

## **ANÁLISIS DE DURABILIDAD DEL ÁLABE DE UN GENERADOR EÓLICO**

Ricardo Flores Almazán, Manuel López Zamacona, Allan Burke Veliz\*

ITESM Campus Toluca, CIMA (Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz)

Av. Eduardo Monroy Cárdenas No. 2000, Col. San Antonio Buenavista. C.P. 50110

\*Tel (722) 279-9990. Extensión 2165, Fax (722) 274-1178, [allan.burke@itesm.mx](mailto:allan.burke@itesm.mx)

La generación de energía eléctrica por medio de la fuerza del viento constituye una de las prácticas reales en lo referente a energías alternativas. Basados en un estudio meteorológico en la ciudad de Toluca, fue posible modelar las condiciones de servicio a las que se expondrá un generador eólico constituido por álabes de fibra de vidrio y discos sujetadores en acero, y a partir de ello estimar su vida útil a través de un estudio de durabilidad. La utilización de materiales compuestos, particularmente fibras reforzadas con resinas, brinda una solución confiable para componentes sometidos a cargas cíclicas de larga duración. Con los factores considerados en el análisis, la estimación de durabilidad del conjunto de álabes y platos sujetadores superó los 20 años de servicio antes de sufrir una falla por fatiga. En el presente estudio, se detalla la metodología utilizada así como los resultados obtenidos.

## **1.- Introducción**

La situación ambiental por la que atraviesa nuestro planeta y la progresiva extinción que enfrentan las principales fuentes de recursos energéticos en el mundo, han direccionado los estudios de ingeniería hacia el desarrollo de fuentes alternas de energía, siendo una de ellas la energía eólica. La fuerza del viento es aprovechada mediante la instalación de generadores que son capaces de transformar la energía eólica en energía mecánica de rotación, ya sea para accionar directamente una máquina o para la producción de energía eléctrica. Su principal característica se fundamenta en ser una fuente de energía segura y renovable sin consecuencias negativas para el medio ambiente. Dicha conversión de energía se logra a partir del movimiento de un álabe (pala curva), que a su vez, hace girar un sistema mecánico constituido por un alternador, el cual produce energía eléctrica. Debido al flujo de aire que pasa a través de los álabes, estos son sometidos a cargas cíclicas durante periodos prolongados; por ello se torna muy importante garantizar su correcto desempeño desde su diseño, a través de un análisis estructural. De acuerdo a varios autores, el diseño de los álabes es parte fundamental para que un generador eólico sea eficiente, ya que su forma aerodinámica es la que proporciona al rotor, el par de arranque necesario para la generación de energía. Un antecedente sobresaliente es el trabajo del diseñador Hugh Piggott, “Windpower Workshop” [1], publicada por el Centro de Tecnología Alternativa, en la cual se plantean las instrucciones detalladas para la construcción de máquinas de viento de bajo costo.

De la misma manera, es importante mencionar el trabajo de Wright y Wood [2], donde enfatizan que la mayor parte del torque de arranque de una turbina eólica se genera cerca del cubo donde se sujetan los álabes, mientras que el mayor par de potencia viene de la punta del mismo álabe. También se menciona que el torque resistivo se incrementa, en relación al torque total, a medida que se reduce el tamaño de la turbina, por lo cual se encuentra razonable que las “micro” turbinas usadas en yates, por ejemplo, estén construidas con una gran cantidad de álabes [2].

En referencia a materiales compuestos como la fibra de vidrio reforzada, Sakin y Yaman [3] observaron en sus experimentos, que la propiedad de anisotropía (factor no considerado en el presente estudio) es dominante en la resistencia a la fatiga. En sus estudios observaron que los parámetros que definen las propiedades de este tipo de materiales son la densidad de la distribución de la fibra, el ángulo de la fibra y la permeabilidad de la fibra tejida a la resina. Su trabajo también muestra que los materiales compuestos por fibra de vidrio reforzada son usados en lugar de materiales metálicos por su baja densidad y por su alta resistencia y rigidez [3]; condiciones que han motivado la generación de metodologías especializadas en este tipo de materiales.

En las aplicaciones reales de ingeniería es difícil encontrar componentes o estructuras sometidas a cargas totalmente estáticas. Comúnmente son sistemas interactuando con cargas cíclicas, traducándose en fatiga de los componentes y provocando inclusive la ruptura. Es posible resaltar que entre el 80% y 95% de las fallas estructurales ocurren a través de un mecanismo de fatiga [4]. Por ello se torna relevante llevar a cabo un análisis de fatiga para validar o rechazar el diseño y la manufactura de un componente como parte fundamental del desarrollo de un producto. Entre más a tiempo se realice un análisis de fatiga a un componente durante su proceso de diseño, mayores serán los beneficios obtenidos: tanto económicos como de seguridad.

El desarrollo del presente documento se focaliza en el análisis estructural del álabe diseñado por Hugh Piggott [1] y manufacturado por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Toluca (ITESM Toluca). Dicho análisis se lleva a cabo mediante modelos matemáticos que proporcionen una estimación confiable de su vida útil, según la carga de trabajo a la que será sometido. Así mismo, se describirá la metodología utilizada y los resultados de los análisis de laboratorio. El principal objetivo, es la evaluación del comportamiento del álabe de un generador eólico sometido a cargas de servicio, en función de su durabilidad. Al finalizar el documento, se entregarán los resultados de los experimentos realizados en el laboratorio, así como la metodología para estimar su vida útil.

## 2.- Metodología

Parte inicial del experimento fue la manufactura de un álabe con fibra de vidrio y resina MR250. Esta última, una resina poliéster insaturada de excelente humectación con la fibra de vidrio y de bajo nivel de contracción, lo que minimiza la absorción de agua y permite un excelente acabado superficial a un costo inferior que las resinas epóxicas [5].

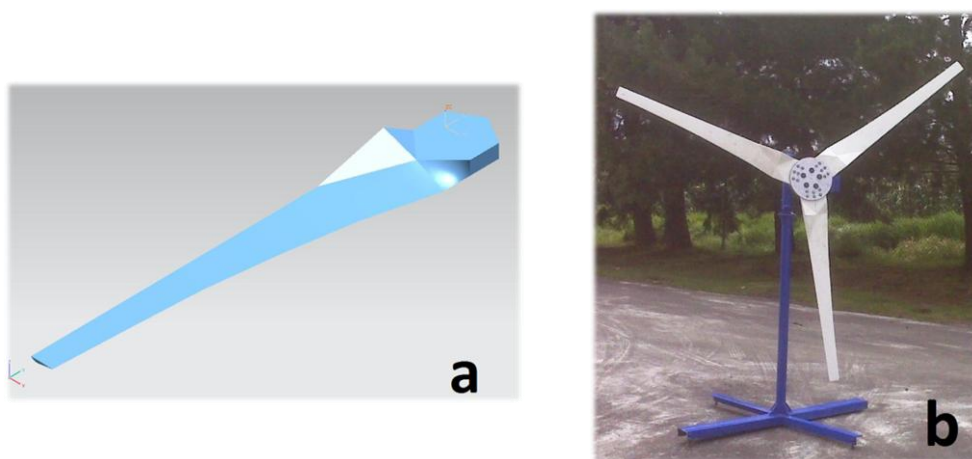


Fig. 1. Vista virtual (a) y real (b) del generador prototipo.

En el ITESM Toluca se encuentra instalada una estación meteorológica Davis 6153 Vantage Pro 2 con transmisión inalámbrica de datos, capaz de medir la velocidad y dirección del viento, así como la intensidad de lluvia y la humedad, entre otras variables. Utilizando los registros de dicha estación, se llevó a cabo el análisis de la velocidad histórica del viento que comprende un rango de 22 días, con frecuencia de muestro de cinco minutos. Dicho registro arrojó la velocidad máxima y el promedio correspondientes a 3504 muestras, para lo cual fue necesario calcular la velocidad mínima y posteriormente obtener un estimado de rpm's para cada uno de los registros.

Como primer punto de la investigación se llevó a cabo un análisis de la dinámica de fluidos computacional o CFD; el cual su principal objetivo fue predecir el comportamiento y reacciones generadas por el flujo del aire a condiciones definidas en interacción con el sistema (álabes-discos). La primera parte del análisis se ocupa de la simplificación, la geometría era el punto de partida, el cual constaba en eliminar finos detalles o elementos

del sistema, que pudieran dificultar el mallado CFD del mismo. Posteriormente, se definió el volumen de control con el programa Catia V5; la cual consta de un cubo de dimensiones (24000mm X 24000mm X 3000mm) (largo-algo-ancho) por el cual el aire fluye del frente del sistema a la parte posterior, éstas dimensiones se consideraron multiplicando las dimensiones del sistema por un factor de 10. Todo esto, debido a que se buscaba que el fluido se estabilizara al paso del sistema. La aplicación de condiciones de frontera en el volumen de control indica la dirección y origen del flujo así como su salida. Después de rediseñar el sistema y la condición de frontera, se prosiguió con la creación de la malla CFD; el elemento usado para crear la malla fue de tipo tetraédrico debido a la complejidad geométrica del álabe y con el objetivo de mejorar la calidad de la solución se utilizaron 5 capas de borde o “boundary layers” alrededor del sistema con un crecimiento entre cada una de ellas con un factor de 1.2 en comparación con la primera capa que tiene como espesor un factor de 1.1; todo esto para dar un total de 400,000 elementos.

El proceso de solución se desarrollo en el programa Fluent de ANSYS teniendo como objetivo la obtención de las presiones estáticas del aire en contacto con los álabes que servirán como condiciones de frontera del modelo estructural. Las propiedades del modelo se definieron tomando en cuenta un flujo laminar debido a que se quería simplificar el modelo y las bajas velocidades simuladas, las propiedades iniciales del flujo de aire se tomaron de acuerdo a las condiciones que tiene la ciudad de Toluca y se muestran en la Tabla 1.

Condiciones de la ciudad de Toluca, México	
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	.9062
Calor Específico (j/kg-k)	1006.43
Conductividad Térmica (w/m-k)	.0242
Viscosidad (kg/m-s)	1.7894e-05
Velocidad	5, 10 y 15 m/s

Tabla 1. Propiedades del flujo de aire de acuerdo a condiciones de la ciudad de Toluca.

Al proceso numérico de solución del modelo le tomó 1000 iteraciones alcanzar convergencia todo esto en un tiempo aproximado de 12 horas. La geometría del modelo analizado fue alterada para simplificar las tareas de mallado, en específico las perforaciones en el disco y los tornillos de sujeción.

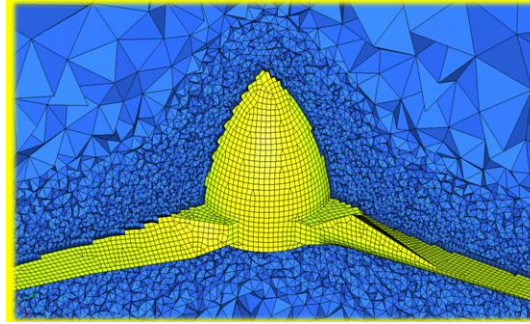


Fig. 2. Mallado CFD para sistema (álabes-discos), Azul (Superficie de Control), Amarillo (Paredes Álabes).

Como se mencionó inicialmente, el álabe fue construido a base de fibra de vidrio y resina MR250, mientras que los discos sujetadores están fabricados en acero. Al efectuar un análisis a fatiga o de durabilidad se debe proporcionar información específica como las propiedades a fatiga de los materiales, la variación de las cargas a fatiga y la definición de modelos matemáticos que se ven involucrados. En la siguiente figura se muestran las propiedades de dichos materiales:

<i>Propiedades</i>	<i>Acero</i>	<i>Resina MR250</i>
<b>Modulo de Young</b>	205 Gpa [5]	9.5 Gpa [5]
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0.285 [5]	0.34 [5]
<b>Densidad</b>	7850 kg/m3 [5]	110 kg/m3 [5]
<b>SR1</b>	1.82E+09 [6]	5.00E+07 [6]
<b>B1</b>	-0.133858 [6]	-0.043 [6]
<b>NC1</b>	1.00E+06 [6]	1.00E+11 [6]
<b>FL</b>	2.86E+08 [6]	1.86E+07 [6]

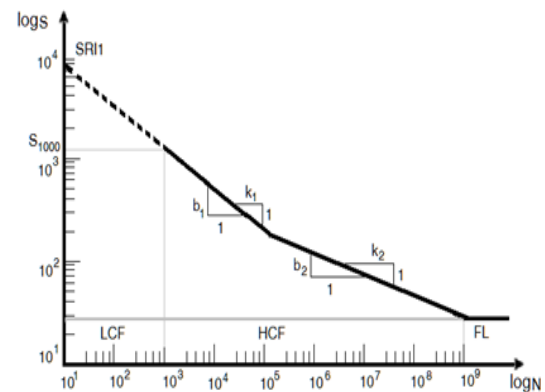


Fig. 3. Curva SN [6].

Basados en el modelo geométrico del álabe en tres dimensiones, se continúa con el mallado del componente en una plataforma para Análisis de Elemento Finito (FEA, siglas en inglés), Altair Hypermesh v10.0, en la cual se impone gran importancia sobre la construcción de la malla superficial, ya que servirá de base para el análisis estructural y de fluidos.

Es importante analizar la convergencia de esfuerzos en el componente, lo que permite determinar el tamaño ideal del elemento de la malla. Ésta condición es dependiente de las dimensiones y complejidad de la geometría. A partir del modelo lineal se pueden observar los esfuerzos y compararlos entre sí, con el objetivo de conocer el tamaño de elemento con el cual los esfuerzos no difieren en gran medida. Es decir, que se ha alcanzado un tamaño de elemento idóneo para el análisis en términos de precisión numérica y duración.

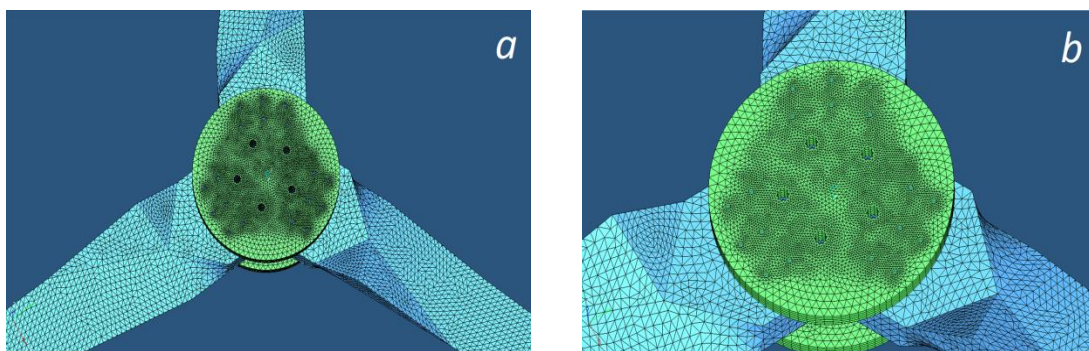


Fig. 4. Malla estructural para simulación estructural de álabes (a) y platos sujetadores (b).

A partir de los datos del viento obtenidos de la estación meteorológica, se estimó la cantidad de revoluciones por minuto a la que gira el generador y las presiones a las que son sometidos los álabes a partir de la obra de Wright y Wood [2] quien trabajó con un sistema de generación similar. Las fuerzas gravitacional y centrípeta generadas también fueron consideradas como factores para el estudio. Basados en los esfuerzos obtenidos en el análisis previo, es posible estimar las condiciones a fatiga y la cantidad de ciclos o la vida a fatiga de los componentes siguiendo la metodología apropiada. La definición de vida a fatiga de un componente se expresa como la falla debido a cargas dinámicas cíclicas; *desde la iniciación y propagación de una grieta hasta la falla final por fractura*. Un análisis de

fatiga permite validar el diseño de un componente o estructura, sometido a las cargas de servicio, en términos de durabilidad. Dicho análisis muestra la cantidad de ciclos de carga que el componente o estructura puede soportar previo al deficiente funcionamiento en términos de seguridad y operación.

El método de vida total es ampliamente usado en aplicaciones de fatiga con ciclos altos. En este caso, el esfuerzo aplicado está dentro del rango elástico del material y el número de ciclos para que el componente falle, es elevado. Usualmente se considera aplicable para vida útil mayor a 100,000 ciclos [4]. El método de tolerancia al daño o crecimiento de grieta es empleado para estructuras con grietas o defectos generados durante su manufactura, para programas predictivos que eviten pruebas de componentes en los cuales las grietas no crecerán y para programas de inspecciones planeadas que aseguren que las revisiones son realizadas con la frecuencia correcta. El método SN es utilizado en problemas de fatiga de vida larga donde existe poca o nula plasticidad, como en los materiales no ferrosos, compuestos, soldaduras y plásticos. Un parámetro de los materiales utilizado como dato de entrada para el estudio de fatiga es la curva esfuerzo vs número de ciclos (SN), ya que muestra la cantidad de ciclos requeridos para que se presente la falla por fatiga, a una determinada amplitud de esfuerzos.

Los siguientes pasos describen la aplicación de la metodología SN en este trabajo:

- 1.- Cálculo del histórico de esfuerzos locales, por medio de un análisis de elemento finito.
- 2.- Cálculo del número de esfuerzos a fatiga, por medio del algoritmo rainflow.
- 3.- Evaluación de la contribución de cada ciclo al daño total.
- 4.- Suma lineal del daño asociado a cada ciclo, usando la regla de Miner.

Para el caso descrito, se creó analíticamente un histórico de cargas que estima los esfuerzos que el componente va a soportar. Solo los valores máximos (picos) y mínimos (valles) muestran relevancia en el análisis. No así, la forma en que varía la tensión o deformación unitaria entre un par pico/valle. Los pares de pico/valle insignificantes se eliminan basados en la tolerancia especificada, para proceder al conteo de ciclos utilizando el método o algoritmo rainflow (así denominado porque gráficamente se asemeja a la lluvia fluyendo por el techo de una pagoda), una de las herramientas para conteo de ciclos más utilizada en



un análisis de vida a fatiga, la cual sigue los ciclos de histéresis de la curva de esfuerzo-deformación. Se basa principalmente en ordenar los datos históricos de manera que la mayor magnitud de esfuerzo sea el primer pico y el último valle, y literalmente permitir que la lluvia fluya respetando ciertas reglas dependientes del punto de inicio del conteo, ya sea pico o valle.

Un caso ideal suele ser que las amplitudes de esfuerzos se presenten dentro de la misma magnitud de esfuerzo medio, sin embargo en los casos reales se tiene que las magnitudes de esfuerzos medidos son únicas para cada amplitud de esfuerzo. Por lo tanto, resulta necesario normalizar dichas magnitudes empleando alguno de los métodos de corrección de esfuerzos medios como son Goodman ó Gerber, entre otros. Para este caso se utilizó el Método de Goodman, el cual es apropiado para materiales frágiles o quebradizos. Para estimar la vida a fatiga a partir de una historia de tensiones o deformaciones, es necesario sumar linealmente el daño asociado a cada ciclo empleando la regla de Miner. Para este paso en concreto, se realiza una reducción de los datos de carga a una secuencia de picos y valles, contando los ciclos y calculando la vida a fatiga.

### **3.- Resultados y discusión**

Los resultados obtenidos a partir de la simulación del viento realizada en Fluent permitieron la estimación de presiones sobre la superficie del álabe. A partir de la distribución de presiones se puede observar que las concentraciones de presión se encuentran cerca del disco.

El histórico de viento permite establecer las condiciones de frontera para el análisis de fatiga. La velocidad a la cual gira el generador determina las cargas asociadas con la fuerza centrípeta y la cantidad de ciclos que afecta a los álabes, similar a una prueba rotativa de flexión en un eje circular. La determinación de la velocidad angular del álabe se realizó a través de los datos obtenidos por Wright y Wood [2] bajo condiciones de viento estable y se asumió que las estimaciones de viento reportadas por la estación meteorológica permanecían suficiente tiempo para alcanzar la velocidad en estado estable. La relación entre viento y velocidad angular se obtuvo a partir de una regresión cuadrática.

El análisis estructural realizado a los 3 casos de carga mostró diferentes distribuciones de esfuerzo. La figura 5 muestra que los distintos casos de carga ocasionan estados de esfuerzo con magnitudes muy distintas, en especial en el caso de la gravedad. Es indispensable recordar que estos tres casos de carga ocurrirán simultáneamente con una magnitud variable y oscilarán de acuerdo al histórico de viento.

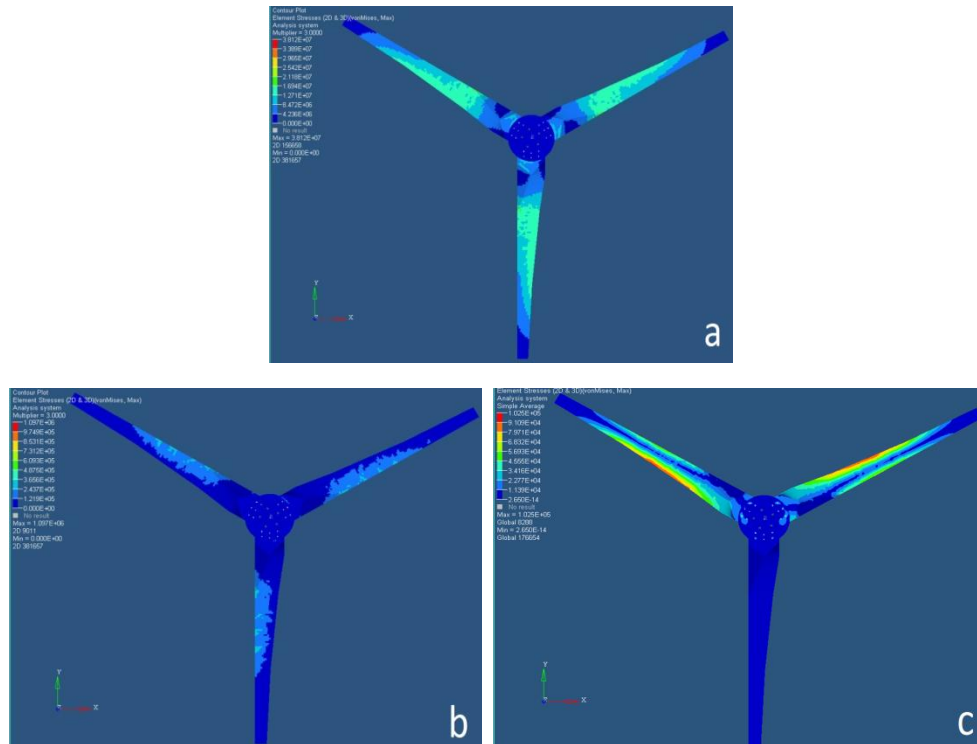


Fig. 5. Caso de carga crítica de fuerza centrípeta (a) presiones (b) y gravedad (c).

El conteo de ciclos de cada uno de los casos de carga se dio a partir del histórico de viento que relaciona la velocidad angular del álabe en relación del viento a través de un álabe y sistema de recolección de energía similar. Las presiones aerodinámicas obtenidas ante vientos a 5 m/s, 10 m/s y 15 m/s mostraron una tendencia próxima a lineal con la velocidad del viento en las zonas de mayor presión. Esta linealidad no permaneció en las áreas de menor presión que tienen una influencia menor. En el análisis estructural, el conteo de ciclos fue realizado a través del sistema de conteo rainflow implementado en Matlab. Dada la propiedad de acumulación del daño lineal, los ciclos contados fueron ordenados por magnitud y se creó un historial de velocidades y presiones dependientes del tiempo. El

intervalo utilizado entre cada muestra fue aproximadamente 0.01 segundos para poder evaluar apropiadamente los efectos de la gravedad sobre el componente a una velocidad de 900 rpm. Los historiales de carga para las presiones, fuerza centrípeta y gravedad se obtuvieron a partir de una cantidad de datos equivalente a 2.2 días manteniendo la proporcionalidad con la muestra obtenida en 22 días.

El daño estimado se muestra en la figura 6 y nos muestra una vida útil aproximada de 3915 ciclos donde el color azul representa el material con menor expectativa de vida. Esto representa que la vida útil aproximada sería de 23 años, lo que nos podría llevar a pensar que el diseño es apropiado para las condiciones analizadas y el costo del sistema.

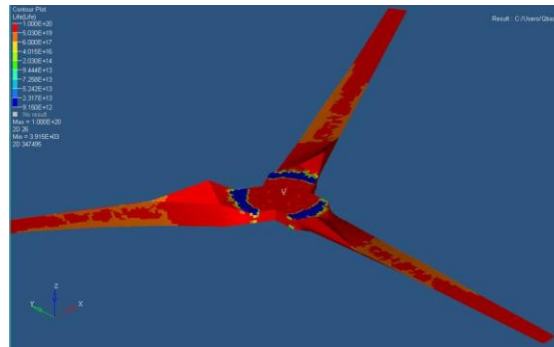


Fig. 6. Simulación del daño.

#### 4.- Conclusiones

El presente trabajo obtuvo las siguientes conclusiones:

- En cuanto al fluido, se realizó un mallado detallado del viento que se ejerce alrededor de los álabes, proporcionando gran confianza sobre los resultados obtenidos.
- En el punto de sujeción entre los discos y el álabe se observan esfuerzos menores al resto del modelo, es decir, más elevados en los propios álabes, lo que los vuelve más susceptibles al daño por el material del cual están contruidos.
- El hecho de haber utilizado el método de Goodman en el análisis de fatiga, promueve la obtención de resultados altamente confiables por ser uno de los métodos de análisis de durabilidad más conservadores.

- Finalmente, es posible concluir que la manufactura de los álabes cumple con la durabilidad esperada, pero resulta pertinente realizar un análisis más profundo para considerar el efecto de las condiciones ambientales sobre los materiales del generador a través del tiempo, tales como la humedad, la exposición a los rayos del sol y los cambios de temperatura.

## **5.- Reconocimientos**

El desarrollo del presente trabajo ha sido posible gracias al apoyo recibido del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el otorgamiento de becas para estudios de posgrado a través del Programa Nacional de Posgrado de Calidad (PNPC).

## **6.- Referencias**

1. **Piggott, H., *Windpower Workshop*. 2003, United Kingdom: Centre for Alternative Technology Publications.**
2. **Wright, A.K. and D.H. Wood, *The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine*. Wind Engineering and industrial Aerodynamics, 2004. 92: p. 1265-1279.**
3. **Sakin, R., I. Ay, and R. Yaman, *An investigation of bending fatigue behavior for glass-fiber reinforced polyester composite materials*. 2006: p. 212-213.**
4. **Pun, A. (2001) *How to predict a fatigue life*.**
5. **Ashby, M.F. and D.R.H. Jones., *Engineering materials 1: an introduction to their properties and applications*. 2nd ed. 1996, Oxford: Butterwoth Heinemann.**
6. **Altair Engineering Inc., *Altair Hypermesh Documentation Files*. 2009.**