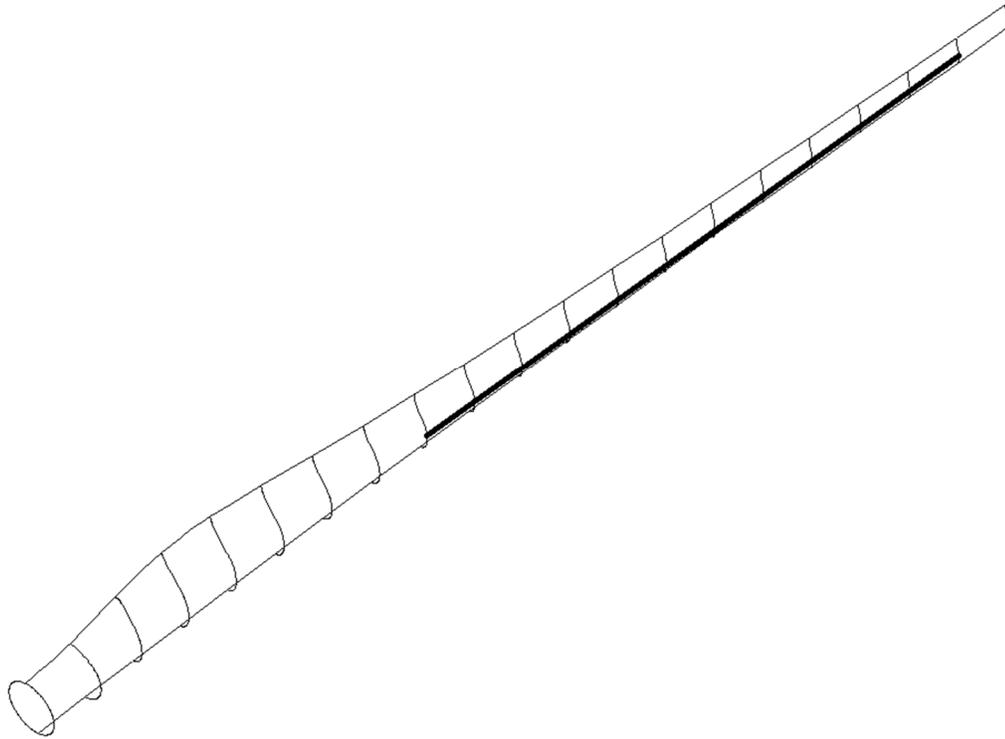


Figura 2.13 Pala segmentada con micropestañas al 100% de índice de solidez

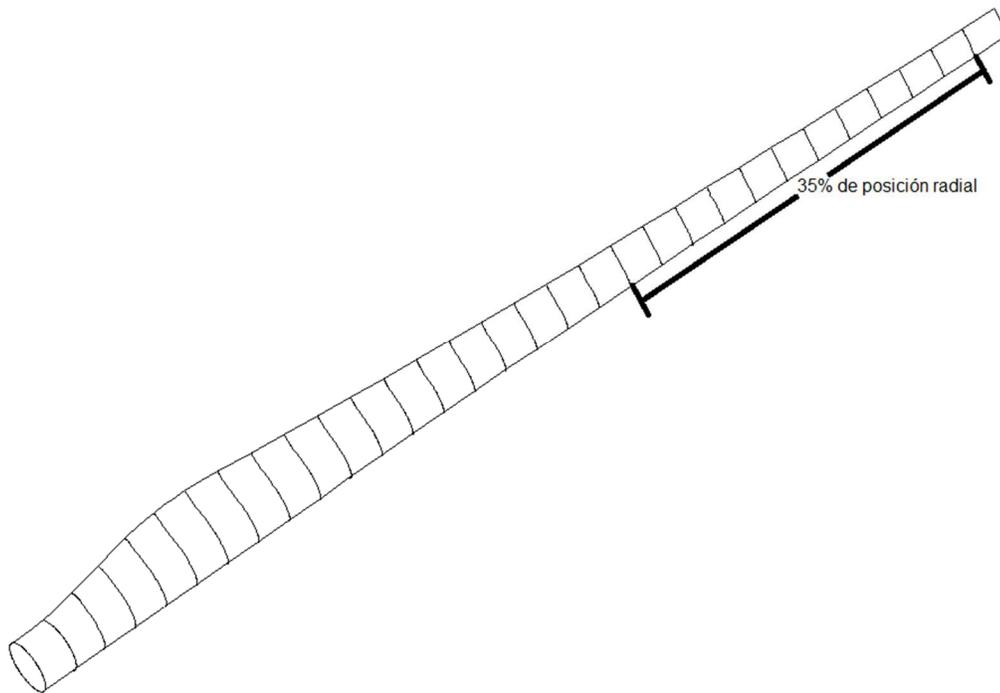


Figura 2.14 Pala segmentada al 35% de posición radial

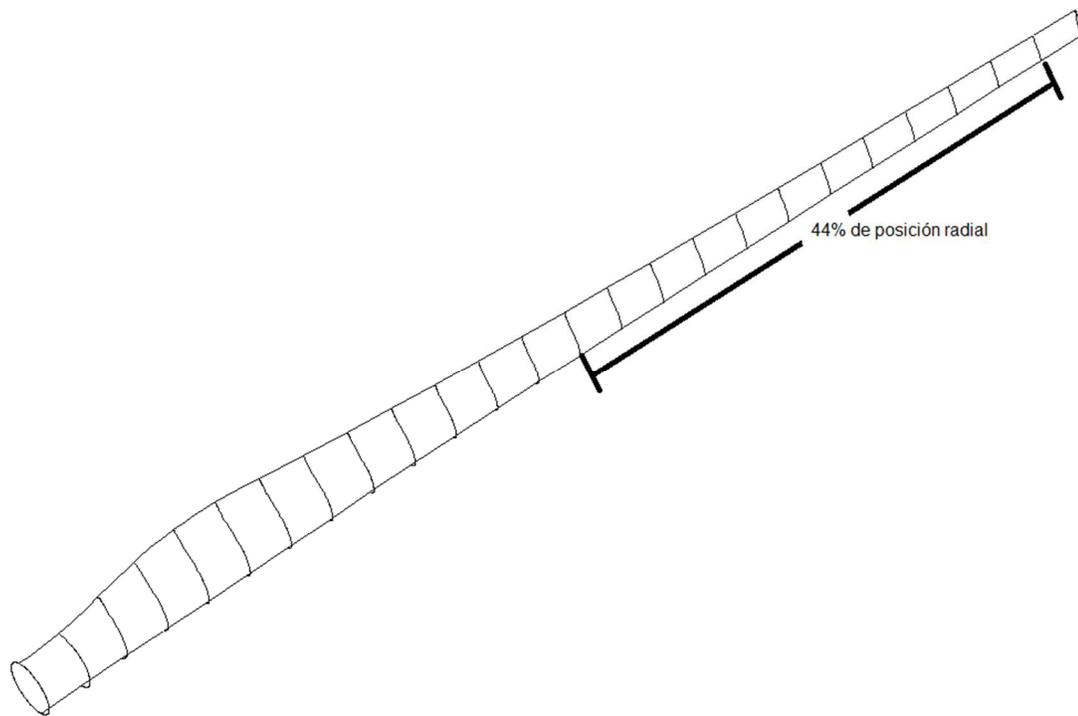


Figura 2.15 Pala segmentada al 44% de posición radial

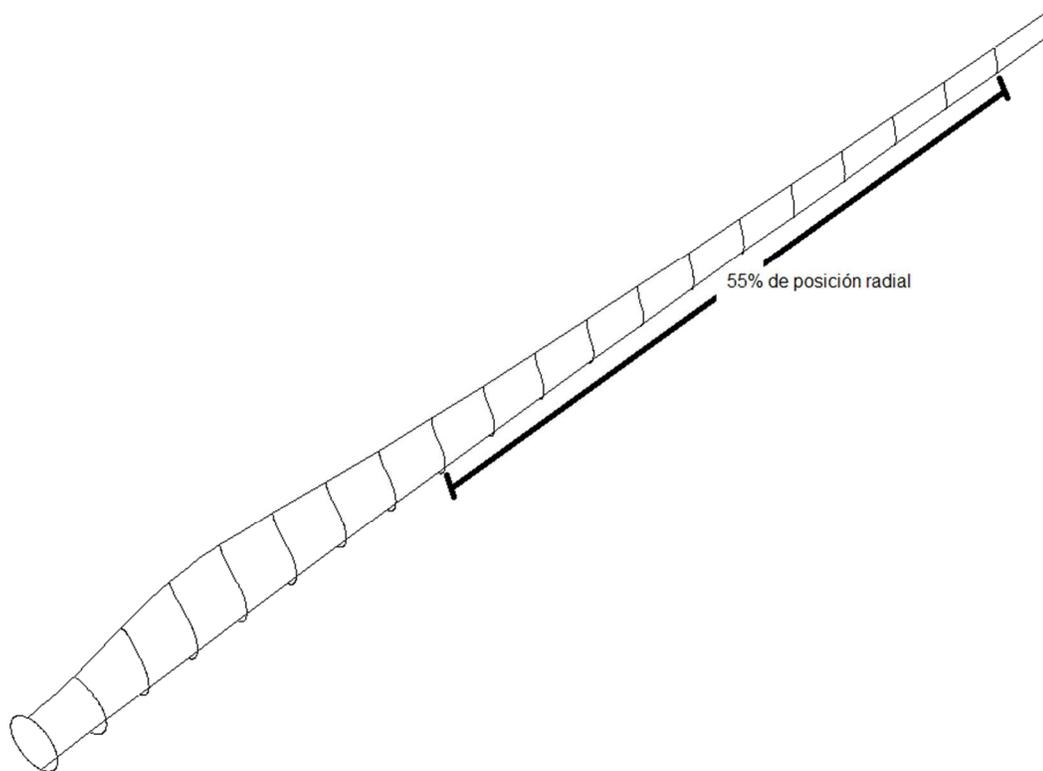


Figura 2.16 Pala segmentada al 55% de posición radial

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 FUERZA AXIAL A TRAVÉS DEL MÉTODO DEL ELEMENTO DE PALA (BEM)

Siguiendo la metodología de la Cantidad de Movimiento del Elemento de Pala para llevar a cabo el estudio de la pala de 9 metros se introdujeron los datos que se muestran en la Figura 3.1.

MÉTODO DEL MOMENTUM DEL ELEMENTO ÁLABE (BEM)			
DATOS			
	CANTIDAD	UNIDAD	
Diámetro del rotor	18.000	m	
Número de aspas	3.000		
Valor inicial a	0.300		
Valor inicial a'	0.010		
Ángulo de ataque	7.000	°	
Velocidad típica	6.800		
Diámetro de la nariz	1.260	m	
Número de elementos álabes	20.000		
Densidad del aire	1.020	kg/m ³	
Velocidad del viento de diseño (Clase III)	10.50	m/s	
Factor de escalamiento de cuerda	4.600		
Factor de Pérdidas	0.800		
Longitud del álabes	8.370	m	
Velocidad angular NOMINAL del rotor	7.933	rad/s	
Velocidad angular NOMINAL del rotor	75.758	rev/min	

Figura 3.1 Datos iniciales para una pala de 9 metros en el método BEM

Con base a estos datos se procedió a realizar los análisis correspondientes para obtener la Fuerza Axial de la pala y así posteriormente obtener un óptimo de fuerza axial que cumpla con las características deseadas del objeto de estudio.

Para llevar a cabo las corridas que cumplieran con los mismos porcentajes de estudio del índice de solidez (72%, 81% y 100%) se realizaron 3 programaciones de BEM basadas en la división de la pala en diferente número de elementos, las configuraciones quedaron de la siguiente manera:

1. División de pala en 20 elementos (figura 3.2)
2. División de pala en 25 elementos (figura 3.3)
3. División de pala en 31 elementos (figura 3.4)

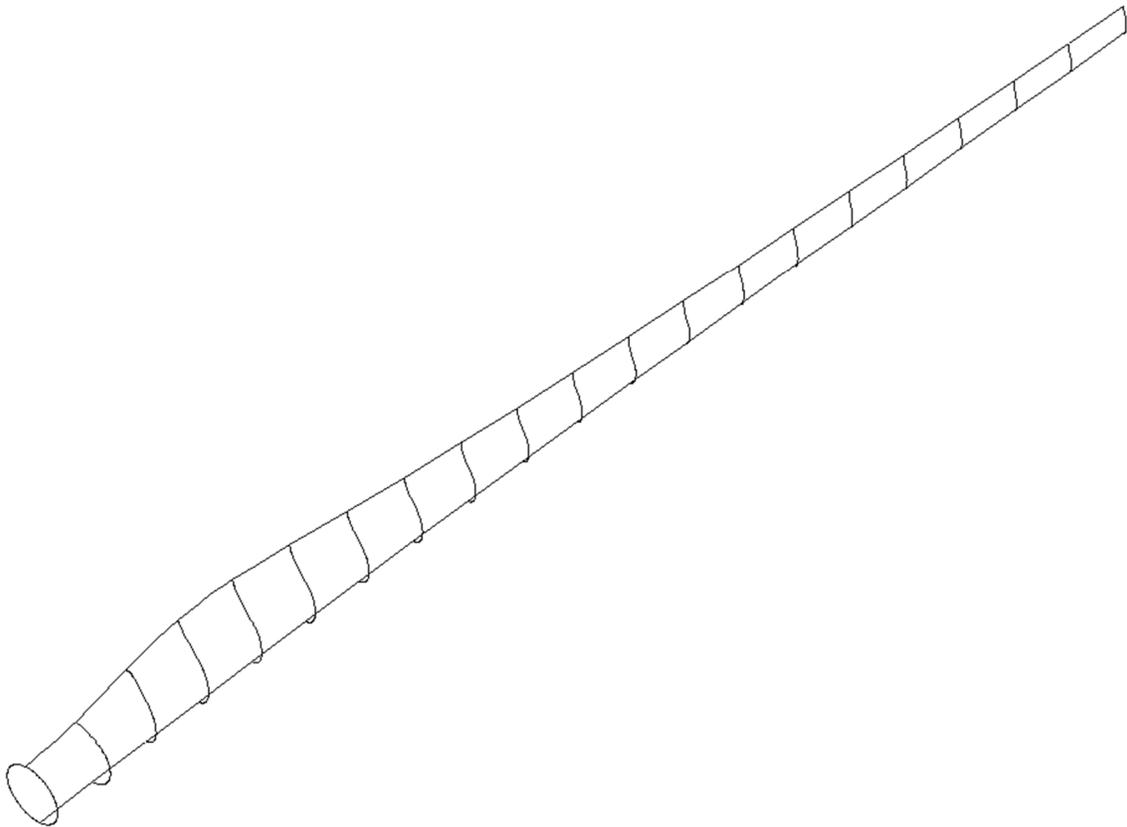


Figura 3.2 División de pala en 20 elementos

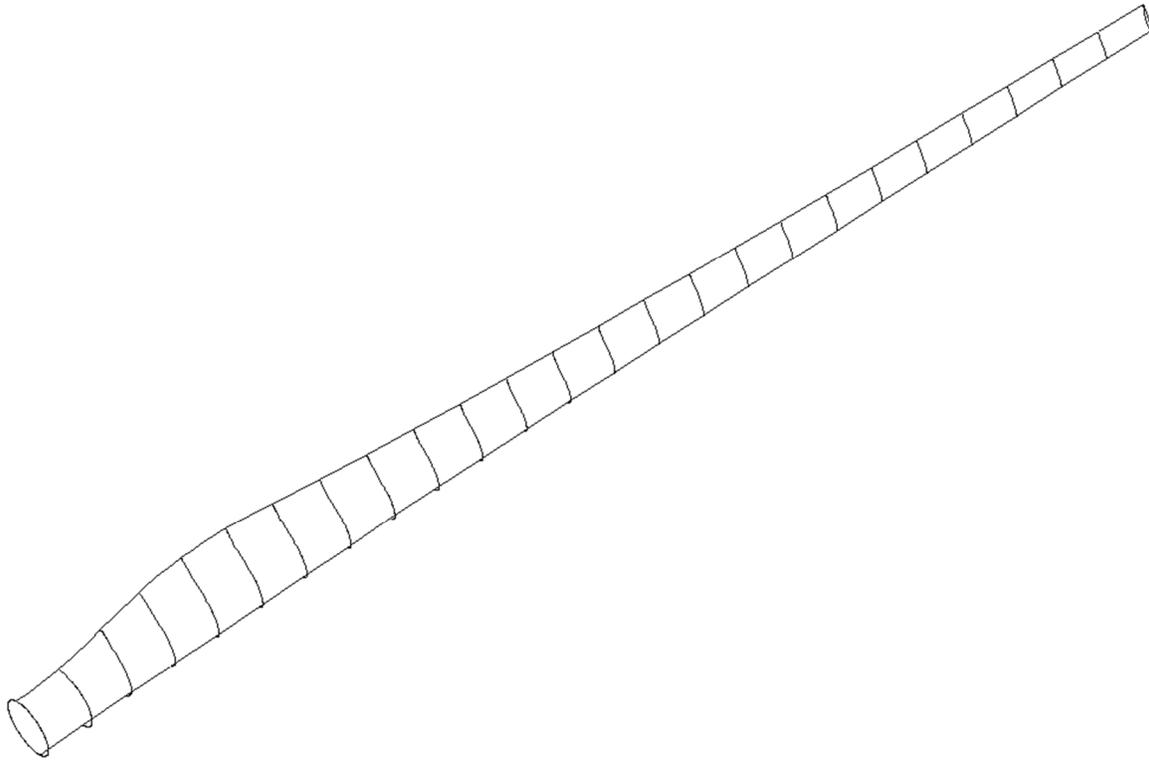


Figura 3.3 División de pala en 25 elementos

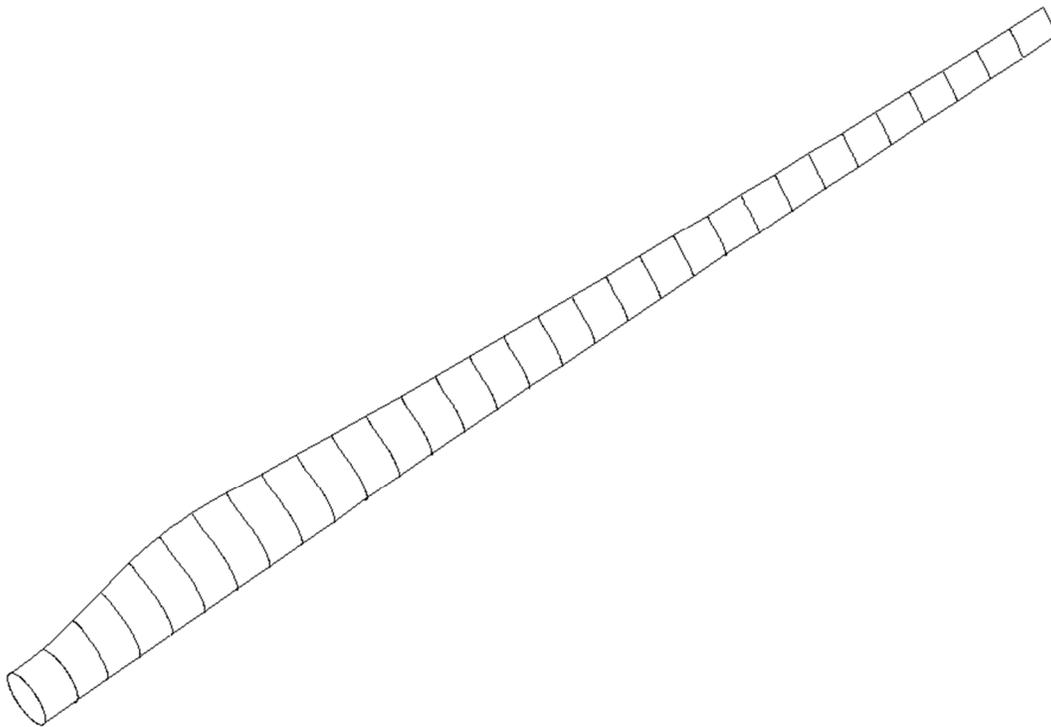


Figura 3.4 División de pala en 31 elementos

Por ejemplo en la figura 3.2 se muestra la configuración de la pala en 20 elementos en donde se hizo el estudio con una posición radial del elemento 9 al elemento 19 con un porcentaje del 55% de posición radial, estos elementos se midieron con el índice de solidez de las micropestañas a tres porcentajes, 72%, 81% y 100% con el afán de observar el comportamiento de la pala en los tres diferentes índices de solidez con micropestañas y obtener las fuerzas resultantes de estas configuraciones las cuales se muestran a continuación.

En la Figura 3.5 se muestra la configuración de pala a un índice de solidez del 100% y una posición radial del 55% en la cual se trabajaron los elementos del 9-19 con Microtab, dando un resultado de una fuerza axial de 6,505.08 N.

MÉTODO DEL MOMENTUM DEL ELEMENTO ÁLABE (BEM)			
DATOS		CANTIDAD	UNIDAD
	Diámetro del rotor	18.000	m
	Número de aspas	3.000	
	Valor inicial α	0.300	
	Valor inicial α'	0.010	
	Ángulo de ataque	7.000	°
	Velocidad típica	6.800	
	Diámetro de la nariz	1.260	m
	Número de elementos álabes	20.000	
	Densidad del aire	1.020	kg/m ³
	Velocidad del viento de diseño (Clase III)	10.50	m/s
	Factor de escalamiento de cuerda	4.600	
	Factor de Pérdidas	0.800	
	Longitud del álabes	8.370	m
	Velocidad angular NOMINAL del rotor	7.933	rad/s
	Velocidad angular NOMINAL del rotor	75.758	rev/min
RESULTADOS			
	Potencia del rotor	32,061.51	W
	Fuerza axial en el rotor	6,505.08	N

Figura 3.5 Configuración de pala 100% de índice de solidez y 55% de posición radial

METODO DEL MOMENTUM DEL ELEMENTO ALABE (BEM)		
DATOS	CANTIDAD	UNIDAD
Diámetro del rotor	18.000	m
Número de aspas	3.000	
Valor inicial α	0.300	
Valor inicial α'	0.010	
Angulo de ataque	7.000	°
Velocidad típica	6.800	
Diámetro de la nariz	1.260	m
Número de elementos álabe	20.000	
Densidad del aire	1.020	kg/m ³
Velocidad del viento de diseño (Clase III)	10.50	m/s
Factor de escalamiento de cuerda	4.600	
Factor de Pérdidas	0.800	
Longitud del álabe	8.370	m
Velocidad angular NOMINAL del rotor	7.933	rad/s
Velocidad angular NOMINAL del rotor	75.758	rev/min
RESULTADOS		
Potencia del rotor	37,087.13	W
Fuerza axial en el rotor	7,017.95	N

Figura 3.6 Configuración de pala 81% de índice de solidez y 55% de posición radial

En la figura 3.6 se muestra una configuración de pala a un índice de solidez del 81% y una posición radial del 55% en la cual se trabajaron los elementos del 9-19, sin embargo como esta configuración está al 81%, se trabajó una configuración de 3,1, es decir 3 elementos cuenta con Microtab y 1 elemento no cuenta con el mismo, haciendo un total de 9 elementos con Microtab y 2 elementos naturales estableciendo un 81% de índice de solidez y un 55% de posición radial. Esta configuración da un resultado de una fuerza axial de 7,017.95 N.

METODO DEL MOMENTUM DEL ELEMENTO ALABE (BEM)				
		DATOS	CANTIDAD	UNIDAD
		Diámetro del rotor	18.000	m
		Número de aspas	3.000	
		Valor inicial α	0.300	
		Valor inicial α'	0.010	
		Angulo de ataque	7.000	°
		Velocidad típica	6.800	
		Diámetro de la nariz	1.260	m
		Número de elementos álabe	20.000	
		Densidad del aire	1.020	kg/m ³
		Velocidad del viento de diseño (Clase III)	10.50	m/s
		Factor de escalamiento de cuerda	4.600	
		Factor de Pérdidas	0.800	
		Longitud del álabe	8.370	m
		Velocidad angular NOMINAL del rotor	7.933	rad/s
		Velocidad angular NOMINAL del rotor	75.758	rev/min
RESULTADOS				
		Potencia del rotor	39,535.97	W
		Fuerza axial en el rotor	7,278.98	N

Figura 3.7 Configuración de pala 72% de índice de solidez y 55% de posición radial

En la figura 3.7 se muestra una configuración de pala a un índice de solidez del 72% y una posición radial del 55% en la cual se trabajaron los elementos del 9-19, sin embargo como esta configuración está al 72%, se trabajó una distribución de 2,1, es decir 2 elementos cuenta con microtab y 1 elemento no cuenta con el mismo, haciendo un total de 8 elementos con microtab y 3 elementos naturales los cuales fueron los elementos 9,10, 12, 13, 15, 16, 18 y 19 con microtab y los elementos 11, 14 y 17 sin microtab, formando un 72% de índice de solidez en un 55% de posición radial. Con esta configuración de pala se obtiene 7,278.98 N de fuerza axial.

La segunda programación corresponde a la pala dividida en 25 elementos, en la cual se trabajaron los elementos comprendidos del 14 al 24 que equivalen a un 44% de posición radial, estos elementos fueron medidos al 72%, 81% y 100% de índice de solidez con micropestañas.

METODO DEL MOMENTUM DEL ELEMENTO ALABE (BEM)		
DATOS	CANTIDAD	UNIDAD
Diámetro del rotor	18.000	m
Número de aspas	3.000	
Valor inicial α	0.300	
Valor inicial α'	0.010	
Angulo de ataque	7.000	°
Velocidad típica	6.800	
Diámetro de la nariz	1.260	m
Número de elementos álabe	25.000	
Densidad del aire	1.020	kg/m ³
Velocidad del viento de diseño (Clase III)	10.50	m/s
Factor de escalamiento de cuerda	4.600	
Factor de Pérdidas	0.800	
Longitud del álabe	8.370	m
Velocidad angular NOMINAL del rotor	7.933	rad/s
Velocidad angular NOMINAL del rotor	75.758	rev/min
RESULTADOS		
Potencia del rotor	34,669.10	W
Fuerza axial en el rotor	6,816.96	N

Figura 3.8 Configuración de pala 100% de índice de solidez y 44% de posición radial

La figura 3.8 muestra el resultado de la configuración de pala al 100% de índice de solidez en un 44% de la posición radial, la distribución está basada en 11 elementos comprendidos del elemento 14 al elemento 24, como el índice de solidez de esta configuración es del 100% se sabe que los 11 elementos contienen Microtab, teniendo este diseño, se obtiene una fuerza axial de 6,816.96 N.

METODO DEL MOMENTUM DEL ELEMENTO ALABE (BEM)		
DATOS	CANTIDAD	UNIDAD
Diámetro del rotor	18.000	m
Número de aspas	3.000	
Valor inicial α	0.300	
Valor inicial α'	0.010	
Angulo de ataque	7.000	°
Velocidad típica	6.800	
Diámetro de la nariz	1.260	m
Número de elementos álabe	25.000	
Densidad del aire	1.020	kg/m ³
Velocidad del viento de diseño (Clase III)	10.50	m/s
Factor de escalamiento de cuerda	4.600	
Factor de Pérdidas	0.800	
Longitud del álabe	8.370	m
Velocidad angular NOMINAL del rotor	7.933	rad/s
Velocidad angular NOMINAL del rotor	75.758	rev/min
RESULTADOS		
Potencia del rotor	39,089.41	W
Fuerza axial en el rotor	7,261.21	N

Figura 3.9 Configuración de pala 81% de índice de solidez y 44% de posición radial

La figura 3.9 muestra la configuración de pala del 81% de índice de solidez en un 44% de la posición radial. Esta distribución comprende de los elementos 11 al 24 de los cuales los que contienen Microtabs son los elementos 14, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 23, 24 y los elementos que se encuentran naturales son 17 y 21. Con este diseño se obtiene una Fuerza Axial de 7,261.21 N.

METODO DEL MOMENTUM DEL ELEMENTO ALABE (BEM)		
DATOS	CANTIDAD	UNIDAD
Diámetro del rotor	18.000	m
Número de aspas	3.000	
Valor inicial α	0.300	
Valor inicial α'	0.010	
Angulo de ataque	7.000	°
Velocidad típica	6.800	
Diámetro de la nariz	1.260	m
Número de elementos álabe	25.000	
Densidad del aire	1.020	kg/m ³
Velocidad del viento de diseño (Clase III)	10.50	m/s
Factor de escalamiento de cuerda	4.600	
Factor de Pérdidas	0.800	
Longitud del álabe	8.370	m
Velocidad angular NOMINAL del rotor	7.933	rad/s
Velocidad angular NOMINAL del rotor	75.758	rev/min
RESULTADOS		
Potencia del rotor	41,383.34	W
Fuerza axial en el rotor	7,483.67	N

Figura 3.10 Configuración de pala 72% de índice de solidez y 44% de posición radial

De la programación de la pala dividida en 25 elementos, la figura 3.10 muestra la configuración de la pala del 72% de índice de solidez en 44% de posición radial. Se trabajaron los elementos 14, 15, 17, 18, 20, 21, 23 y 24 con Microtab y los elementos 16, 19 y 22 se trabajaron sin el mismo. Esta configuración representa una fuerza axial de 7,483.67 N.

La tercera configuración es una pala dividida en 31 elementos, en donde se trabajaron los elementos comprendidos del 20 al 30 equivalentes a un 35% de posición radial de igual forma medidos al 72%, 81% y 100% de índice de solidez con micropestañas.

METODO DEL MOMENTUM DEL ELEMENTO ALABE (BEM)		
DATOS	CANTIDAD	UNIDAD
Diámetro del rotor	18.000	m
Número de aspas	3.000	
Valor inicial α	0.300	
Valor inicial α'	0.010	
Angulo de ataque	7.000	°
Velocidad típica	6.800	
Diámetro de la nariz	1.260	m
Número de elementos álabe	31.000	
Densidad del aire	1.020	kg/m ³
Velocidad del viento de diseño (Clase III)	10.50	m/s
Factor de escalamiento de cuerda	4.600	
Factor de Pérdidas	0.800	
RESULTADOS		
Longitud del álabe	8.370	m
Velocidad angular NOMINAL del rotor	7.933	rad/s
Velocidad angular NOMINAL del rotor	75.758	rev/min
Potencia del rotor	37,250.88	W
Fuerza axial en el rotor	7,060.57	N

Figura 3.11 Configuración de pala 100% de índice de solidez y 35% de posición radial

La figura 3.11 muestra la configuración de pala del 100% de índice de solidez y 35% de posición radial, en la que los 11 elementos contienen Microtab y se obtiene una Fuerza Axial de 7,060.57.

METODO DEL MOMENTUM DEL ELEMENTO ALABE (BEM)		
DATOS	CANTIDAD	UNIDAD
Diámetro del rotor	18.000	m
Número de aspas	3.000	
Valor inicial α	0.300	
Valor inicial α'	0.010	
Angulo de ataque	7.000	°
Velocidad típica	6.800	
Diámetro de la nariz	1.260	m
Número de elementos álabe	31.000	
Densidad del aire	1.020	kg/m ³
Velocidad del viento de diseño (Clase III)	10.50	m/s
Factor de escalamiento de cuerda	4.600	
Factor de Pérdidas	0.800	
Longitud del álabe	8.370	m
Velocidad angular NOMINAL del rotor	7.933	rad/s
Velocidad angular NOMINAL del rotor	75.758	rev/min
RESULTADOS		
Potencia del rotor	41,125.46	W
Fuerza axial en el rotor	7,439.50	N

Figura 3.12 Configuración de pala 81% de índice de solidez y 35% de posición radial

La figura 3.12 representa la configuración de pala del 81% de índice de solidez y 35% de posición radial en las que se trabajó con los elementos comprendidos del 20 al 30 de los cuales los elementos 20, 21, 22, 24, 25, 26, 28, 29, 30 contienen Microtab y los elementos 23 y 27 se trabajaron naturales. Al tener esta distribución de pala se obtiene una fuerza axial de 7,439.50 N.

METODO DEL MOMENTUM DEL ELEMENTO ALABE (BEM)		
DATOS	CANTIDAD	UNIDAD
Diámetro del rotor	18.000	m
Número de aspas	3.000	
Valor inicial α	0.300	
Valor inicial α'	0.010	
Angulo de ataque	7.000	°
Velocidad típica	6.800	
Diámetro de la nariz	1.260	m
Número de elementos álabe	31.000	
Densidad del aire	1.020	kg/m ³
Velocidad del viento de diseño (Clase III)	10.50	m/s
Factor de escalamiento de cuerda	4.600	
Factor de Pérdidas	0.800	
Longitud del álabe	8.370	m
Velocidad angular NOMINAL del rotor	7.933	rad/s
Velocidad angular NOMINAL del rotor	75.758	rev/min
RESULTADOS		
Potencia del rotor	43,083.03	W
Fuerza axial en el rotor	7,627.97	N

Figura 3.13 Configuración de pala 72% de índice de solidez y 35% de posición radial

En la figura 3.13 se muestra la configuración de pala del 72% de índice de solidez en un 35% de posición radial en la cual se trabajaron los elementos del 20 al 30 siendo los elementos 20, 21, 23, 24, 26, 27, 29, 30 los que cuentan con el Microtab y los elementos 22, 25 y 28 sin Microtab. Con esta configuración de pala se obtiene un resultado de fuerza axial de 7,627.97 N.

Estos diseños de pala se van a estudiar en el programa de Minitab para estimar eficientemente los términos de primer y segundo orden y modelar la variable de respuesta con curvatura al agregar puntos centrales y axiales a un diseño factorial. Para esto se necesita el diseño de dos puntos centrales más, es decir, dos corridas en el centro que permitan modelar la variable de respuesta con curvatura.

Para ello se realizaron dos programaciones del método BEM en Excel extra que comprende la división de la pala en más elementos. Una programación es la

división de la pala en 34 elementos de los cuales se estudiaron del elemento 19 al 33, en esta configuración los elementos que contienen Microtab son 19, 20, 21, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 31, 32, 33 y los elementos que se presentan sin Microtab son 22, 26 y 30. Este diseño da una fuerza axial de 7,290.86 N, cumpliendo con la configuración del punto central de 81% de índice de solidez y 44% de posición radial como se muestra en la figura 3.14.

METODO DEL MOMENTUM DEL ELEMENTO ALABE (BEM)		
DATOS	CANTIDAD	UNIDAD
Diámetro del rotor	18.000	m
Número de aspas	3.000	
Valor inicial a	0.300	
Valor inicial a'	0.010	
Angulo de ataque	7.000	°
Velocidad típica	6.800	
Diámetro de la nariz	1.260	m
Número de elementos álabe	34.000	
Densidad del aire	1.020	kg/m ³
Velocidad del viento de diseño (Clase III)	10.50	m/s
Factor de escalamiento de cuerda	4.600	
Factor de Pérdidas	0.800	
Longitud del álabe	8.370	m
Velocidad angular NOMINAL del rotor	7.933	rad/s
Velocidad angular NOMINAL del rotor	75.758	rev/min
RESULTADOS		
Potencia del rotor	39,177.63	W
Fuerza axial en el rotor	7,290.86	N

Figura 3.14 Configuración de pala 81% de índice de solidez y 44% de posición radial-segundo punto central

METODO DEL MOMENTUM DEL ELEMENTO ALABE (BEM)		
DATOS	CANTIDAD	UNIDAD
Diámetro del rotor	18.000	m
Número de aspas	3.000	
Valor inicial α	0.300	
Valor inicial α'	0.010	
Angulo de ataque	7.000	°
Velocidad típica	6.800	
Diámetro de la nariz	1.260	m
Número de elementos álabe	52.000	
Densidad del aire	1.020	kg/m ³
Velocidad del viento de diseño (Clase III)	10.50	m/s
Factor de escalamiento de cuerda	4.600	
Factor de Pérdidas	0.800	
Longitud del álabe	8.370	m
Velocidad angular NOMINAL del rotor	7.933	rad/s
Velocidad angular NOMINAL del rotor	75.758	rev/min
RESULTADOS		
Potencia del rotor	38,489.94	W
Fuerza axial en el rotor	7,130.20	N

Figura 3.15 Configuración de pala 81% de índice de solidez y 44% de posición radial-tercer punto central

La segunda programación que corresponde al punto central de 81% de índice de solidez y al 44% de posición radial está conformada por 52 elementos de los cuáles 23 elementos son los estudiados, 5 se encuentran sin Microtab y 18 con Microtab. Esta configuración de pala permite obtener una fuerza axial de 7,130.20 N, como se muestra en la figura 3.15.

Con estas configuraciones se obtuvieron 9 fuerzas axiales diferentes las cuales se estudiaron en el programa de Minitab 17 que se explicará a continuación.

3.2 CREACIÓN DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Con base en las fuerzas axiales que se determinaron se procedió a realizar un diseño de experimentos en la hoja de trabajo del programa Minitab 17, se eligió el diseño de Superficie de respuesta y con este un diseño compuesto central ya que se busca encontrar la configuración de pala que resulte una menor fuerza axial siguiendo el objetivo de la máxima reducción de cargas. Al crear un diseño de superficie de respuesta se escogieron el número de factores que se utilizaron en el diseño, para este estudio se escogieron 2, correspondientes al índice de solidez y la posición radial.

Una vez elegidos los factores se escogió el diseño, el cual fue un diseño compuesto central centrado en la cara de 2 factores con 3 niveles y 3 puntos en el centro como se muestra en la figura. Posterior a ello se analizan los datos para obtener los resultados deseados que se muestran en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Una vez que se obtuvo cada una de las Fuerzas Axiales del Método del Elemento de Pala, se realizó el Diseño de Experimentos en el cual se muestran los efectos e interacciones y el error estándar de cada uno de los efectos que mide el error de muestreo.

Este análisis muestra la significancia estadística de cada efecto comparando el cuadrado medio de cada factor contra el cuadrado medio del error experimental. El efecto que tiene el valor de P (nivel de significancia) inferior a 0.05 muestran que son significativamente diferentes de cero en el nivel de confianza del 95%, es decir el efecto de estos valores sobre la Fuerza Axial son significativamente importantes. Los valores de p mayores a 0.05 muestran que no hay efecto significativo sobre la Fuerza Axial. El estadístico R-Cuadrado indica que el modelo representa 98.46% de la variabilidad del análisis.

De este análisis es importante mostrar la ecuación de regresión que ha sido ajustada a los datos, la cual se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} \text{Fuerza Axial} = & 7234.5 - 334.7 \text{ Posición Radial} - 221.0 \text{ Índice de solidez} \\ & - 94.7 \text{ Posición Radial} * \text{Posición Radial} \\ & - 16.3 \text{ Índice de solidez} * \text{Índice de solidez} \\ & - 51.6 \text{ Posición Radial} * \text{Índice de solidez} \end{aligned}$$

El análisis completo en Minitab se aprecia a continuación.

Response Surface Regression: Fuerza Axial versus Posición Radial, Índice de solidez

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	1003173	200635	64.12	0.000
Linear	2	965070	482535	154.22	0.000
Posición Radial	1	672010	672010	214.77	0.000
Índice de solidez	1	293060	293060	93.66	0.000
Square	2	27443	13721	4.39	0.079
Posición Radial*Posición Radial	1	22730	22730	7.26	0.043
Índice de solidez*Índice de solidez	1	674	674	0.22	0.662
2-Way Interaction	1	10660	10660	3.41	0.124
Posición Radial*Índice de solidez	1	10660	10660	3.41	0.124
Error	5	15645	3129		
Lack-of-Fit	3	1027	342	0.05	0.983
Pure Error	2	14618	7309		
Total	10	1018818			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
55.9371	98.46%	96.93%	96.56%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		7234.5	28.7	252.11	0.000	
Posición Radial	-669.3	-334.7	22.8	-14.66	0.000	1.00
Índice de solidez	-442.0	-221.0	22.8	-9.68	0.000	1.00
Posición Radial*Posición Radial	-189.4	-94.7	35.1	-2.70	0.043	1.08
Índice de solidez*Índice de solidez	-32.6	-16.3	35.1	-0.46	0.662	1.08
Posición Radial*Índice de solidez	-103.2	-51.6	28.0	-1.85	0.124	1.00

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \text{Fuerza Axial} = & 7234.5 - 334.7 \text{ Posición Radial} - 221.0 \text{ Índice de solidez} \\ & - 94.7 \text{ Posición Radial*Posición Radial} \\ & - 16.3 \text{ Índice de solidez*Índice de solidez} \\ & - 51.6 \text{ Posición Radial*Índice de solidez} \end{aligned}$$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	Fuerza Axial	Fit	Resid	Std Resid
11	7130.2	7234.5	-104.3	-2.17 R

R Large residual

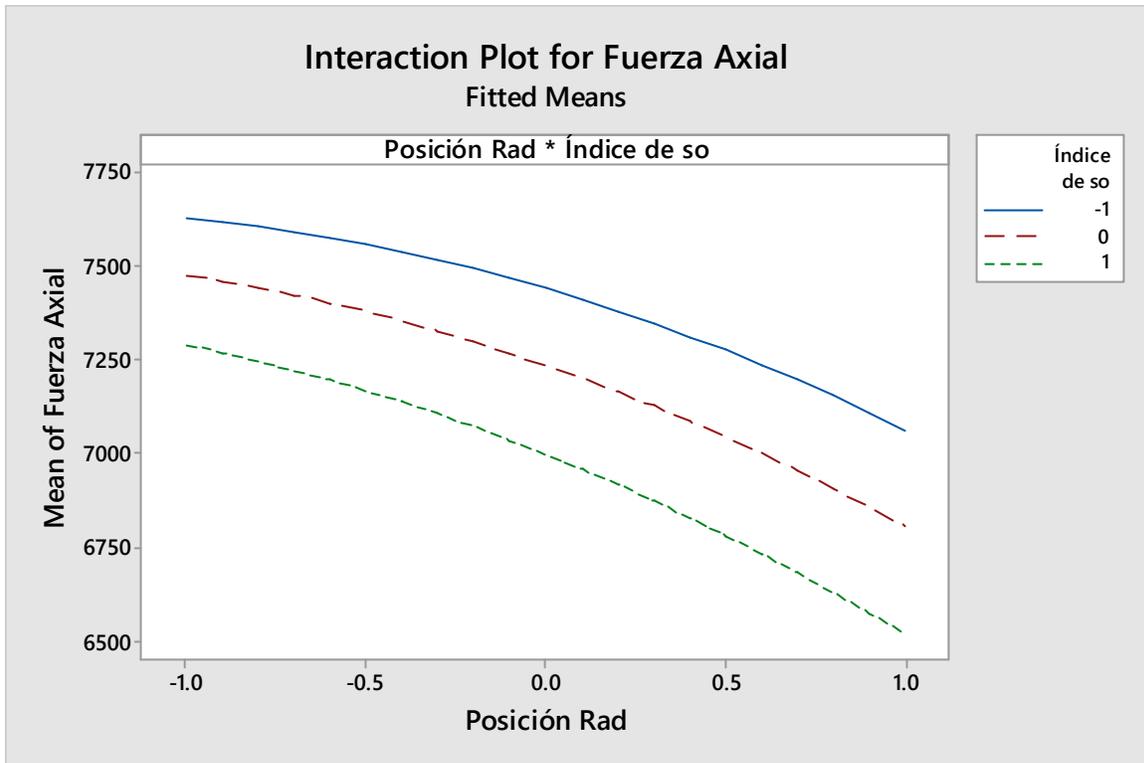


Figura 4.1 Efecto de las interacciones de los principales factores para la Fuerza Axial

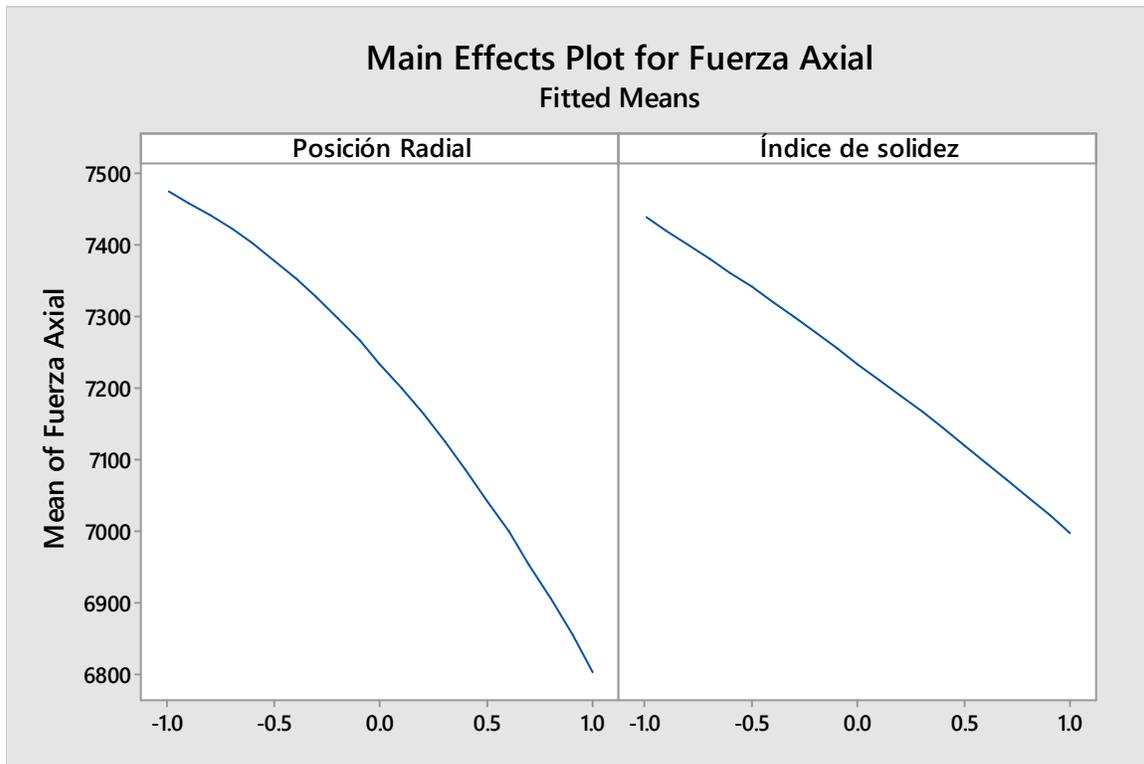


Figura 4.2 Efectos de principales factores para la Fuerza Axial

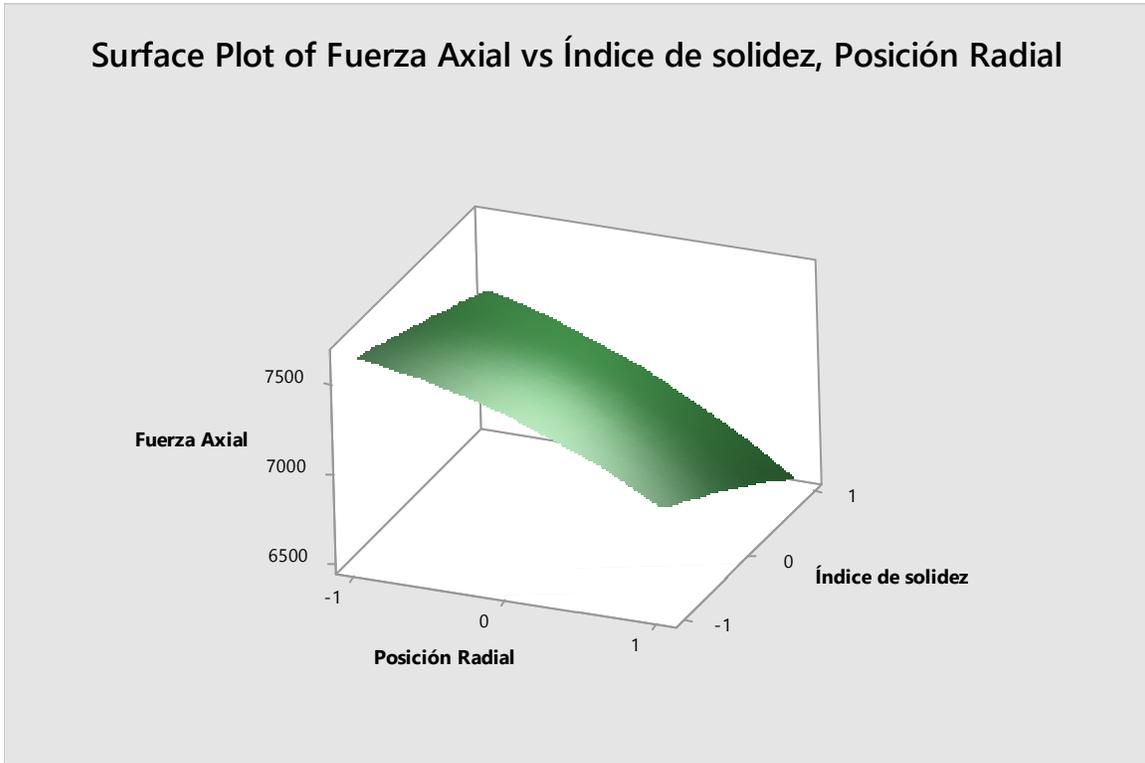


Figura 4.3 Interacciones de los principales factores para la Fuerza Axial

Como el objetivo de este estudio es encontrar la máxima reducción de cargas, es decir la mínima fuerza axial con Microtabs, se procede a realizar una optimización para encontrar el objeto de estudio. A continuación se muestra el análisis de la optimización en Minitab.

Response Optimization: Fuerza Axial

Parameters

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Fuerza Axial	Minimum		6505.08	7627.97	1	1

Solution

Solution	Posición Radial	Índice de solidez	Fuerza Axial Fit	Composite Desirability
1	1	1	6516.14	0.990152

Multiple Response Prediction

Variable Setting
 Posición Radial 1
 Índice de solidez 1

Response Fit SE Fit 95% CI 95% PI
 Fuerza Axial 6516.1 49.8 (6388.0, 6644.3) (6323.6, 6708.7)

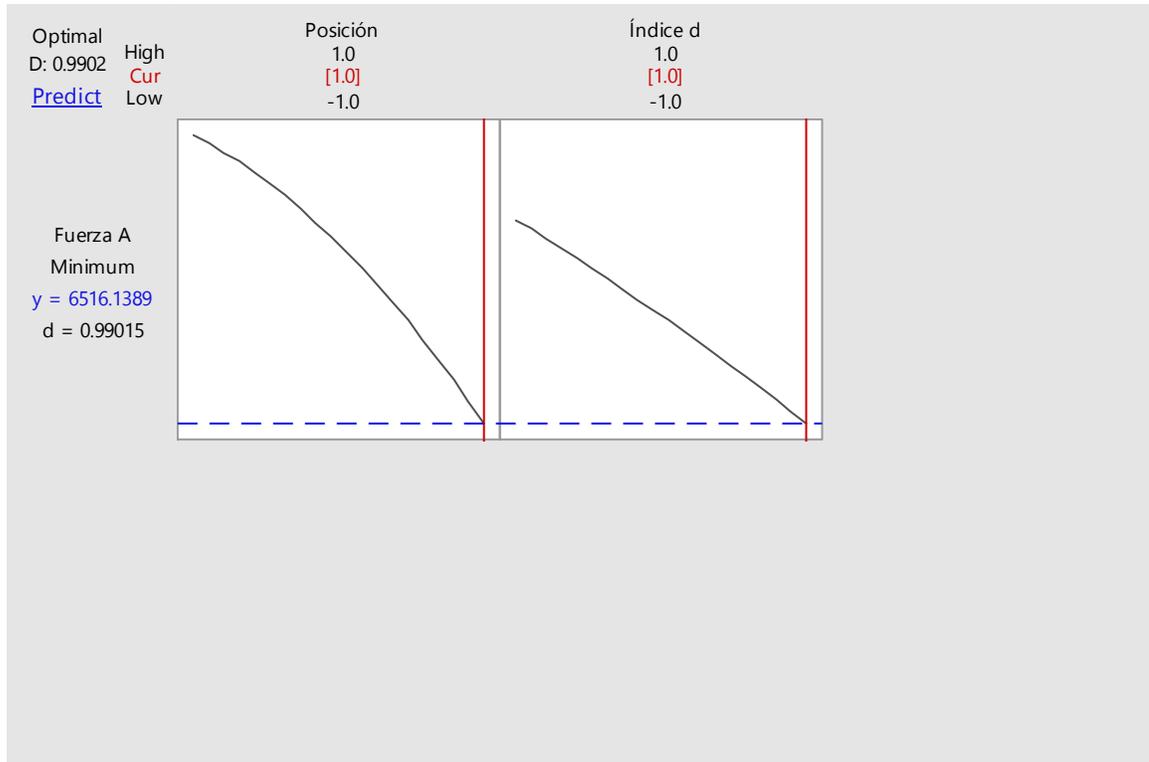


Figura 4.4 Resultado óptimo para minimizar la Fuerza Axial con Microtabs

En la Figura 4.4 se aprecia claramente cuál es la configuración de pala óptima que muestra la máxima reducción de cargas, es decir la mínima Fuerza Axial resultante al usar Microtabs como sistema de control de cargas en una turbina eólica se obtiene con la configuración de pala (1), (1) en Minitab es decir los porcentajes 100% de Índice de solidez con el 55% de la Posición Radial, como lo muestra la tabla 4.1.

Índice de Solidez (%)	Posición Radial (%)	Fuerza Axial (N)
100%	55%	6,505.08N
81%	55%	7,017.95N
72%	55%	7,278.98N
100%	44%	6,816.96N
81%	44%	7,261.21N
72%	44%	7,483.67N
100%	35%	7,060.57N
81%	35%	7,439.50N
72%	35%	7,627.97N
81%	44%	7,290.86N
81%	44%	7,130.20N

Tabla 4.1 Resultados de las Fuerzas Axiales con Microtabs obtenida del BEM

La fuerza Axial sin Microtabs para una pala de 9m es de 9,345.08 N. lo que da como resultado una reducción del 30% de Fuerza Axial, es decir se reduce la Fuerza Axial en un 30% cuando se utiliza Microtabs en las palas aerodinámicas.

Fuerza Axial (N) Sin Microtab
9,345.08 N

Tabla 4.2 Fuerza Axial sin Microtab

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un estudio para saber cuál era la mejor configuración de pala que pudiera reducir las cargas aerodinámicas con el objetivo de salvaguardar una turbina eólica y darle más tiempo de vida.

Se realizó la evaluación de los microtabs para el diseño de una pala de 9 metros basada en la distribución de perfiles de las familias DU y NACA. La implementación de los microtabs con fines de control activo en la pala de 9 metros se evaluó a lo largo de la sección de 4.275m a 8.325m que equivalen a los elementos 9-19 del Método del Elemento de Pala.

Se eligieron dos factores con tres niveles cada uno, los cuales son la posición radial al 35%, 44% y 55% y el índice de solidez al 72%, 81% y 100%. Estos factores fueron estudiados en un Diseño de Superficie de Respuesta Centrado en la Cara de 2 factores con 3 niveles y 3 puntos en el centro mediante las combinaciones de las fuerzas axiales resultantes del Método del Elemento de Pala (BEM).

La mejor configuración de pala para el estudio, resultó de colocar los microtabs en un 55% de posición radial a un 100% de índice de solidez (4.275m a 8.325m) dando una Fuerza Axial de 6,505.08 N. Con este resultado se puede concluir que entre más sea el porcentaje del índice de solidez, mayor es la efectividad de los microtabs para la reducción de cargas.

Con este estudio se comprobó que el uso de los microtabs como sistema de control de carga en las turbinas eólicas ayuda en la reducción de cargas reduciendo un 30% la Fuerza Axial al colocar microtabs en las palas aerodinámicas.

Al obtener una reducción de cargas en un 30% se demuestra que los microtabs son viables para salvaguardar un aerogenerador, ya que cumplen su función de reducir cargas cuando la velocidad de la turbina eólica está por encima de la velocidad de diseño.

Los resultados de las simulaciones y análisis presentados, permiten concluir que la hipótesis planteada como solución al problema de investigación presentado al inicio de este trabajo se cumplió satisfactoriamente. Es decir se logró comprobar que el uso de las micropestañas en las palas aerodinámicas son efectivas en un 30%.

Como trabajos futuros se propone realizar experimentación con micropestañas, realizar la fabricación de las palas con micropestañas y realizar pruebas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Lins *et al.*, “Reporte de la situación mundial de las energías renovables en 2015,” *REN21 Renew. Energy Policy Netw. 21st century*, vol. 10, p. 32, 2015.
- [2] REN21, “Energías Renovables 2016 - reporte de la situación mundial,” p. 18, 2016.
- [3] A. Plasencia, “Breve introducción a los sistemas de control de los aerogeneradores,” *Inst. Cibernética, Matemáticas y Física (ICIMAF), Agencia Energía Nucl.*, p. 2, 2013.
- [4] AMDEE, “El viento en números,” 2014. [Online]. Available: <http://www.amdee.org/viento-en-numeros>. [Accessed: 12-May-2016].
- [5] R. H. R. Garduño, A. A. Rodríguez, M. Sánchez, M. A. Martínez, M. A. Hernández, I. X. Alcaide, V. G. Re, “Investigación, desarrollo e inovacion tecnológica de sistemas de control de aerogeneradores,” *Divulgación IIE*, pp. 47–55, 2012.
- [6] “Regiones mexicanas con la mayor capacidad de generación de energía eólica,” 2014. [Online]. Available: <http://www.travelbymexico.com/blog/15578-la-energia-eolica-esta-cobrandoaugue-en-mexico/>. [Accessed: 16-May-2016].
- [7] S. J. Johnson and D. E. Berg, “Active Load Control Techniques for Wind Turbines,” *Contract*, no. August, pp. 1–132, 2008.
- [8] D. E. Berg, J. R. Zayas, D. W. Lobitz, and J. P. Baker, “FEDSM2007-37604,” pp. 1–10, 2007.
- [9] C. P. Van Dam, D. Y. Nakafuji, C. Bauer, K. Standish, and D. Chao, “Computational Design and Analysis of a Microtab Based Aerodynamic Loads Control System for Lifting Surfaces,” pp. 28–39, 2003.
- [10] A. M. Cooperman, R. Chow, S. J. Johnson, and C. P. Van Dam, “Experimental and Computational Analysis of a Wind,” *AIAA Aerosp. Sci. Meet. Incl. New Horizons Forum Aerosp. Expo.*, pp. 1–7, 2011.
- [11] D. Senosiain and J. Morales, “Experimental Study Of Microtabs in Smart

Blades for Wind Turbine,” 2013.

- [12] T. Macquart, A. Maheri, and K. Busawon, “Microtab dynamic modelling for wind turbine blade load rejection,” *Renew. Energy*, vol. 64, pp. 144–152, 2014.
- [13] T. Macquart and A. Maheri, “Integrated aeroelastic and control analysis of wind turbine blades equipped with microtabs,” *Renew. Energy*, vol. 75, pp. 102–114, 2015.
- [14] “Frontier Wind: Active Load Management System.” [Online]. Available: <http://www.frontierwind.com/>. [Accessed: 05-May-2017].
- [15] M. Á. Muñoz, “1.2 PRINCIPIOS AERODINAMICOS.” [Online]. Available: <http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV12.html>. [Accessed: 10-May-2017].
- [16] S. J. Johnson, C. Van Dam, and D. E. Berg, “Active Load Control Techniques for Wind Turbines,” 2008.
- [17] G. Muñoz, S. Ledesma, and M. Lara, “Desarrollo del modelo aerodinámico para la incorporación de los Microtabs en la parte interna de los perfiles de la pala.”
- [18] M. O. L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*. London: EARTHSCAN, 2008.
- [19] G. Ingram, “Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method. Version 1.1,” *October*, no. c, pp. 1–21, 2011.
- [20] D. C. Montgomery, “Diseño y Análisis de Experimentos.” .