

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

En los últimos años, la energía eólica ha experimentado una gran evolución, tanto en lo que se refiere a su expansión, como al desarrollo de nuevos diseños de turbinas. Una tendencia generalizada consiste en el uso de aerogeneradores de tamaño cada vez mayor, no porque esto haga disminuir el coste por kW (del orden de 600EUR por kW de potencia instalada, en el rango de 0.5 a 2 MW) sino porque, ante la escasez de zonas con altos vientos, se consigue un mayor aprovechamiento de los recursos eólicos con grandes máquinas. Este incremento de tamaño (actualmente son comunes turbinas de más de 70 metros de diámetro), tiene asociado un incremento aún mayor en las solicitaciones de los distintos elementos de la turbina (Laméris, 1996; Veers y Butterfield, 2001).

En la mayor parte de los diseños actuales, las palas se fabrican a base de fibra de vidrio en matriz polimérica (poliéster o epoxy). Es bien conocido que uno de los puntos críticos en estructuras de material compuesto es el diseño de las uniones, ya sea entre distintos elementos de material compuesto, o entre piezas de material compuesto y piezas metálicas. Especialmente crítico en el campo de las turbinas eólicas es el sistema de anclaje de cada pala al buje de la máquina (Mayer, 1996), que supone más del 25% del coste total de la pala. Esta unión debe cumplir los siguientes requisitos:

- Posibilidad de ensamblaje/desensamblaje *insitu*.
- Elevada fiabilidad. Dada la responsabilidad de la junta, debe ser posible asegurar que cada una de las juntas manufacturadas cumple las especificaciones del diseño.
- Elevada seguridad. Una vez realizado el ensamblaje de las diferentes partes, debe asegurarse su correcto funcionamiento con el mínimo de paros para la inspección.
- Prolongada vida en servicio. Debe tenerse en cuenta que las turbinas eólicas están siendo actualmente diseñadas para vidas de 20 años, lo que supone más de 2×10^8 ciclos de carga.
- Simplicidad de fabricación y ensamblaje.

Desde los inicios de la explotación comercial de la energía eólica para la generación de electricidad, numerosas soluciones han sido ensayadas para esta unión (Sandberg, 1988). Una de las más exitosas,

cuyo uso se ha extendido entre la mayoría de los fabricantes, es la que se ha venido en llamar T-bolt, que constituye el objeto de la presente Tesis Doctoral.

En la figura 1.1 se puede apreciar una serie de aproximaciones sucesivas al elemento objeto de estudio.

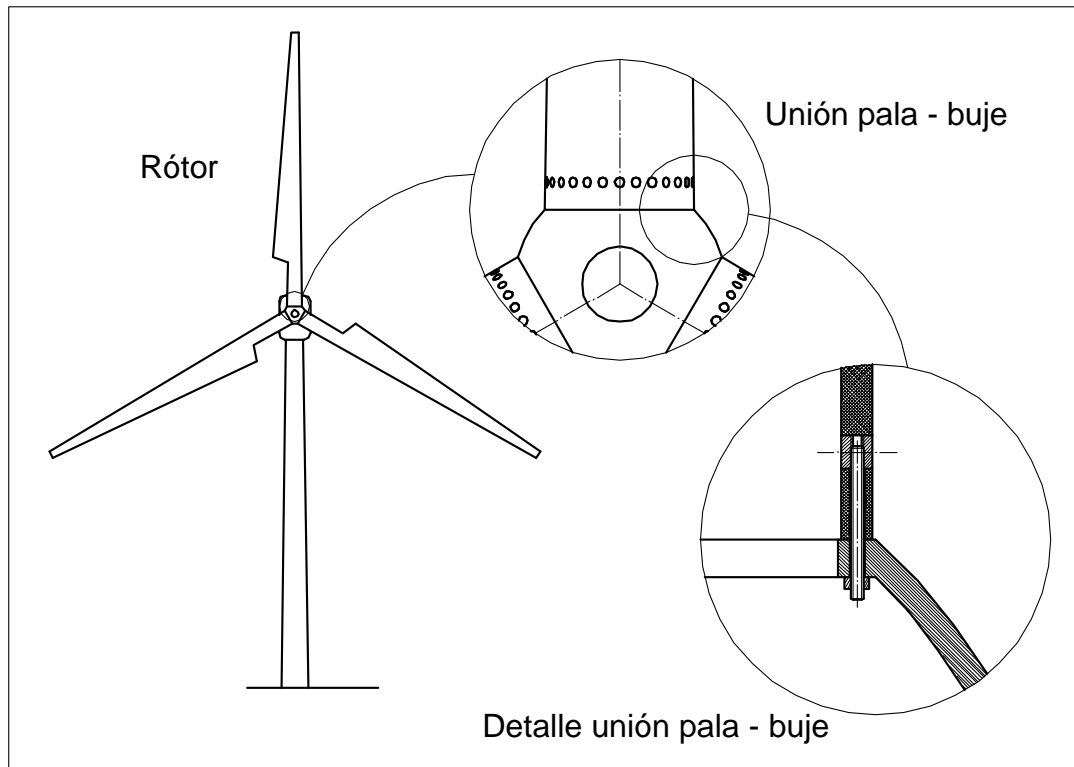


Figura 1.1: T-bolt

1.2 Objetivos

Pese a la creciente utilización de las juntas T-bolt para aplicaciones cada vez más exigentes, existen muy pocos estudios publicados sobre su comportamiento (Kensche y Schultes, 1996; Kensche, 1991; Mayugo *et al.*, 1999; Scherer *et al.*, 1999; Winkelmann, 1992). Esta situación puede parecer extraña si se tiene en cuenta el elevado número de trabajos publicados en el campo de las juntas mecánicas en materiales compuestos (Crews, 1984; Camanho y Matthews, 1997). Sin embargo, la práctica totalidad de estos trabajos se refieren a juntas a solape, bien sea simple o doble.

Las causas de esta ausencia casi total de estudios sobre la T-bolt son muy diversas, si bien se pueden destacar:

- El uso de este tipo de juntas en aplicaciones de elevada responsabilidad estructural (como en el caso de la unión pala-buje) es muy reciente.

- Debido al tipo de material empleado y a la posición cercana al eje de rotación del rotor, se ha preferido, en muchos casos, la utilización de elevados coeficientes de seguridad a la realización de estudios detallados.
- En caso de llevarse a cabo los estudios no se les ha dado difusión, por haberse realizado por parte de empresas privadas y pasar estos a formar parte del *know-how* de las mismas.

Todo ello ha hecho que el diseño de las juntas tipo T-Bolt, en la actualidad, se base en los siguientes principios básicos:

- El cumplimiento de algunos principios generales derivados de los estudios realizados sobre juntas mecánicas a solape.
- El escalado, para diferentes dimensiones de pala, de las geometrías que se han demostrado eficaces en versiones anteriores del diseño.
- El sobredimensionado del laminado de la raíz de la pala, de manera que el vástago actúe como fusible, ya que es el elemento de la junta más fácilmente reemplazable y, al mismo tiempo, el que tiene un comportamiento más fácilmente predecible.
- La validación mediante ensayos en laboratorio de los nuevos diseños.

Debe tenerse en cuenta que la información disponible para las juntas a solape sólo se puede utilizar de forma parcial y cualitativa, ya que existen importantes diferencias entre ambos tipos de junta, entre las cuales cabe citar:

- Se trata de laminados extremadamente gruesos (> 60 mm).
- El agujero necesario para el vástago implica una complicación geométrica muy importante comparado con las juntas a solape.
- Debido también a la presencia de éste agujero, la distribución de esfuerzos en la zona de aplastamiento no es uniforme a lo largo del espesor.
- La pretensión del vástago implica una distribución de esfuerzos totalmente distinta a la que se tendría en uniones mecánicas a solape, ya que en éstas se considera que la carga se introduce por tracción o por compresión, pero nunca simultáneamente por ambos mecanismos.
- En éste tipo de juntas, no se produce el efecto beneficioso de la compresión transversal al laminado (*clamping*), ya que el cilindro queda fijado simplemente al unirle el vástago.

Esta filosofía de diseño, que se ha mostrado válida hasta el momento, presenta importantes limitaciones como son:

- No permite la optimización del laminado de la raíz de la pala, ya que no se tiene suficiente información sobre los distintos modos de fallo del mismo.
- De igual manera, no es posible determinar si nos encontramos ante un diseño con unos márgenes de seguridad equilibrados para los distintos modos de fallo.

- Tampoco es posible conocer donde se encuentra el límite hasta el cual el diseño actual podrá ser explotado satisfactoriamente al aumentar las dimensiones y las solicitaciones de la unión.

Estas limitaciones adquieren mayor importancia a medida que crecen las dimensiones de las turbinas, ya que, además de incrementarse las solicitaciones a las que está sometida la junta, el coste del material supone un porcentaje cada vez mayor del coste total de la pala.

Por todo ello, podemos afirmar que existe un interés real en la mejora del conocimiento del comportamiento mecánico de este tipo de juntas, por lo que el objetivo de la presente Tesis Doctoral se puede definir de forma resumida como: **la caracterización del comportamiento mecánico de las juntas T-bolt, en materiales compuestos, gruesos, de matriz polimérica.**

1.3 Puntos desarrollados en la Tesis

A partir del objetivo definido, el presente estudio se desarrolla en los siguientes puntos:

Análisis de la solución actual: Como ya se ha comentado, a pesar de la ausencia casi absoluta de estudios específicos sobre las juntas T-bolt, este tipo de juntas se está utilizando de manera muy satisfactoria, y desde hace más de 10 años, para la unión pala-buje de multitud de aerogeneradores de distintos fabricantes. Es por ello que, antes de intentar hacer una aportación al conocimiento que se tiene sobre este tipo de juntas, se ha intentado analizar el diseño actual de la misma. Este esfuerzo se puede dividir en dos puntos distintos: el análisis de la T-bolt en relación a otras juntas utilizadas para la unión de la pala al buje, y el análisis de los distintos parámetros de la T-bolt a fin de, principalmente, establecer su influencia en el comportamiento de la junta.

Análisis de las publicaciones sobre juntas mecánicas en materiales compuestos: Como paso previo al análisis de las juntas tipo T-bolt, se ha realizado un repaso exhaustivo de las distintas investigaciones llevadas a cabo hasta la fecha en el campo de las uniones mecánicas en materiales compuestos laminados de matriz polimérica. Se analizan las últimas tendencias en la predicción de la rotura, a fin de establecer los procedimientos que podrían resultar más idóneos para ser adaptados a las juntas T-bolt.

Análisis de tensiones: Como parte indispensable de una caracterización completa de las juntas T-bolt se ha realizado un estudio para la determinación de los estados de tensiones del laminado en las proximidades de la junta. Se ha realizado un análisis tridimensional, con la inclusión de los efectos de contacto. Para la modelización del material, éste se ha considerado como un material ortótropo homogéneo, por lo que las tensiones interlaminares no se han podido determinar. Se ha validado el modelo tanto con los resultados disponibles en la bibliografía (para geometrías más sencillas) como con resultados experimentales. Finalmente se han analizado los estados de esfuerzos y deformaciones de una junta estándar, y se han comparado éstos con los correspondientes a una junta a solape doble de dimensiones equivalentes.

Estudio experimental de rotura: En este apartado se han llevado a cabo una serie de ensayos encaminados a determinar, tanto las cargas, como los modos de rotura de distintas geometrías de probeta. Todos los ensayos se han llevado a cabo con laminados a base de fibra de vidrio y epoxy, si bien se han utilizado dos laminados distintos, tanto por los materiales de base como

por los métodos de fabricación. Se ha intentado, en primer lugar, para los dos sistemas de material ensayado, forzar la rotura del laminado en compresión local i tracción neta, para lo cual se han tenido que utilizar, en algunos casos, soportes especiales que impiden que la rotura se produzca en el vástago antes que en el laminado. En cada uno de los ensayos se ha registrado la curva desplazamiento - carga así como la emisión sonora.

Predicción del fallo: Se ha verificado la posibilidad de realizar la predicción del fallo de la T-bolt a partir de ensayos realizados sobre geometrías más sencillas, utilizando métodos del tipo del *Point Stress*, desarrollado por Whitney y Nuismer (1974) para probetas con agujeros libres y juntas a solape.

Análisis de los resultados y presentación de conclusiones: En este último apartado se analizan los principales resultados obtenidos, se presentan algunas consideraciones de diseño y se marcan posibles vías para investigaciones futuras.