

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 790 390**

51 Int. Cl.:

**F03D 3/06** (2006.01)

**F03D 1/06** (2006.01)

**B29D 99/00** (2010.01)

**B29L 31/08** (2006.01)

**F03D 13/10** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.12.2009 E 17188892 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.04.2020 EP 3276162**

54 Título: **Palas de turbina eólica eficientes, estructuras de pala de turbina eólica, y sistemas y métodos asociados de fabricación, de montaje y de utilización**

30 Prioridad:

**05.12.2008 US 120338 P**

**24.06.2009 US 220187 P**

**17.07.2009 US 271179 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**27.10.2020**

73 Titular/es:

**VESTAS WIND SYSTEMS A/S (100.0%)**

**Hedeager 42**

**8200 Aarhus N, DK**

72 Inventor/es:

**ARENDR, CORY P.;**

**BAKER, MYLES L.;**

**MADRID, BERNARD G. y**

**VILHAUER, SHELDON**

74 Agente/Representante:

**ARIAS SANZ, Juan**

ES 2 790 390 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Palas de turbina eólica eficientes, estructuras de pala de turbina eólica, y sistemas y métodos asociados de fabricación, de montaje y de utilización

### Campo técnico

La presente invención se dirige en general a palas de turbina eólica eficientes y a estructuras de pala de turbina eólica, que incluyen palas de turbina eólica de peso ligero, segmentadas y/o modulares en otra forma, y a sistemas y métodos asociados de fabricación, de montaje y de utilización.

### Antecedentes

Según se convierten los combustibles fósiles en más escasos y más caros de extraer y procesar, los productores de energía y usuarios están cada vez más interesados en otras formas de energía. Una de dichas formas de energía que ha visto recientemente un resurgir es la energía eólica. La energía eólica se recoge típicamente colocando una multitud de turbinas eólicas en áreas geográficas que tienden a experimentar vientos estables, moderados. Las modernas turbinas eólicas incluyen típicamente un generador eléctrico conectado a una o más palas de turbina accionadas por el viento, que giran alrededor de un eje vertical o un eje horizontal.

En general, las palas de turbina eólica más grandes (por ejemplo, más largas) producen energía más eficientemente que las palas más cortas. En consecuencia, hay un deseo de que la industria de palas de turbina eólica fabrique palas tan largas como sea posible. Sin embargo, las palas largas crean varios desafíos. Por ejemplo, las palas largas son pesadas y por lo tanto tienen una cantidad de inercia significativa, que puede reducir la eficiencia con la que las palas producen energía, particularmente en condiciones de viento flojo. Además, las palas largas son difíciles de fabricar y en muchos casos son también difíciles de transportar. En consecuencia, continúa existiendo una necesidad de palas de turbina eólica grandes, eficientes, de peso ligero, y de métodos adecuados para el transporte y montaje de dichas palas.

El documento WO2006/002621 describe una pala de turbina eólica modular en la que los extremos de segmentos de pala tienen una forma dentada. El documento WO2004/078461 describe una conexión entre componentes compuestos con propiedades no compatibles. El documento EP1878915 describe una pala de turbina eólica segmentada en la que las paredes de extremo de secciones de pala están equipadas con elementos de inserción metálicos.

### Sumario de la invención

De acuerdo con la presente invención se proporciona una pala de turbina eólica, que comprende: una superficie aerodinámica externa que tiene un eje en el sentido de la envergadura que se extiende longitudinalmente, un eje en el sentido de la cuerda que se extiende transversal al eje en el sentido de la envergadura, y un eje del grosor que se extiende a través tanto de los ejes en el sentido de la cuerda como en el sentido de la envergadura; y una pluralidad de largueros que se extienden longitudinalmente proporcionando soporte interno para la superficie aerodinámica, en la que al menos uno de los largueros incluye un laminado de material compuesto pre-curado, incluyendo el laminado de material compuesto pre-curado: una pluralidad de capas de compuesto pre-curado apiladas, y una pluralidad de capas adhesivas interpuestas entre capas de compuesto pre-curado adyacentes; y el larguero se ahúsa hacia una parte extrema exterior mediante la finalización de diversas capas de las capas de compuesto pre-curado cuando se aproximan a la parte extrema exterior.

Preferiblemente, cada una de las capas de compuesto pre-curado incluye un producto de resina reforzada por fibra pre-curada. Cada una de las capas de compuesto pre-curado puede incluir una pultrusión de compuesto pre-curado.

La superficie aerodinámica define una sección transversal aerodinámica, y la pluralidad de largueros que se extienden longitudinalmente puede incluir un larguero de presión y un larguero de succión espaciados entre sí a lo largo del eje del grosor, y un larguero posterior espaciado respecto a ambos largueros de presión y de succión a lo largo del eje en el sentido de la cuerda, y en la que cada uno de los largueros de presión, succión y posterior se componen de un laminado de pultrusiones de compuesto pre-curado.

La pala de turbina eólica puede comprender además una pluralidad de cuadernas espaciadas longitudinalmente, y en la que el al menos un larguero se une a las cuadernas.

Una tira puede fijarse circunferencialmente alrededor de la pluralidad de capas de compuesto pre-curado.

La pala de turbina eólica puede comprender además: una pluralidad de cuadernas espaciadas longitudinalmente; y una pluralidad de elementos de fijación de retícula, en la que cada uno de los elementos de fijación de retícula incluye una primera pieza y una segunda pieza correspondiente, en la que cada una de las primeras piezas se fijan a la segunda pieza correspondiente para fijar una parte de las capas de compuesto pre-curado juntas entre las mismas, y en la que al menos una de la primera pieza y la segunda pieza de cada elemento de fijación de retícula se une a una

de las cuadernas espaciadas longitudinalmente.

**Breve descripción de los dibujos**

- 5 La Figura 1 es una ilustración parcialmente esquemática e isométrica de un sistema de turbina eólica que tiene palas configuradas de acuerdo con una realización de la divulgación.
- La Figura 2A es una vista parcialmente esquemática, de alzado lateral de una pala de turbina eólica que tiene una estructura de retícula/no-en-retícula híbrida de acuerdo con una realización de la divulgación.
- 10 La Figura 2B es una ilustración ampliada de una parte de la pala de turbina eólica mostrada en la Figura 2A.
- Las Figuras 2C-2F son ilustraciones en sección transversal esquemática de partes de pala de turbina eólica que tienen estructuras de retícula de acuerdo con varias realizaciones de la divulgación.
- 15 La Figura 3 es una ilustración parcialmente esquemática e isométrica de una parte de una pala de turbina eólica que tiene tres largueros que forman parte de una estructura de retícula de acuerdo con una realización de la divulgación.
- La Figura 4 es una ilustración parcialmente esquemática e isométrica de una parte de una pala de turbina eólica que tiene una estructura interna no de retícula de acuerdo con una realización de la divulgación.
- 20 La Figura 5A es una ilustración parcialmente esquemática e isométrica, de una parte interna de una pala de turbina eólica que tiene elementos de fijación de retícula configurados de acuerdo con una realización de la divulgación.
- 25 Las Figuras 5B-5C son ilustraciones isométricas ampliadas de un elemento de fijación de retícula configurado de acuerdo con una realización de la divulgación.
- Las Figuras 5D-5F ilustran varias vistas de una parte interna de una pala de turbina eólica que tiene una estructura de retícula sujeta al menos en parte con elementos de fijación de retícula configurados de acuerdo con realizaciones de la divulgación.
- 30 La Figura 6A es una vista parcialmente esquemática, de alzado lateral de un larguero que tiene múltiples partes, cada una con capas que terminan en posiciones escalonadas para formar una línea de unión no monótonamente variable.
- 35 La Figura 6B es una ilustración de una realización de la estructura mostrada en la Figura 6A con abrazaderas colocadas para impedir o limitar el deslaminado de acuerdo con una realización de la divulgación.
- La Figura 6C es una ilustración ampliada de una parte del larguero mostrado en la Figura 6B.
- 40 Las Figuras 6D-6G son ilustraciones parcialmente esquemáticas de largueros que tienen juntas configuradas de acuerdo con realizaciones adicionales de la divulgación.
- La Figura 7A es una ilustración parcialmente esquemática e isométrica de un larguero que tiene capas que se abren en abanico en una zona de fijación al buje de acuerdo con una realización de la divulgación.
- 45 La Figura 7B es una ilustración parcialmente esquemática e isométrica de un larguero conectado a placas de transición con forma de abanico en una zona de fijación al buje de acuerdo con otra realización de la divulgación.
- La Figura 8A es una vista parcialmente esquemática, en alzado lateral de un submontaje de estructura de pala de turbina eólica configurado de acuerdo con una realización de la divulgación, y la Figura 8B es una vista ampliada, parcialmente esquemática del extremo de una cuaderna del subconjunto de la Figura 8A.
- 50 Las Figuras 9A-9C son vistas parcialmente esquemáticas e isométricas no a escala de partes del larguero interior, media y exterior configuradas de acuerdo con realizaciones de la divulgación.
- 55 Las Figuras 9D y 9E incluyen vistas parcialmente esquemáticas, de alzado lateral seccionadas de partes del larguero interior y medio de las Figuras 9A y 9B, respectivamente, y la Figura 9F es una vista parcialmente esquemática, en alzado lateral de una junta entre partes extremas adyacentes de la parte de larguero interior y la parte del larguero media de las Figuras 9A y 9B, configurado de acuerdo con varias realizaciones de la divulgación.
- 60 Las Figuras 10A y 10C-10E son series de vistas parcialmente esquemáticas, en alzado lateral de una parte de un subconjunto de pala que ilustra varias etapas en un método de fabricación de un larguero de pala de acuerdo con una realización de la divulgación, y la Figura 10B es una vista del extremo ampliada de una parte de una cuaderna representativa que ilustra otra etapa en el método de fabricación de la pala.
- 65 Las Figuras 11A-11C son una vista isométrica ampliada de una parte de una estructura de pala de turbina eólica, una

vista del extremo de una cuaderna representativa, y una vista isométrica de la estructura de pala de turbina eólica, respectivamente, que ilustran varios aspectos de un larguero fabricado de acuerdo con una realización de la divulgación.

5 La Figura 12A es una vista isométrica de un aparato de compresión configurado de acuerdo con una realización de la divulgación, y la Figura 12B es una vista isométrica parcialmente despiezada del aparato de compresión de la Figura 12A.

10 Las Figuras 13A y 13B son vistas isométricas ampliadas de partes extremas en oposición de una primera herramienta del aparato de compresión de las Figuras 12A y 12B.

La Figura 14A es una vista isométrica de una segunda parte de la herramienta del aparato de compresión de las Figuras 12A y 12B, y la Figura 14B es una vista isométrica parcialmente despiezada de la segunda parte de la herramienta de la Figura 14A.

15 La Figura 15 es una vista del extremo ampliada, en sección transversal de un larguero de pala laminado que se comprime mediante el aparato de compresión de las Figuras 12A y 12B durante un ciclo de curado adhesivo de acuerdo con una realización de la divulgación.

20 La Figura 16 es una vista isométrica parcialmente esquemática de una herramienta de elaboración que ilustra varias etapas en un método de fabricación de un larguero de pala de turbina eólica de acuerdo con otra realización de la divulgación.

### Descripción detallada

25 La presente divulgación se dirige en general a palas de turbina eólica eficientes, largueros de pala de turbina eólica y otras estructuras, y sistemas y métodos asociados de fabricación, montaje y utilización. Diversos detalles que describen estructuras y/o procesos que son bien conocidos y frecuentemente asociados con palas de turbina eólica no se exponen en la siguiente descripción para evitar confundir innecesariamente la descripción de las diversas realizaciones de la divulgación. Más aún, aunque la siguiente divulgación expone varias realizaciones, diversas otras realizaciones pueden tener diferentes configuraciones o diferentes componentes que aquellos descritos en esa sección. En particular, otras realizaciones pueden tener elementos adicionales o pueden carecer de uno o más de los elementos descritos a continuación con referencia a las Figuras 1-16. En las Figuras 1-16, muchos de los elementos no se dibujan a escala por razones de claridad y/o ilustración.

35 La Figura 1 es una ilustración parcialmente esquemática e isométrica de un sistema global 100 que incluye una turbina eólica 103 que tiene palas 110 configuradas de acuerdo con una realización de la divulgación. La turbina eólica 103 incluye una torre 101 (una parte de la cual se muestra en la Figura 1), una carcasa o góndola 102 soportada en la parte superior de la torre 101, y un generador 104 colocado dentro de la carcasa 102. El generador 104 se conecta a un árbol o huso que tiene un buje 105 que se proyecta en el exterior de la carcasa 102. Cada una de las palas 110 incluye una parte de fijación al buje 112 en la que las palas 110 se conectan al buje 105, y una punta 121 posicionada radialmente o longitudinalmente hacia el exterior del buje 105. En una realización mostrada en la Figura 1, la turbina eólica 103 incluye tres palas conectadas a un árbol orientado horizontalmente. En consecuencia, cada pala 110 se somete a cargas cíclicamente variables cuando gira entre las posiciones de las 12:00, 3:00, 6:00 y 9:00, debido a que el efecto de la gravedad es diferente en cada posición. En otras realizaciones, la turbina eólica 103 puede incluir otro número de palas conectadas al árbol orientado horizontalmente, o la turbina eólica 103 puede tener un árbol con una orientación vertical u otra. En cualquiera de estas realizaciones, las palas 110 pueden tener estructuras configuradas de acuerdo con las disposiciones descritas con detalle adicional a continuación con referencia a las Figuras 2A-16.

50 La Figura 2A es una ilustración parcialmente esquemática, parcialmente cortada de una de las palas 110 mostrada en la Figura 1. La pala 110 se extiende hacia el exterior en una dirección radial o longitudinal desde una zona interior 113 que incluye la parte de fijación al buje 112, hasta una zona exterior 114 que incluye la punta 121. La parte de fijación al buje 112 puede incluir uno o más elementos de fijación al buje, por ejemplo, un anillo con un círculo de pernos, uno o más cojinetes, fijaciones, y/u otros elementos. La estructura interna de la pala 110 puede ser diferente en la zona interior 113 que en la zona exterior 114. Por ejemplo, la zona interior 113 puede incluir una estructura de retícula 140 formada a partir de una pluralidad de vigas o largueros 170 que se extienden longitudinal o radialmente, cuadernas que se extienden en el sentido de la cuerda 142, y elementos de retícula 143 conectados entre los largueros 170 y las cuadernas 142. La estructura de retícula 140 puede rodearse por un revestimiento 115 (la mayor parte del cual se ha retirado en la Figura 2A) que presenta al viento una superficie lisa, aerodinámica durante el funcionamiento. La zona exterior 114 puede incluir una estructura no de retícula, que se describirá con detalle adicional a continuación con referencia a la Figura 4. Tal como se usa en el presente documento, la expresión "estructura de retícula" se refiere en general a una estructura de soporte de carga que incluye elementos en general rectos y finos que forman formas o unidades cerradas (por ejemplo, unidades triangulares). La expresión "estructura no de retícula" se refiere en general a una estructura de soporte de carga que tiene una disposición que no se basa en, o no se basa principalmente en, elementos rectos finos que forman unidades con forma cerrada para su resistencia. Dichas estructuras pueden incluir, por ejemplo, estructuras monocasco y semi-monocasco. En consecuencia, el revestimiento 115 de la zona interior 113

es generalmente no para soporte de carga, y el revestimiento 115 en la zona exterior 114 es de soporte de carga.

En un aspecto particular de una realización mostrada en la Figura 2A, la pala 110 incluye tres segmentos 116, mostrados como un primer segmento 116a, un segundo segmento 116b y un tercer segmento 116c. El primer y segundo segmentos 116a, 116b pueden tener cada uno la estructura de retícula 140 descrita anteriormente, y el tercer segmento 116c puede tener una estructura no de retícula. En consecuencia, la pala 110 puede tener una estructura de retícula para las dos terceras partes interiores de su envergadura, y una estructura no de retícula para el tercio exterior. En otras realizaciones, estos valores pueden ser diferentes, dependiendo, por ejemplo, del tamaño, forma y/u otras características de la pala 110. Por ejemplo, en una realización, la estructura de retícula 140 se extiende hacia el exterior sobre una mayor parte de la envergadura o longitud de la pala 110, pero en una cantidad menor que o mayor de dos tercios de la longitud. Los elementos 116 pueden fabricarse individualmente y conectarse a continuación entre sí en una instalación de fabricación, o en un lugar de la instalación del usuario final. Por ejemplo, los segmentos 116 pueden dimensionarse cada uno para encajar en un contenedor de 16,15 m (53 pies) u otro adecuadamente dimensionado para envío. En otras realizaciones, uno o más de los elementos (por ejemplo, el primer segmento 116a y el segundo segmento 116b) pueden construirse totalmente en el lugar de instalación.

En más realizaciones adicionales, la pala 110 puede incluir otro número de segmentos 116 (por ejemplo, dos o más segmentos). En cualquiera de estas realizaciones, los segmentos individuales 116 pueden incluir cuadernas 142, elementos de retícula 143, y partes de largueros 170 que se extienden en la longitud del segmento 116. Los segmentos 116 pueden unirse entre sí mediante la unión de partes de largueros adyacentes, por ejemplo, tal como se explica posteriormente con referencia a las Figuras 6A-6C y 8A-16. Por ejemplo, el primer segmento 116a puede incluir uno o más primeros segmentos de larguero que se unen a segundos segmentos de larguero correspondientes del segundo segmento 116b. Los largueros unidos resultantes pueden extenderse a lo largo de ejes continuos longitudinales generalmente lisos. En cualquiera de estas realizaciones, el revestimiento 115 puede disponerse sobre la estructura de retícula 140 con o sin la formación de una junta en la interfaz entre segmentos adyacentes 116. Por ejemplo, las partes del larguero pueden unirse en una localización entre dos cuadernas contiguas 142, y puede disponerse un panel relativamente pequeño de revestimiento 115 sobre la junta de largueros y las dos cuadernas contiguas 142. Las cuadernas contiguas 142 pueden espaciarse aproximadamente un metro en una realización, y con otros valores en otras realizaciones. Pueden disponerse paneles mayores del revestimiento 115 en el interior y exterior del pequeño panel. En otra realización, el revestimiento 115 puede no tener juntas en el sentido de la envergadura y puede disponerse como un elemento continuo. En cualquiera de estas realizaciones, el revestimiento 115 puede fijarse (por ejemplo, unirse de forma adhesiva o unirse por ultrasonidos) a las cuadernas 142 solamente, o a las cuadernas 142 y los largueros 170. En cualquiera de estas realizaciones, la estructura de retícula 140 puede servir como estructura primaria para soportar las cargas cortantes y de flexión en la pala 110.

La Figura 2B es una ilustración parcialmente esquemática e isométrica de una parte de la pala 110 mostrada en la Figura 2A, tomada en una localización en la que la estructura interna de la pala 110 es una estructura de retícula 140. En consecuencia, la estructura de retícula 140 puede incluir múltiples largueros 170 (se muestran cuatro en la Figura 2B) fijados a las cuadernas espaciadas 142. Los elementos de retícula 143 pueden conectarse entre largueros contiguos 170, por ejemplo, usando las técnicas descritas posteriormente con referencia a las Figuras 5A-5F.

Las Figuras 2C-2F son ilustraciones esquemáticas, en sección transversal de la pala 110 que tiene disposiciones de retícula configuradas de acuerdo con una variedad de realizaciones. La Figura 2C ilustra una pala 110 que tiene cuatro largueros 170 colocados en una disposición generalmente rectangular. La Figura 2D ilustra una pala 110 que tiene seis largueros 170, que incluyen cuatro largueros 170 colocados en una disposición generalmente rectangular, y dos largueros adicionales 170, uno posicionado avanzado respecto a la disposición generalmente rectangular, y uno posicionado retrasado respecto a la disposición generalmente rectangular. La Figura 2E ilustra una pala 110 que tiene cuatro largueros 170 colocados en una disposición con forma en general de rombo, y la Figura 2F ilustra una pala 110 que tiene tres largueros 170 colocados en una disposición triangular. En otras realizaciones, la pala 110 puede incluir largueros 170 que tienen otras disposiciones.

La Figura 3 es una ilustración isométrica de una parte interna de una pala 110 que tiene una estructura de retícula 140 que incluye una disposición triangular de largueros 170, en general similar a la mostrada en la Figura 2F. La pala 110 se extiende en una dirección radial longitudinal, o en el sentido de la envergadura a lo largo de un eje de envergadura S, y se extiende de delante a atrás a lo largo del eje C en el sentido de la cuerda transversal. En consecuencia, la pala 110 puede tener una zona del borde de ataque delantero 117 con un borde de ataque 117a y una zona del borde de salida posterior 118 con un borde de salida 118a. El grosor de la pala 110 puede medirse en relación con un eje de grosor T transversal tanto al eje en el sentido de la envergadura S como al eje en el sentido de la cuerda C.

En una realización particular mostrada en la Figura 3, la pala 110 puede incluir tres largueros 170, incluyendo un primer larguero 170a y un segundo larguero 170b, ambos colocados en una zona del borde de ataque 117 y/o hacia el borde de ataque 117a y espaciados entre sí a lo largo del eje de grosor T. La pala 110 puede incluir adicionalmente un tercer larguero 170c posicionado en la zona del borde de salida 118 y/o hacia el borde de salida 118a y espaciado respecto a tanto el primer larguero 170a como al segundo larguero 170b a lo largo del eje en el sentido de la cuerda C. Cada uno de los largueros 170a-170c se fija a una pluralidad de cuadernas 142 (una de las cuales es visible en la Figura 3) que a su vez están espaciadas entre sí a lo largo del eje en el sentido de envergadura S. Cada uno de los largueros

170a-c puede tener una sección transversal generalmente rectangular. Los largueros delanteros 170a-170 pueden tener una dimensión en el sentido de la cuerda mayor que una dimensión en el sentido del grosor, y el larguero posterior 170c puede tener una dimensión de grosor mayor que una dimensión en el sentido de la cuerda. El tercer larguero 170c puede extenderse sobre una mayor parte de la dimensión del grosor de la pala 110 y en una realización particular, puede extenderse sobre la totalidad o casi la totalidad de la dimensión del grosor. Por ejemplo, el tercer larguero 170c puede tener una dimensión en la dirección del grosor que es aproximadamente la misma que la dimensión de la cuaderna 142 en la dirección del grosor.

Una característica de la disposición mostrada en la Figura 3 es que puede incluir un único larguero (el tercer larguero 170c) en la zona del borde de salida 118. Por ejemplo, la estructura de retícula 140 puede incluir solo tres largueros que se extienden longitudinalmente 170 en cualquier localización longitudinal dada, con solamente uno de los largueros 170 en la zona del borde de salida 118. Esta disposición puede permitir que el tercer larguero 170c se posicione a una distancia en el sentido de la cuerda más separado del primer y segundo larguero 170a, 170b que algunas disposiciones que incluyen cuatro largueros (por ejemplo, la disposición mostrada en las Figuras 2B-2C). Mediante el espaciado del tercer larguero 170c adicionalmente separado del primer y segundo largueros 170a, 170b, se mejora la posibilidad de la estructura de retícula 140 para manejar grandes cargas en la dirección en el sentido de la cuerda C. Esto puede ser particularmente importante para palas de turbina eólica montadas en un árbol horizontal debido a que dichas palas están sometidas a cargas de gravedad significativas en el sentido de la cuerda C cuando las palas están en las posiciones de las 3:00 y 9:00 descritas anteriormente con referencia a la Figura 1. En consecuencia, se espera que esta disposición pueda ser más ligera y/o más adecuada para soportar cargas significativas en la dirección de la cuerda C que en algunas otras disposiciones que tienen cuatro largueros. Al mismo tiempo, se espera que esta disposición sea más simple, más ligera y/o menos costosa que disposiciones que incluyen más de cuatro largueros, por ejemplo, la disposición descrita anteriormente con referencia a la Figura 2D.

Los componentes estructurales internos descritos anteriormente pueden fabricarse a partir de materiales compuestos y/o no compuestos adecuados. Por ejemplo, los largueros 170 pueden formarse a partir de un laminado de capas en las que cada una incluye fibras de vidrio unidireccional, fibras de carbono, y/u otras fibras en una matriz de resinas termoestables y/o termoplásticas adecuadas. Las fibras pueden orientarse en general paralelas al eje en el sentido de la envergadura S sobre la mayor parte de la longitud de la pala 110, y pueden tener otras orientaciones en localizaciones específicas, como se describe adicionalmente a continuación con referencia a las Figuras 6A-7A. En otras realizaciones, largueros de compuesto también pueden fabricarse mediante infusión, pre-impregnado, pultrusión o moldeado a presión. En más realizaciones adicionales, los largueros 170 pueden formarse a partir de materiales metálicos, incluyendo aleaciones coladas, forjadas o mecanizadas, laminados metálicos, estructuras de emparedado, así como híbridos de metal/compuesto (por ejemplo, hojas de compuesto con núcleo metálico, por ejemplo, núcleo de panel), etc. Los elementos de retícula 143 pueden formarse de aluminio (por ejemplo aluminio 2024-T6) u otro metal adecuado, compuesto, u otro material. Las cuadernas 142 pueden formarse a partir de un compuesto de fibra de vidrio y espuma o madera de balsa, por ejemplo, un núcleo de madera de balsa emparedado entre placas de fibra de vidrio. En otras realizaciones, las cuadernas 142 pueden formarse a partir solamente de fibra de vidrio, sin un núcleo de espuma o madera de balsa, o las cuadernas 142 pueden formarse con otras técnicas y/o componentes. Por ejemplo, las cuadernas 142 pueden tener una construcción corrugada o de resaltos. Las cuadernas 142 pueden formarse a partir de un único panel, o dos paneles separados, sin una estructura de núcleo entre los dos paneles. Las cuadernas 142 pueden fabricarse también de metal; a partir de materiales compuestos tales como fibra de vidrio, fibras de carbono, y/u otras fibras en una matriz de resinas termoestables y/o termoplásticas; y/o a partir de materiales plásticos (sin reforzar) (por ejemplo, resina sin fibras). Por ejemplo, las cuadernas de compuesto pueden fabricarse mediante laminado húmedo, infusión, pre-impregnado, rociado de fibra troceada, moldeado a presión, formación en vacío, y/u otras técnicas adecuadas de producción en masa.

La Figura 4 es una ilustración parcialmente esquemática de una parte de la pala de turbina eólica 110 localizada en la zona exterior 114 descrita anteriormente con referencia a la Figura 2A. En esta realización, la estructura interna de la pala de turbina eólica 110 en la zona exterior 114 no es una estructura de retícula. Por ejemplo la estructura puede incluir en su lugar una malla 119 relativamente delgada orientada en general paralela al eje de grosor T y que se extiende a lo largo del eje en el sentido de la envergadura S. La malla 119 puede conectarse a o formarse de modo integral con bordes 120 que se extienden en la dirección en el sentido de la cuerda C. Los largueros que se extienden en el sentido de la envergadura 470a, 470b se fijan a cada uno de los bordes 120 y se conectan a su vez al revestimiento 115, una parte del cual se muestra en la Figura 4A. En una realización, la estructura puede incluir cuadernas espaciadas 142 situadas en la zona del borde de salida 118. En otras realizaciones, esas cuadernas 142 pueden extenderse asimismo en la zona del borde de ataque 117. El revestimiento 115 puede formarse a partir de un emparedado de fibra de vidrio-madera de balsa-fibra de vidrio, o un emparedado de fibra de vidrio-espuma-fibra de vidrio. En otras realizaciones, el revestimiento 115 puede formarse a partir de materiales compuestos fabricados mediante laminación húmeda, infusión, pre-impregnado, rociado de fibras troceadas, moldeado a presión, formación en vacío y/u otras técnicas de producción en masa. El revestimiento 115 puede tener la misma construcción tanto en la zona exterior 114 mostrada en la Figura 4, como en la zona interior 113 mostrada en la Figura 3. Las cuadernas 142 pueden tener una construcción similar. La malla 119 y los rebordes 120 pueden formarse a partir de fibra de vidrio, por ejemplo, fibra de vidrio unidireccional. En otras realizaciones, cualquiera de los componentes anteriores puede formarse a partir de otros materiales adecuados. Los largueros 470a, 470b localizados en la zona exterior 114 pueden unirse a largueros correspondientes en la zona interior 113 (Figura 2A) usando una variedad de técnicas que incluyen,

pero sin limitarse a, las descritas a continuación con referencia a las Figuras 6A-6C y 8A-16. En cualquiera de estas realizaciones, los largueros 470a, 470b localizados en la zona exterior 114 pueden extenderse a lo largo de los mismos ejes longitudinales continuos, generalmente lisos como largueros contrarios en la zona interior 113 para transferir eficientemente cargas desde la zona exterior 114 a la zona interior 113.

Una característica de la disposición descrita anteriormente con referencia a las Figuras 2A-4 es que la pala 110 puede incluir tanto estructuras internas de retícula como no de retícula. Una ventaja de esta disposición es que puede ser más eficiente estructuralmente que un diseño que incluya o bien solo una estructura de retícula o solo una estructura no de retícula. Por ejemplo, la estructura de retícula puede usarse en la zona interior 113 (por ejemplo, cerca del buje) en donde las cargas de flexión son más altas de lo que son en la zona de punta 111, y en donde la pala 110 es relativamente gruesa. En la zona exterior 114, la estructura no de retícula puede ser más fácil de integrar en esta parte relativamente delgada de la pala 110. La estructura no de retícula en esta zona también se espera que sea más estructuralmente eficiente que una estructura de retícula, que tiende a perder eficiencia cuando se hace grande la relación de aspecto de las formas cerradas formadas por los elementos de retícula.

La Figura 5A es una ilustración parcialmente esquemática e isométrica de una parte de una estructura de retícula representativa 140 configurada de acuerdo con una realización particular de la divulgación. En esta realización, la estructura de retícula 140 incluye tres largueros 170, identificados como un primer larguero 170a, un segundo larguero 170b y un tercer larguero 170c. En otras realizaciones, la estructura de retícula 140 puede tener otros números y/o disposiciones de los largueros 170. En cualquiera de estas realizaciones, la estructura de retícula 140 puede incluir elementos de retícula 143 y cuadermas 142, además de los largueros 170. Los elementos de fijación de la retícula 150 pueden conectar los elementos de retícula 143 a los largueros 170. Por ejemplo, los elementos de retícula 143 pueden incluir una primera característica de fijación 151a (por ejemplo un primer orificio de montaje) que está alineado con una segunda característica de fijación 151b (por ejemplo, un segundo orificio de montaje correspondiente) soportado por el elemento de fijación de retícula 150. Cuando las dos características de fijación 151a, 151b incluyen orificios correspondientes, pueden conectarse a través de un elemento de fijación adicional 157, por ejemplo un remache o una fijación roscada. En otras realizaciones, las características de fijación 151a, 151b pueden conectarse directamente entre sí, por ejemplo, si una característica incluye una punta en expansión y la otra incluye un orificio correspondiente.

La Figura 5B ilustra una parte representativa de la estructura de retícula 140 descrita anteriormente con referencia a la Figura 5A. Como se muestra en la Figura 5B, un elemento de fijación de retícula representativa 150 se posiciona a lo largo del segundo larguero 170b de modo que reciba y se una a múltiples elementos de retícula 143. Cada uno de los elementos de retícula 143 puede incluir una ranura 145 que recibe una parte de fijación de retícula 154 con forma de reborde del elemento de fijación de retícula 150. En esta realización, las características de fijación 151a, 151b incluyen orificios correspondientes 158a, 158b que se conectan con los elementos de fijación 157 descritos anteriormente con referencia a la Figura 5A.

La Figura 5C es una ilustración isométrica ampliada de uno de los elementos de fijación de retícula 150 mostrado en las Figuras 5A-5B. En esta realización, el elemento de fijación de retícula 150 incluye una parte de fijación de larguero 152 (por ejemplo, que tiene un canal 153 en el que se posiciona el larguero 170 correspondiente), y una o más partes de fijación de retícula 154 (dos se muestran en la Figura 5B). Las partes de fijación de retícula 154 pueden tener una forma plana, de tipo reborde en la que se posicionan las segundas características de fijación 151b (por ejemplo, los orificios de montaje 158b). En una realización particular mostrada en la Figura 5B, el elemento de fijación de retícula 150 se forma a partir de dos componentes o piezas complementarias: un primer componente o pieza 156a y un segundo componente o pieza 156b. La primera pieza 156a incluye dos primeras partes de reborde 155a, y la segunda pieza 156b incluye dos segundas partes de reborde 155b. Cuando las dos piezas 156a, 156b se colocan juntas, las primeras partes de reborde 155a coinciden con las segundas partes de reborde 155b correspondientes para formar dos pares de rebordes, cada uno de los cuales forma una de las partes de fijación de retícula 154. En consecuencia, cada primera parte de reborde 155a puede estar en contacto de superficie a superficie con la segunda parte de reborde correspondiente. La primera y segunda partes 155a, 155b pueden tener orificios de montaje alineados configurados para recibir un fijador correspondiente. Las dos piezas 156a, 156b también forman el canal 153. En un aspecto particular de esta realización, la primera pieza 156a y la segunda pieza 156b se dimensionan de modo que, cuando se colocan juntas, el canal resultante 153 es ligeramente más pequeño que la sección transversal del larguero alrededor del que se coloca. En consecuencia, cuando las dos piezas 156a, 156b se fuerzan a aproximarse entre sí, el elemento de fijación de retícula 150 puede fijarse alrededor del larguero correspondiente, asegurando así el elemento de fijación de retícula 150 en su posición. Por ejemplo, cuando la segunda característica de fijación 151b incluye orificios de montaje, el fabricante puede pasar un fijador 157 a través del orificio de montaje tanto para fijar el elemento de fijación de retícula 150 al elemento de retícula correspondiente 143 (Figura 5A), y también fijar también el elemento de fijación de retícula 150 alrededor del larguero correspondiente 170 (Figura 5A).

En otras realizaciones, los elementos de fijación de retícula 150 pueden formarse usando otras técnicas. Por ejemplo, los elementos de fijación de retícula 150 pueden extrudirse, moldearse, fundirse o mecanizarse. En cualquiera de estas realizaciones, el elemento de fijación de retícula 150 puede formarse a partir de un material ligero, por ejemplo un metal tal como aluminio o acero, o un compuesto adecuado. En otras realizaciones, los elementos de fijación de retícula 150 pueden formarse a partir de otros materiales que fácilmente se adaptan a las características de fijación 151b. Los elementos de fijación de retícula 150 pueden asegurarse a los largueros correspondientes usando la técnica

de fijación descrita anteriormente, y/u otras técnicas, incluyendo, pero sin limitarse a, unión adhesiva o curado en conjunto.

Los elementos de fijación de retícula 150 pueden tener otras formas y/o configuraciones en otras realizaciones. Por ejemplo, la parte de fijación del larguero 152 no necesita extenderse alrededor de toda la circunferencia del larguero correspondiente 170, sino extenderse en su lugar solamente alrededor de una parte del larguero 170. En algunas realizaciones en las que una junta adhesiva entre el elemento de fijación de retícula 150 y el larguero 170 proporciona resistencia suficiente, el elemento de fijación de retícula 150 puede tener solamente una superficie de contacto relativamente pequeña con el larguero 170. El elemento de fijación de retícula puede incluir otros números de partes de fijación de retícula 154, por ejemplo, solo una parte de fijación de retícula 154, o más de dos partes de fijación de retícula 154.

En más realizaciones adicionales, los elementos de fijación de retícula 150 pueden formarse a partir de otros materiales. Por ejemplo, los elementos de fijación de retícula 150 pueden formarse a partir de un material compuesto. En un ejemplo particular, el elemento de fijación de retícula 150 se forma mediante hebras de envoltura (por ejemplo, láminas de hebras) alrededor del larguero 170, y solapando los extremos de las hebras (o láminas) para formar uno o más rebordes. Las hebras se fijan al larguero 170 con un adhesivo, o a través de un proceso de curado conjunto. El elemento de retícula correspondiente 143 fijado al elemento de fijación de retícula 150 puede tener una ranura 145 que recibe el reborde y se asegura al reborde con un adhesivo.

Una característica de una realización del elemento de fijación de retícula 150 descrito anteriormente con referencia a las Figuras 5A-5C es que no requiere orificios en el larguero 170 para proporcionar una fijación entre el larguero 170 y los elementos de retícula 143 correspondientes. En su lugar, el elemento de fijación de retícula 150 puede fijarse o asegurarse de otra forma al larguero 170 y los orificios pueden localizarse en el elemento de fijación de retícula 150 en lugar de en el larguero 170. Esta disposición puede ser particularmente beneficiosa cuando el larguero 170 incluye materiales compuestos, dado que es típicamente más difícil formar orificios de montaje en dichos materiales, y/o dichos orificios puede ser más probable que inicien fracturas de propagación y/o creen concentraciones de tensiones en el larguero 170.

Las Figuras 5D-5F ilustran otras vistas de la estructura de retícula 140 descrita anteriormente con referencia a la Figura 5A. La Figura 5D es una vista lateral de una parte de la estructura de retícula 140, que ilustra una cuaderna representativa 142. La cuaderna 142 incluye un alma 146 y un reborde 147 que se extiende alrededor del alma 146. El alma 146 puede incluir uno o más recortes 148 (se muestran tres en la Figura 5D) que alojan los largueros 170a-170c correspondientes. En una realización particular mostrada en la Figura 5D, el recorte 148 que aloja el tercer larguero 170c puede extenderse totalmente a través del grosor de la cuaderna 142. Como resultado, una parte del borde de salida 141 de la cuaderna 142 es discontinua respecto al resto del alma 146 de la cuaderna 142. En consecuencia, el reborde 147 de la cuaderna 142 puede asegurar la parte del borde de salida 141 de la cuaderna 142 al resto de la cuaderna 142.

La Figura 5E es una vista de la estructura de retícula 140 desde una posición por delante y por encima de la zona del borde de ataque 117 y la Figura 5F es una vista de la estructura de retícula 140 desde una posición por encima de la zona del borde de salida 118. Como se muestra en ambas Figuras 5E y 5F, los elementos de retícula pueden incluir primeros elementos de retícula 143a y segundos elementos de retícula 143b. Los primeros elementos de retícula 143a pueden posicionarse adyacentes al alma 146 de una cuaderna correspondiente 142, y pueden unirse al alma 146, en particular, a través de una técnica de unión adhesiva u otra. En consecuencia, los primeros elementos de retícula 143a en combinación con los elementos de fijación de retícula 150 pueden asegurar las cuadernas 142 a los largueros 170a-170c. Los segundos elementos de retícula 143b pueden extenderse transversalmente (por ejemplo, diagonalmente) entre cuadernas contiguas 142 y/o largueros 170 para incrementar la resistencia y rigidez global de la estructura de retícula 140.

La Figura 6A es una vista parcialmente esquemática, de alzado lateral de una junta entre dos partes 171 de un larguero 170. Las dos partes pueden incluir una primera parte 171a y una segunda parte 171b, y la junta puede formarse a lo largo de una línea de unión 176 que varía no monótonamente (por ejemplo, en zigzag). Dicha línea de unión 176 se espera que produzca una unión más fuerte entre la primera y segunda partes 171a, 171b que una línea de unión recta o diagonal. La primera y segunda partes 171a, 171b pueden formar cada una parte de un segmento contiguo diferente del larguero global 170, como se ha descrito anteriormente con referencia a la Figura 2A. Por ejemplo, la primera parte 171a puede ser parte del primer segmento 116a mostrado en la Figura 2A, y la segunda parte 171b puede ser parte del segundo segmento 116b.

La primera parte 171a puede incluir múltiples primeras capas apiladas, laminadas 172a y la segunda parte 171b puede incluir múltiples segundas capas apiladas, laminadas 172b. En una realización particular, las capas 172a, 172b pueden formarse a partir de un material de fibra unidireccional (por ejemplo, fibra de vidrio o una fibra de carbono) y una resina correspondiente. Cada una de las capas 172a, 172b puede formarse a partir de una única lámina o múltiples láminas (por ejemplo, seis láminas). Las capas 172a, 172b pueden ser capas de pre-impregnación, disposiciones manuales, pultrusiones, o pueden formarse usando otras técnicas, por ejemplo, técnicas de moldeo por transferencia asistida por vacío. Las primeras capas 172a terminan en primeras terminaciones 173a, y las segundas capas 172b terminan en

segundas terminaciones 173b. Las terminaciones contiguas 173a, 173b localizadas en diferentes posiciones a lo largo del eje de grosor T pueden escalonarse relativamente entre sí para crear la línea de unión 176 en zigzag. Esta disposición produce proyecciones 174 y rebajes correspondientes 175 dentro de los que encajan las proyecciones 174. En un aspecto particular de esta realización, cada capa tiene una terminación que se escalona con relación a su contigua, excepto en donde la línea de unión 176 cambia de dirección. En dichos puntos, pueden finalizarse dos capas adyacentes en la misma localización y unirse entre sí, para impedir que una simple capa quede sometida a niveles de tensión crecientes.

Durante un proceso de fabricación representativo, cada una de las primeras capas 172a se apilan, unen y curan, como lo hacen cada una de las segundas capas 172b, mientras las dos partes 171a, 171b se posicionan separadas entre sí. Las capas 172, 172b se precortan antes de apilarlas de modo que cuando se apilan, forman los rebajes 175 y proyecciones 174. Después de que se hayan curado las dos partes 171a, 171b, los rebajes 175 y/o proyecciones 174 pueden recubrirse y/o rellenarse con un adhesivo. Las dos partes 171a, 171b se llevan a aproximarse entre sí de modo que las proyecciones 174 de cada parte son recibidas en rebajes correspondientes 175 de la otra. La zona de junta puede entonces unirse y curarse.

La Figura 6B es una ilustración de un larguero 170 que tiene una línea de unión 176 similar en general a la descrita anteriormente con referencia a la Figura 6A. Como también se muestra en la Figura 6B, el larguero 170 puede incluir una o más abrazaderas o tiras 177 que se posicionan en o cerca de la línea de unión 176. Las abrazaderas 177 pueden posicionarse para impedir o detener el deslaminado que podría resultar entre cualquiera de las capas en el larguero compuesto 170. Por ejemplo, como se muestra en la Figura 6C, si comienza un deslaminado 178 potencial entre dos capas 172a, la fuerza de compresión proporcionada por la abrazadera 177 puede impedir que el deslaminado 178 se propague adicionalmente en una dirección en el sentido de la envergadura. La abrazadera 177 puede posicionarse donde se espera que el riesgo potencial de deslaminado sea alto, por ejemplo, en o cerca de la terminación 173 de las capas más externas 172a, 172b mostradas en la Figura 6B. En otras realizaciones, la función proporcionada por las abrazaderas 177 puede proporcionarse por otras estructuras. Por ejemplo, los elementos de fijación de retícula 150 descritos anteriormente pueden realizar esta función, además de proporcionar lugares de fijación para los elementos de la retícula.

Las Figuras 6D-6G son series de vistas parcialmente esquemáticas, de alzado lateral de largueros 670a-670d, respectivamente, que ilustran varias juntas que pueden formarse entre partes de largueros adyacentes 671 de acuerdo con otras realizaciones de la divulgación. Los largueros 670 pueden ser al menos en general similares en estructura y función al larguero 170 descrito en detalle anteriormente. Por ejemplo, tal como se muestra en la Figura 6D, el larguero 670a puede incluir una primera parte 671a que tenga múltiples primeras capas apiladas, laminadas 672a, y una segunda parte 671b que tenga múltiples segundas capas apiladas, laminadas 672b. Además, la primera parte 671a puede unirse a la segunda parte 671b a lo largo de una línea de unión 676a que es variable no monótonamente (por ejemplo, en zigzag) a lo largo del eje de grosor T. En esta realización particular, sin embargo, las primeras capas 672a y las segundas capas 672b tienen primeras terminaciones 673a y segundas terminaciones 673b, respectivamente, que no son paralelas al eje en el sentido de la cuerda C. Es decir, las terminaciones 673 están biseladas o inclinadas en relación con el eje en el sentido de la cuerda C. Los biseles pueden tener la misma dirección y extensión para cada capa, o estas características pueden variar de una capa a la siguiente. Por ejemplo, como se muestra en las Figuras 6D y 6E en líneas discontinuas, la capa por debajo de la capa más superior debe estar biselada en la dirección opuesta a la de la capa más superior. Los biseles en capas contiguas pueden posicionarse directamente por encima y debajo entre sí, como se muestra en las Figuras 6D y 6E, o los biseles en capas contiguas pueden desplazarse en una dirección en el sentido de la envergadura de modo que no se solapen entre sí.

Con referencia a continuación a la Figura 6E, el larguero 670b puede ser al menos en general similar en estructura y función al larguero 670a descrito en detalle anteriormente. Por ejemplo, el larguero 670b puede incluir una primera parte 671c que tenga múltiples primeras capas apiladas, laminadas 672a y una segunda parte 671d que tenga múltiples segundas capas apiladas, laminadas 672b. En esta realización particular, sin embargo, las primeras capas 672a tienen primeras terminaciones 673c que forman una proyección 674a, y las segundas capas 672b tienen segundas terminaciones 673d que forman un rebaje 675a. La proyección 674a se recibe en el rebaje 675a para formar una línea de unión 676b que es variable no monótonamente a lo largo tanto del eje del grosor T como del eje en el sentido de la cuerda C.

Con referencia a continuación a la Figura 6F, el larguero 670c es al menos en general similar en estructura y función al larguero 670a descrito en detalle anteriormente. En esta realización particular, sin embargo, las primeras capas 672a incluyen primeras terminaciones 673e, y las segundas capas 672b incluyen segundas terminaciones 673f, que forman alternadamente proyecciones 674b y rebajes 675b a lo largo del eje en el sentido de la cuerda C. Esto da como resultado una línea de unión 676c que es variable no monótonamente a lo largo del eje en el sentido de la cuerda C pero no a lo largo del eje de grosor T.

Con referencia a continuación a la Figura 6G, en esta realización particular las primeras capas 672a incluyen primeras terminaciones 673g, y las segundas capas 672b incluyen terminaciones 673h, que forman alternadamente proyecciones 674c y rebajes 675c a lo largo del eje en el sentido de la cuerda C y alternadamente proyecciones 674d y rebajes 675d a lo largo del eje del grosor T. Como la explicación precedente ilustra, hay una amplia variedad de

líneas de borde que varían no monótonamente, escalonadas, en zigzag, solapadas y/u otras que pueden usarse para unir eficiente y fuertemente partes del larguero juntas de acuerdo con la presente divulgación. En consecuencia, la presente divulgación no está limitada a líneas de unión que tengan cualquier configuración particular.

5 Una característica de realizaciones descritas anteriormente con referencia a las Figuras 6A-6G es que pueden incluir partes del larguero conectadas entre sí a lo largo de una línea de unión que tenga una forma en zigzag, o varíe en otra forma de un modo no monótono. Una ventaja esperada de esta disposición es que la línea de unión será más fuerte que una línea de unión vertical simple o en diagonal. Además, se espera que la formación de la línea de unión pueda simplificarse debido a que no requiere el uso de un número significativo de elementos de fijación adicionales, y puede emplear en su lugar una técnica de unión en general similar a la técnica usada para unir las capas individuales de las dos partes. Aún más, la unión entre las partes del larguero puede formarse sin calentamiento, o solo con calentamiento local, lo que evita la necesidad de calentar toda la pala. Las características anteriores pueden a su vez simplificar la facilidad con la que un fabricante y/o instalador forma una gran pala de turbina eólica que está inicialmente en múltiples segmentos (por ejemplo, los segmentos 116 descritos anteriormente con referencia a la Figura 2A), que se unen a continuación entre sí, por ejemplo, en un lugar de instalación. Los detalles adicionales de técnicas de fabricación adecuadas se describen a continuación con referencia a las Figuras 8A-16.

En otras realizaciones, el larguero 170 puede incluir otras configuraciones y/o materiales. Por ejemplo, pueden formarse láminas seleccionadas a partir de metal o fibra de carbono en lugar de fibra de vidrio. Todas las láminas no necesitan tener el mismo grosor. En consecuencia, las dimensiones y materiales seleccionados para cada lámina pueden seleccionarse para producir una resistencia, rigidez, resistencia a la fatiga y coste deseados.

La Figura 7A es una ilustración parcialmente esquemática de una parte de fijación al buje 112 configurada de acuerdo con una realización de la divulgación. Por razones de ilustración, la Figura 7A ilustra solamente la parte de fijación al buje 112, y en particular, la transición entre los largueros 170 que se extienden longitudinalmente y un elemento de fijación al buje, por ejemplo, un anillo de fijación al buje 180 que se extiende circunferencialmente. El anillo 180 puede incluir una estructura no de compuesto, por ejemplo, un elemento metálico, y puede tener una dirección en el sentido de la envergadura relativamente corta tal como se muestra en la Figura 7A, o una dimensión en el sentido de la envergadura más larga en otras realizaciones. El anillo 180 o la parte de fijación al buje 112 puede ser circunferencialmente continuo, o formarse a partir de múltiples secciones dispuestas circunferencialmente. Por ejemplo, la parte de fijación al buje 112 puede incluir una sección circunferencial para cada larguero 170, conectándose cada sección a un anillo continuo 180. Los elementos de fijación al buje que pueden incluirse en la zona de fijación al buje 112 no se muestran en la Figura 7A. La parte de fijación al buje 112 puede incluir una transición a cuatro largueros 170 (tal como se muestra en la Figura 7A) o a otro número de largueros 170 (por ejemplo, tres largueros 170, tal como se muestra en la Figura 3).

Cada uno de los largueros 170 puede incluir un compuesto laminado de capas 172, y cada una de las capas 172 puede incluir a su vez múltiples láminas. Por ejemplo, en una realización particular, cada uno de los largueros 170 puede incluir un laminado de quince capas 172, teniendo cada una un total de seis láminas, para un total de noventa láminas. Cada una de las láminas puede tener fibras que se orientan unidireccionalmente, por ejemplo, en alineación con el eje del larguero S. En consecuencia, dichas fibras tienen una desviación de 0° respecto al eje del larguero S. Las capas 172 pueden apilarse una sobre otra, cada una con fibras orientadas a 0° en relación con el eje del larguero S, y pueden cortarse de modo que tengan la forma mostrada en la Figura 7A. El número de láminas orientadas a 0° con relación al eje de larguero S puede reducirse en una dirección que se extiende hacia el anillo 180. Por ejemplo, el número de dichas láminas puede reducirse desde noventa en el lado derecho de la Figura 7A (en la que los largueros 170 tienen una forma de sección transversal en general fija, rectangular) a veinte en el anillo 180 en el lado izquierdo de la Figura 7A (en donde la estructura tiene una forma más delgada, en arco). Pueden terminarse setenta capas 172 eliminadas en una forma escalonada de modo que el grosor global de la estructura se reduzca globalmente de derecha a izquierda.

Cuando las capas 172 de orientación a 0° se disminuyen, el fabricante puede añadir capas que estén orientadas en otros ángulos en relación con el eje del larguero S. Por ejemplo, el fabricante puede añadir capas que tengan fibras orientadas a +45° y -45° con relación al eje del larguero S. En una realización particular, pueden añadirse veinte a treinta de dichas láminas, de modo que el número total de láminas en el anillo 180 esté entre cuarenta y cincuenta, en comparación con noventa láminas en el lado derecho de la Figura 7A. Al añadir las láminas orientadas a +45°/-45° a la estructura de la parte de fijación al buje 112, la carga transportada por los largueros 170 puede dispersarse en una dirección circunferencial y distribuirse de una forma más uniforme en el anillo 180. Para mejorar adicionalmente este efecto, la trayectoria de la carga puede "dirigirse" proporcionando un número diferente de láminas a +45° en comparación con láminas a -45°. Esta disposición puede en consecuencia reducir o eliminar la probabilidad de que tornillos individuales que pasen a través de orificios de tornillos 182 en el anillo 180 experimenten cargas significativamente más altas que otros tornillos localizados en posiciones circunferencialmente diferentes. Como resultado, esta disposición se espera que no solo proporcione una suave transición desde la sección transversal con forma aerodinámica de la pala 110 a la forma de sección transversal circular en la parte de fijación al buje 112, sino también se espera que distribuya más uniformemente las cargas de lo que lo hacen las estructuras existentes.

La Figura 7B es otra ilustración de una parte de fijación al buje 112 en la que el larguero 170 incluye capas 172 de

5 fibras que se extienden unidireccionalmente, alineadas con el eje del larguero S. En esta realización, las capas individuales 172 terminan en terminaciones 173. Uno o más elementos de terminación 179 (por ejemplo, placas), cada una teniendo una forma curvada, de tipo abanico, pueden ensamblarse a tope contra el larguero 170, y pueden incluir rebajes que reciban las capas terminadas 172. En una realización particular mostrada en la Figura 7B, esta disposición incluye tres elementos de transición 179, dos de los cuales son visibles en la Figura 7B. Los dos elementos de transición 179 visibles alojan cada uno múltiples capas 172 (por ejemplo, cuatro o más capas 172). Un hueco 183 entre los dos elementos de transición 179 recibe un tercer elemento de transición (no mostrado en la Figura 7B por razones de claridad) que a su vez recibe las capas restantes 172. Cada uno de los elementos de transición 179 puede fijarse a continuación al anillo 180, que a su vez se conecta a un cojinete de paso 181. El cojinete de paso 181 se usa para variar el paso de la pala de la turbina eólica 110 durante el uso. Cada uno de los elementos de transición 179 puede tener una forma de sección transversal general en arco en la que se conecta al anillo 180, y una forma de sección transversal generalmente plana, rectangular o rectilínea como su punto más alejado del anillo 180, en la que se conecta al larguero 170.

15 En otras realizaciones, la zona de transición entre el anillo de fijación al buje 180 u otra característica de fijación, y el resto de la pala 110 puede tener otras disposiciones. Por ejemplo, la disposición general de láminas con forma de abanico o láminas en combinación con elementos de transición, puede aplicarse a otras estructuras de pala que pueden no incluir los largueros descritos anteriormente. En otro ejemplo, la disposición de láminas a  $+45^\circ/-45^\circ$  descrita anteriormente puede usarse para “dirigir” cargas (por ejemplo, para distribuir más uniformemente la carga en los orificios de tornillos 182) en las palas 110 que no incluyen los largueros 170, o en palas 110 que incluyen largueros u otras estructuras dispuestas de modo diferente a las que se han descrito anteriormente.

25 La Figura 8A es una vista parcialmente esquemática, en alzado lateral de un conjunto de fabricación 801 de la pala de turbina 110 configurado de acuerdo con una realización de la divulgación, y la Figura 8B es una vista del extremo ampliada tomada lo largo de la línea 8B-8B de la Figura 8A que ilustra una cuaderna representativa 142 soportada por un poste 802. Con referencia a las Figuras 8A y 8B en asociación, el conjunto de fabricación 801 incluye una pluralidad de cuadernas 142 soportadas por postes 802 individuales en las localizaciones en el sentido de la envergadura apropiadas. Como se ha explicado anteriormente, la pala de turbina 110 incluye un segmento interior o primero de pala 116a, un segmento medio o segundo de pala 116b, y un segmento exterior o tercero de pala 116c. En la realización ilustrada, el segundo larguero 170b (por ejemplo, el larguero inferior o de “presión”) se ha montado sobre las cuadernas 142. El larguero 170b incluye una parte interior o primera de larguero 871a, una parte media o segunda de larguero 871b y una parte exterior o tercera de larguero 871c.

35 Con referencia a continuación a la Figura 8B, como se ha explicado anteriormente con referencia a la Figura 5D, las cuadernas 142 incluyen una pluralidad de recortes 148 configurados para recibir elementos de fijación de la retícula 150. Más particularmente, en la realización ilustrada, la cuaderna representativa 142 incluye un primer recorte 148a configurado para recibir el primer larguero 170a (por ejemplo, el larguero de succión; no mostrado en las Figuras 8A u 8B), un segundo corte 148b configurado para recibir el segundo larguero 170b (por ejemplo, el larguero de presión), y un tercer corte 148c configurado para recibir el tercer larguero 170c (por ejemplo, el larguero posterior; tampoco mostrado en las Figuras 8A u 8B). Como se describe con mayor detalle a continuación, en diversas realizaciones, uno o más de los largueros 170 pueden fabricarse por laminación de una pluralidad de capas de compuesto prefabricadas o “pultrusiones” unidas en su posición sobre el conjunto de fabricación 801. Los detalles adicionales de estas realizaciones se describen con mayor detalle a continuación con respecto a las Figuras 9A-16.

45 Las Figuras 9A-9C son una serie de vistas parcialmente esquemáticas, isométricas ampliadas de la parte de larguero interior 871a, la parte de larguero media 871b y la parte de larguero exterior 871c configuradas de acuerdo con realizaciones de la divulgación. Con referencia primero a la Figura 9A, en la realización ilustrada, el larguero 170b puede fabricarse a partir de una pluralidad de capas 972 (identificadas individualmente como las capas 972a-o) que se unen o se laminan en otra forma juntas en el sitio sobre el conjunto de fabricación 801 (Figura 8A). En realizaciones particulares, las capas 972 pueden incluir materiales compuestos prefabricados, tales como pultrusiones o “tablones” de materiales de compuesto realizados por pultrusión. Como es conocido, la pultrusión de compuestos es un proceso de fabricación que crea productos de polímero o resina reforzados por fibra que tienen una forma, resistencia y características de flexibilidad relativamente consistentes. En un proceso de pultrusión típico, el material de refuerzo (por ejemplo, fibras unidireccionales, sirgas, hileras, cintas, etc. de fibras de vidrio, fibras de aramida, fibras de carbono, fibras de grafito, fibras de kevlar y/u otros materiales) se arrastra a través de un baño de resina (por ejemplo, un baño de resina termoestable líquida de resina epoxi, resina de viniléster, resina de poliéster, plástico). Se tira a continuación del elemento húmedo fibroso a través de un troquel de acero calentado, en el que con un control de temperatura preciso se cura la resina y conforma el material en el perfil deseado. Las pultrusiones pueden cortarse entonces a la longitud deseada para su uso. La resistencia, color y otras características pueden diseñarse en el perfil mediante cambios en la mezcla de resina, materiales de refuerzo, perfiles del troquel, y/u otros parámetros de fabricación.

65 En la realización ilustrada, las capas 972 pueden formarse a partir de tablones realizados por pultrusión que tienen secciones transversales generalmente rectangulares. En una realización, por ejemplo, las capas 972 pueden tener anchos de sección transversal desde aproximadamente 5,08 cm (2 pulgadas) a aproximadamente 30,48 cm (12 pulgadas), o desde aproximadamente 10,16 cm (4 pulgadas) a aproximadamente 25,4 cm (10 pulgadas), y grosores de sección transversal de desde aproximadamente 0,254 cm (0,10 pulgadas) a aproximadamente 1,27 cm (0,5

pulgadas), o aproximadamente 0,635 cm (0,25 pulgadas). En otras realizaciones, las capas 972 pueden tener otras formas y dimensiones. En realizaciones particulares, las capas 972 pueden proporcionarse por parte de Creative Pultrusions, Inc. de 214 Industrial Lane, Alum Bank, PA 15521. En otras realizaciones, las capas 972 pueden componerse de otros tipos de materiales fabricados por pultrusión así como otros tipos de materiales compuestos incluyendo materiales tanto fabricados como materiales de compuesto dispuestos a mano. En otras realizaciones más, los métodos de fabricación de largueros de pala de turbina descritos en el presente documento pueden implementarse usando otros tipos de materiales laminados. Dichos materiales pueden incluir, por ejemplo, madera (por ejemplo, madera de balsa, contrachapado, etc.), metales (por ejemplo, aluminio, titanio, etc.) así como combinaciones de madera, metales, compuestos, etc.

Con referencia aún a la Figura 9A, la parte de larguero interior 871a incluye una parte del extremo interior 979a y una parte del extremo exterior 979b. Cada una de las partes extremas incluye una disposición de capas escalonadas 972. Por ejemplo, con referencia a la parte extrema exterior 979b, cada una de las capas 972 incluye una terminación 973 correspondiente (identificadas individualmente como terminaciones 973a-o) que se escalona en relación con terminaciones 973 adyacentes para formar proyecciones 974 y rebajes 975 correspondientes. Según la invención, las capas 972 se ahúsan hacia las terminaciones 973 en las partes extremas 979. Como se describe con mayor detalle a continuación, esta disposición de alternancia de proyecciones 974 y rebajes 975 facilita la unión de la primera parte del larguero 871a a la segunda parte de larguero 871b en una junta solapada muy eficiente con una línea de unión en zigzag.

Con referencia a continuación a la Figura 9B, la segunda parte de larguero 871b está compuesta también de una pluralidad de capas 972 que tienen terminaciones 973 que se escalonan para crear una disposición alternada de proyecciones 974 y rebajes 975 correspondientes. Como la primera parte de larguero 871a, la segunda parte de larguero 871b incluye una parte extrema interior 979c y una parte extrema exterior 979d. Como se ilustra en la Figura 9B, sin embargo, la segunda parte de larguero 871b se hace más delgada (es decir, se ahúsa en grosor) hacia la parte del extremo superior 979d. En la realización ilustrada, esto se lleva a cabo mediante la terminación sucesiva de las capas exteriores 972 cuando se extienden hacia el exterior desde la parte del extremo interior 979c. Este ahusado gradual de larguero 170b puede realizarse para reducir el peso y/o ajustar la resistencia del larguero 170b para las cargas estructurales reducidas que tienen lugar hacia la punta de la pala de turbina 110.

Con referencia a continuación a la Figura 9C, la tercera parte de larguero 871c incluye una parte extrema interior 979c y una parte extrema exterior 979f correspondiente. Como ilustra esta vista, el larguero 170b continúa ahusándose hacia la parte extrema exterior 979f mediante la finalización de diversas capas 972 cuando se aproximan a la parte extrema 979f.

Las Figuras 9D y 9E incluyen vistas laterales parcialmente esquemáticas, ampliadas, que ilustran detalles adicionales de la primera parte de larguero 871a y la segunda parte de larguero 871b configuradas de acuerdo con una realización de la divulgación. Además, estas figuras también ilustran diversas características de las partes extremas de algunas de las capas 972. Como se muestra en la Figura 9D, la parte extrema exterior 979b de la primera parte de larguero 871a incluye una pluralidad de alternancias de proyecciones 974 y rebajes 975 correspondientes formados por las terminaciones 973 escalonadas de las capas 972 respectivas. Como ilustra adicionalmente esta vista, las partes extremas de las capas 972 pueden ahusarse gradualmente hacia la terminación 973 para facilitar adicionalmente y conformar las proyecciones 974/rebajes 975 en rebajes/proyecciones que transitan gradualmente. Por ejemplo, en la realización ilustrada, los últimos 5,08 a 15,24 cm (2 a 6 pulgadas), o aproximadamente los últimos 10,16 cm (4 pulgadas) de cada capa 972 pueden tener un ahusado de doble lado (es decir, por ejemplo una capa interior 972) o un ahusado de un lado (si, por ejemplo, una capa exterior 972) hasta una terminación 973 de desde aproximadamente 0,0 cm a aproximadamente 0,18 cm (0,07 pulgadas), o aproximadamente 0,102 cm (0,04 pulgadas).

Con referencia a continuación a la Figura 9E, la parte extrema interior 979c de la segunda parte de larguero 871b incluye una pluralidad de proyecciones 974 configuradas para encajar dentro de los rebajes 975 correspondientes de la parte extrema exterior 979b de la primera parte de larguero 871a. De modo similar, la parte extrema interior 979c incluye también una pluralidad de rebajes 975 configurados para recibir proyecciones 974 correspondientes de la parte extrema exterior 979b de la primera parte de larguero 871a. Por ejemplo, durante la fabricación del larguero 170b, la primera proyección 974a sobre la parte extrema exterior 979b de la primera parte de larguero 871a se encaja dentro del primer rebaje 975a correspondiente sobre la parte extrema interior 979c de la segunda parte de larguero 871b. Aunque las partes extremas 979 respectivas se encajan juntas en esta forma durante el montaje del larguero 170b sobre el conjunto de fabricación 801 de la Figura 8A, las partes extremas coincidentes 979 no se juntan realmente en este momento, de modo que las secciones de pala 116 (Figura 8A) pueden separarse después de la fabricación y transportarse individualmente al lugar de instalación.

Como se muestra en la Figura 9F, cuando la parte extrema exterior 979b de la primera parte de larguero 871a se une finalmente a la parte extrema interior 979c de la segunda parte de larguero 871b en el lugar de instalación, la alternancia de proyecciones 974 y rebajes 975 crean una línea de unión 976 solapada o en zigzag. Como es conocido para los expertos en la materia, esta es una junta estructural muy eficiente, y puede evitar o al menos reducir la necesidad de refuerzo estructural adicional de la junta entre la primera parte de larguero 871a y la segunda parte de larguero 871b.

5 Las Figuras 10A y 10C-10E son una serie de vistas parcialmente esquemáticas de alzado lateral de una parte del conjunto de fabricación 801 de la Figura 8A, que ilustra varias etapas en un método de fabricación de larguero 170b *in situ* sobre la estructura de retícula de la pala de turbina 110 de acuerdo con una realización de la divulgación. La Figura 10B es una vista desde el extremo ampliada tomada a lo largo de la línea 10B-10B de la Figura 10A, que ilustra adicionalmente aspectos de este método de fabricación del larguero. Con referencia primero a las Figuras 10A y 10B juntas, las cuadernas 142 se han asegurado a sus puntales correspondientes 802, y se han instalado una pluralidad de elementos de retícula 143 (al menos temporalmente) entre elementos de fijación de retícula 150 correspondientes. Cada elemento de fijación de retícula 150 de la realización ilustrada incluye una primera pieza 1056a y una segunda pieza coincidente 1056b. Como se muestra en la Figura 10A, solo la primera pieza 1056a se fija a la estructura de retícula durante la construcción del larguero 170b. Como se explica con mayor detalle a continuación, después de que se hayan dispuesto apropiadamente todas las capas de larguero 772 sobre la primera pieza 1056a del elemento de fijación de retícula 150, se encaja la segunda pieza 1056b en su posición y se asegura a la primera pieza 1056a.

15 Con referencia a continuación a la Figura 10C, las capas de larguero individuales 772 se colocan secuencialmente en posición sobre la primera pieza 1056a del elemento de fijación de retícula 150 de cada cuaderna 142. Según se colocan las capas de larguero 772 una encima de otra, se posicionan las terminaciones 773 como se muestra en las Figuras 7A-7E para producir el perfil de larguero deseado. Puede aplicarse una capa de adhesivo (por ejemplo, adhesivo epoxi, adhesivo de resina termoestable, etc.) a una o ambas de las superficies coincidentes de capas adyacentes 772. Las capas de larguero 772 pueden mantenerse en su posición temporalmente durante el proceso de apilado con abrazaderas 1002 (por ejemplo abrazaderas en C y/u otras abrazaderas adecuadas conocidas en la técnica).

25 Con referencia a continuación a la Figura 10D, una vez se han dispuesto apropiadamente todas las capas 772 sobre las primeras piezas 1056a de los elementos de fijación de retícula 150, las capas 772 pueden comprimirse durante el ciclo de curado adhesivo usando una herramienta de prensado adecuada, tal como el aparato de compresión 1090 descrito con mayor detalle a continuación. Más particularmente, pueden posicionarse una pluralidad de aparatos de compresión 1090 sobre la parte de larguero 871 entre las cuadernas 142 para comprimir las capas 972 juntas durante el proceso de curado. El aparato de compresión 1090 se describe con mayor detalle a continuación con referencia a las Figuras 12A-15.

35 Con referencia a continuación a la Figura 10E, una vez ha curado el adhesivo entre las capas 972, las segundas piezas 1056b de cada uno de los elementos de fijación de retícula 150 pueden instalarse sobre la estructura de retícula y unirse a las primeras piezas 1056a correspondientes con fijadores roscados y/u otros métodos adecuados. En una realización, puede aplicarse adhesivo entre las superficies coincidentes de la primera pieza 1056a y la parte de larguero 871, y/o la segunda pieza 1056b y la parte de larguero 871, para unir la parte de larguero 871 a los elementos de fijación de retícula 150 respectivos. En otras realizaciones, puede omitirse dicho adhesivo.

40 La Figura 11A es una vista isométrica ampliada de una parte de la estructura de retícula de la pala de turbina 110, y la Figura 11B es una vista del extremo de una cuaderna 142 representativa que ilustra aspectos de los largueros 170 instalados. En una realización, la segunda pieza 1056b del elemento de fijación de retícula 150 puede coincidir con la primera pieza 1056a deslizando la segunda pieza 1056b lateralmente dentro del recorte 148. Para este procedimiento, las partes extremas de los elementos de retícula 143 pueden separarse temporalmente de las partes de fijación de retícula 1154 correspondientes del elemento de fijación de retícula 150. Una vez ambas piezas 1056 del elemento de fijación de retícula 150 están en sus posiciones respectivas, las partes extremas de los elementos de retícula 143 pueden volverse a unir a las partes de fijación de retícula 1154. En una realización, las partes extremas de los elementos de retícula 143 y las partes de fijación de retícula 1154 correspondientes pueden taladrarse como piloto a un tamaño inferior, y entonces taladrarse a tamaño completo durante el montaje final. Más aún, las partes extremas de los elementos de retícula 143 puede fijarse a las partes de fijación de retícula 1154 mediante fijadores 859 que se congelan antes de la instalación en los orificios de fijadores correspondientes de modo que se expanden para encajar a presión después de la instalación. En otras realizaciones, los elementos de retícula 143 pueden fijarse a los elementos de fijación de retícula 150 usando otros métodos adecuados conocidos en la técnica.

55 La Figura 11C es una vista isométrica parcialmente esquemática de una parte del conjunto de fabricación 801 después de que el larguero 170b se haya ensamblado completamente e instalado sobre la estructura de retícula de la pala de turbina 110. Con referencia a las Figuras 11A y 11C en conjunto, aunque las partes extremas coincidentes 979 de la segunda parte de larguero 871b y la tercera parte de larguero 871c se ensamban en su lugar para asegurar que encajan limpiamente juntas durante el montaje final, las partes extremas 979 no se unen durante la fabricación de la retícula. Esto permite que la segunda sección de pala 116b y la tercera sección de pala 116c se separen entre sí en la instalación de fabricación para su transporte al lugar de instalación. En consecuencia, en la realización ilustrada, las partes extremas 979 de las partes de larguero 871 no se unen durante el proceso de fabricación, sino que en su lugar forman juntas de separación 1120 en donde los largueros 170 se unirán cuando la pala de turbina 110 se ensamble en el sitio. En una realización, los largueros pueden unirse en el sitio. Los segmentos de pala pueden transportarse al sitio.

65 La Figura 12A es una vista isométrica del aparato de compresión 890 configurado de acuerdo con una realización de

la divulgación, y la Figura 12B es una vista isométrica parcialmente despiezada del aparato de compresión 1090. Con referencia a las Figuras 12A y 12B en conjunto, el aparato de compresión 1090 incluye una primera parte de herramienta 1250a y una segunda parte de herramienta 1250b. En la realización ilustrada, las partes de herramienta 1250 presentan imágenes especulares entre sí, o son al menos muy similares entre sí. Cada parte de herramienta 5 1250 incluye una placa de soporte 1254 y rebordes laterales en oposición 1256 (identificados individualmente como un primer reborde lateral 1256a y un segundo reborde lateral 1256b) que se extienden desde la misma. Como se describe con mayor detalle a continuación, las partes de herramienta 1250 se configuran para encajar juntas en una disposición de cuchara alrededor de una parte del larguero laminado 170 para compactar y comprimir las capas de larguero (por ejemplo, las capas 772) juntas mientras cura el adhesivo entre las capas. Particularmente, cada una de 10 las partes de la herramienta 1250 incluye uno o más elementos expandibles 1258 configurados para expandirse al interior desde la placa de soporte 1254 para comprimir de ese modo la sección de larguero correspondiente durante el proceso de curado. En la realización ilustrada, el primer reborde lateral 1256a es en alguna forma más ancho que el segundo reborde lateral 1256b, de modo que los rebordes coincidentes 1256 pueden solaparse y mantenerse temporalmente juntos con fijadores 1252 (por ejemplo, fijadores roscados, tales como pernos, tornillos, etc.) durante el proceso de compresión y curado. Cada parte de la herramienta 1250 puede incluir también una primera parte 15 extrema 1261 y una segunda parte extrema en oposición 1262. Puede proporcionarse asas 1253 sobre las partes extremas 1261 y 1262 para facilitar la colocación manual, instalación y/o retirada de las partes de las herramientas 1250. Las partes de herramienta 1250 pueden fabricarse a partir de varios materiales que tengan suficiente resistencia, rigidez, y características de fabricación. Por ejemplo, en una realización, las partes de herramienta 1250 pueden formarse a partir de aluminio que se mecaniza, suelda, o se conforma de otra manera en la forma deseada. En otras realizaciones, las partes de herramienta 1250 pueden fabricarse a partir de otros metales adecuados incluyendo acero, latón, etc., así como materiales no metálicos adecuados tales como materiales compuestos.

La Figura 13A es una vista isométrica despiezada de la primera parte extrema 1261 de la primera parte de herramienta 1250a, y la Figura 13B es una vista isométrica ampliada de la segunda parte extrema 1262. Con referencia primero a la Figura 13A, cada parte de herramienta 1250 incluye un colector 1360 para llenado y vaciado de los elementos expandibles 1258 con un fluido (por ejemplo, aire comprimido). En la realización ilustrada, se extiende un conducto 1368 (identificados individualmente como los conductos 1368a-c) entre cada elemento expandible 1258 y un accesorio 1366 de llenado/drenaje. El accesorio 1366 de llenado/drenaje puede incluir un orificio roscado 1370 u otra 30 característica (por ejemplo, un acoplamiento de aire de alta presión) configurado para recibir un accesorio correspondiente para el fluido que fluye dentro de los elementos expandibles 1258 respectivos a través de los conductos 1368. En una realización, por ejemplo, los elementos expandibles 1258 pueden llenarse con aire comprimido para inflar los elementos expandibles 1258 y comprimir de ese modo las capas de larguero 170 juntas durante el ciclo de curado. En otras realizaciones, los elementos expandibles 1258 pueden llenarse con otros tipos de gases o líquidos (por ejemplo, agua, aceite, etc.) para inflar los elementos expandibles 1258 y comprimir juntas las 35 capas de larguero.

Las partes extremas proximales de los elementos expandibles 1258 pueden incluir un cierre en el extremo 1364 para sellar el elemento expandible 1258 y mantener la presión. En la realización ilustrada, los cierres extremos 1364 pueden 40 incluir dos o más placas que emparedan la parte extrema del elemento expandible 1258 entre las mismas para impedir fugas. En otras realizaciones, pueden usarse otras estructuras y sistemas para sellar las partes del extremo proximal de los elementos expandibles 1258. Como se muestra en la Figura 13B, las partes extremas distales de los elementos expandibles 1258 pueden cerrarse y sellarse con una placa de cierre 1365 extrema adecuada que se fija a la placa de soporte 1254 con una pluralidad de fijadores 1352. En otras realizaciones, las partes extremas de los elementos 45 expandibles 1258 pueden asegurarse a la parte de herramienta 1250 y/o cerrarse y sellarse usando otros medios adecuados.

La Figura 14A es una vista isométrica ampliada de la segunda parte de herramienta 1250b, y la Figura 14B es una vista isométrica parcialmente en despiece de la segunda parte de herramienta 1250b. Con referencia a la Figura 14B, cada uno de los elementos expandibles 1258 puede incluir una estructura tubular flexible compuesta de una capa exterior 1430 y una capa interior 1432. La capa exterior 1430 puede incluir un material adecuado para proporcionar resistencia al elemento expandible 1258, y la capa interior 1432 puede incluir un material adecuado para sellado del elemento expandible 1258. Por ejemplo, la capa de sellado interior 1432 puede incluir un revestimiento de goma, y la 50 capa exterior 1430 puede incluir nilón tejido, fibra de vidrio, etc. En consecuencia, en una realización, el elemento expandible 1258 puede incluir una estructura que sea al menos generalmente similar en estructura y función a una manguera de incendios. En otras realizaciones, los elementos expandibles 1258 pueden incluir otros materiales y tener otras estructuras.

La Figura 15 es una vista desde el extremo ampliada tomada sustancialmente a lo largo de la línea 15-15 en la Figura 10D que ilustra el uso del aparato de compresión 1090 de acuerdo con una realización de la divulgación. En esta vista, las capas de larguero 972 se han posicionado apropiadamente sobre la subestructura de retícula, con adhesivo de unión entre las capas. La primera parte de herramienta 1250a se ha posicionado sobre un lateral del larguero 170, y la segunda parte de herramienta 1250b se ha posicionado en el otro lado. Cada primer reborde 1256a de cada parte de herramienta 1250 se solapa con la segunda parte de reborde 1256b correspondiente de la parte de herramienta 60 opuesta 1250. Una vez se han posicionado apropiadamente las dos partes de herramienta 1250, las partes de herramienta 1250 se fijan temporalmente con fijadores 1252. Se conecta entonces una fuente de presión (por ejemplo, 65

una fuente de aire comprimido) al colector 1360 sobre cada parte de herramienta 1250, y los elementos expandibles 1258 se inflan a una presión suficiente. Cuando se expanden, los elementos expandibles 1258 proporcionan una presión uniforme, distribuida sobre el larguero laminado 170. La presión puede modularse según se requiera para proporcionar un nivel deseado de compactación y compresión durante el proceso de curado. Más aún, pueden envolverse una bolsa de vacío adecuada u otra película delgada como capa protectora alrededor de larguero 170 para evitar tener adhesivo sobre la parte de compresión 1090. Después de que larguero 170 se haya curado adecuadamente, el aparato de compresión 1090 puede desmontarse liberando la presión en los elementos expandibles 1258 y retirando los fijadores 1252.

Los métodos y sistemas descritos en detalle anteriormente pueden usarse para ensamblar un larguero de pala de turbina eólica in situ sobre un subconjunto de fabricación de acuerdo con realizaciones de la divulgación. Más particularmente, varias realizaciones de la divulgación se han descrito en detalle anteriormente para largueros laminados fabricados usando materiales de compuesto realizados por pultrusión, tales como "tablones" de compuesto hechos por pultrusión. Hay un cierto número de ventajas asociadas con algunas de estas realizaciones. Estas ventajas pueden incluir, por ejemplo, menor coste y menor peso de palas de turbina eólica en comparación con técnicas de fabricación convencional. Más aún, el uso de pultrusiones puede reducir las variaciones dimensionales de las partes acabadas.

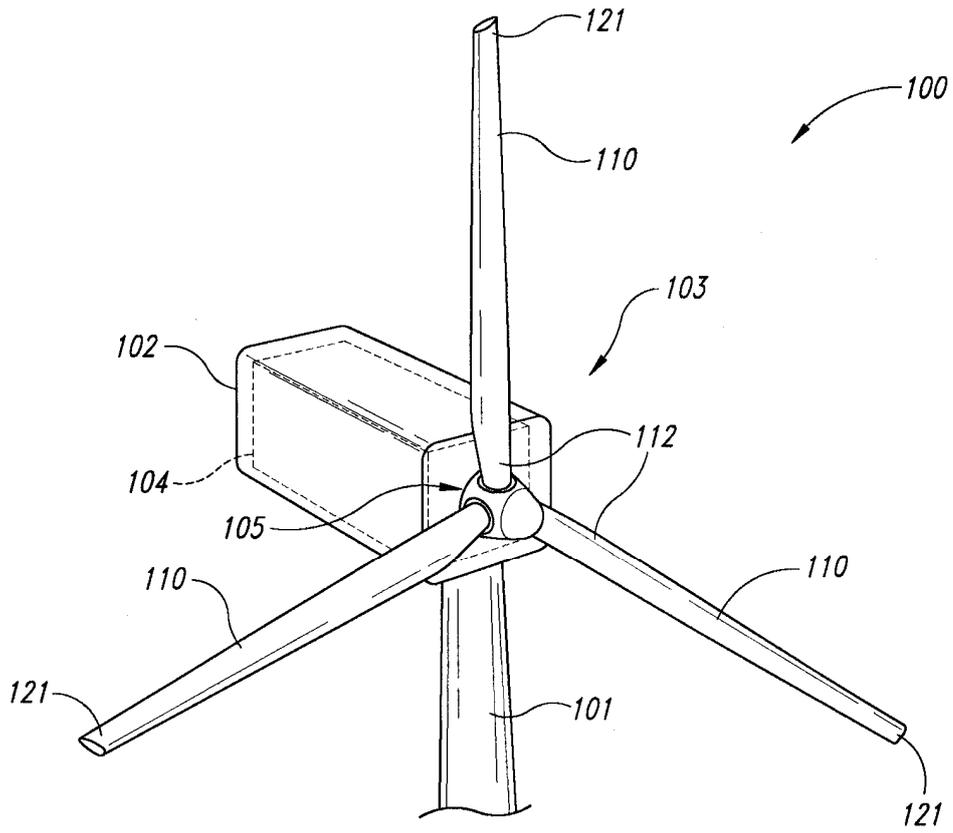
En ciertas realizaciones, otras estructuras de pala de turbina, tales como revestimientos exteriores, cuadernas, elementos de retícula, etc. pueden formarse a partir de materiales de compuesto por pultrusión. Por ejemplo, en una realización los revestimientos pueden formarse a partir de uno o más elementos de compuesto por pultrusión (por ejemplo, chapas) que se laminan juntas. En otras realizaciones, los elementos de retícula pueden formarse a partir de pultrusiones de compuesto. En consecuencia, los métodos y sistemas divulgados en el presente documento para la formación de estructuras de pala de turbina a partir de materiales por pultrusión no están limitados al uso con largueros de pala de turbina o cabezas de larguero, sino que pueden usarse para formar otras estructuras de pala de turbina.

En otras realizaciones, sin embargo, los largueros de pala de turbina y/u otras estructuras de pala, tales como los largueros 170 descritos en el presente documento, pueden fabricarse a partir de materiales de compuesto por pultrusión usando una herramienta de producción adecuada. La Figura 16, por ejemplo, ilustra una herramienta 1610 que tiene una superficie de molde 1612 con un contorno apropiado para el larguero 170b. Para fabricar el larguero 170b sobre la herramienta 1610, se posicionan secuencialmente las capas 972 (por ejemplo, tableros por pultrusión) sobre la superficie del molde 1612. Pueden usarse pasadores de fabricación 1614 y/u otros indicadores para posicionar con precisión las capas 972. Las capas 972 pueden recortarse a las longitudes apropiadas de modo que cuando se disponen sobre la superficie de la herramienta 1612, las partes extremas 979 respectivas forman la junta en zigzag deseada o dedos solapados. Aunque no se usa un adhesivo entre partes extremas 979 coincidentes en este momento, cada capa 972 se cubre con adhesivo previamente a la instalación sobre la herramienta 1610. Después de que se hayan colocado todas las capas 972 sobre la superficie de la herramienta 1612, la disposición puede embolsarse en vacío para extraer el aire del laminado y comprimir las capas 972 juntas. El larguero puede curarse a temperatura ambiente, o puede aplicarse calor por medio de una autoclave u otros medios si se desea para el adhesivo particular usado.

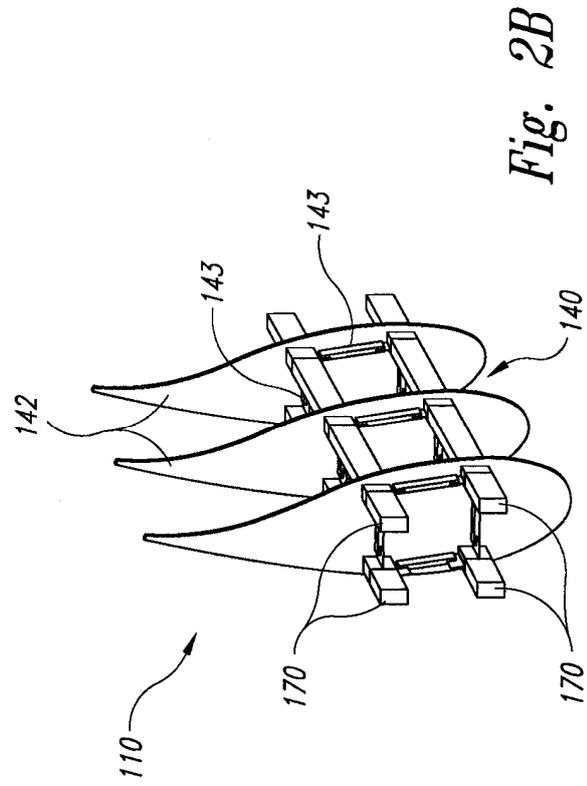
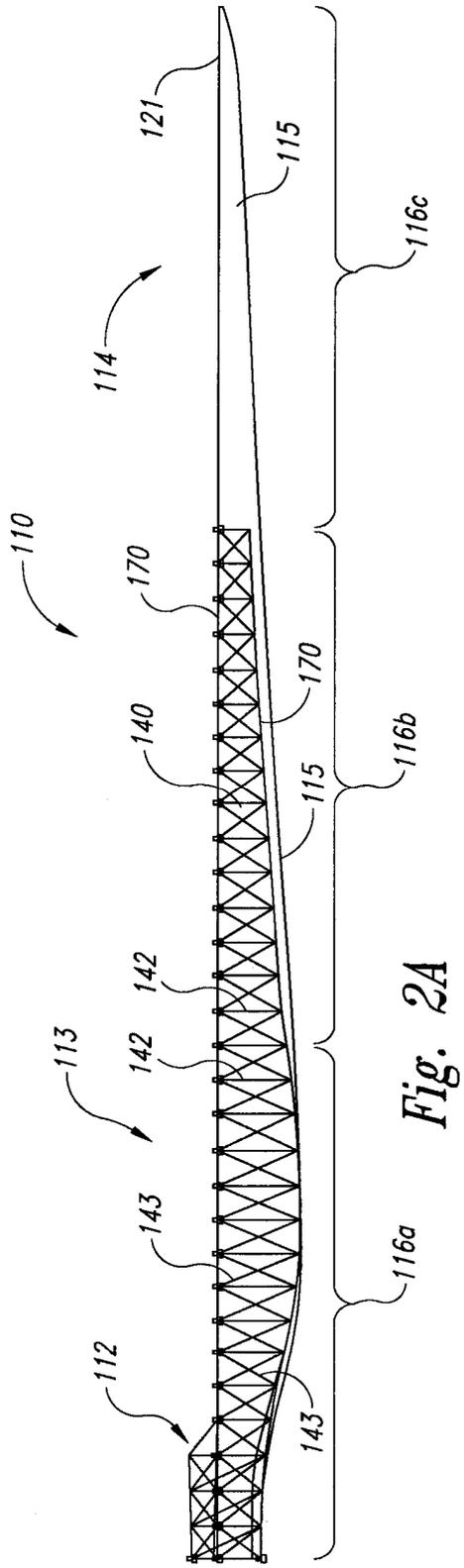
A partir de lo anterior, se apreciará que se han descrito en el presente documento realizaciones específicas con finalidades de ilustración, pero que la invención podría incluir asimismo otras realizaciones. Por ejemplo, las características descritas anteriormente con referencia a la Figura 7A en el contexto de cuatro largueros que se extienden en el sentido de la envergadura puede aplicarse a palas de turbina eólica que tengan otro número de largueros, incluyendo tres largueros. Además, las estructuras de retícula descritas anteriormente pueden tener disposiciones distintas a las específicamente mostradas en las figuras. Las fijaciones entre largueros, cuadernas, y elementos de retícula pueden tener disposiciones distintas a las descritas anteriormente. Ciertos aspectos de la divulgación descrita en el contexto de realizaciones particulares pueden combinarse o eliminarse en otras realizaciones. Adicionalmente, aunque se han descrito las ventajas asociadas con ciertas realizaciones en el contexto de esas realizaciones, otras realizaciones podrían presentar también dichas ventajas, y no todas las realizaciones necesitan presentar necesariamente dichas ventajas para caer dentro del alcance de la divulgación.

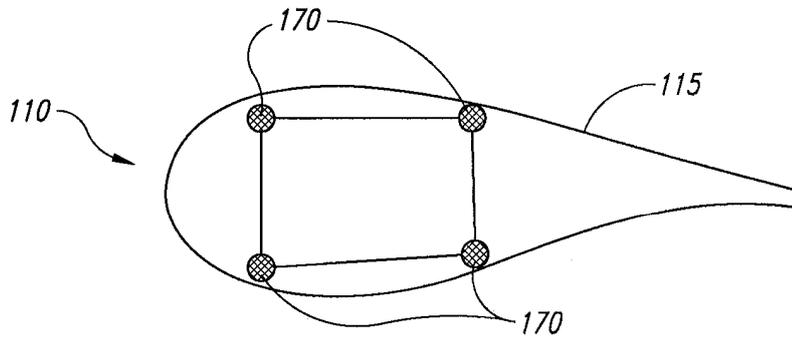
**REIVINDICACIONES**

1. Una pala de turbina eólica (110), que comprende:
- 5 una superficie aerodinámica externa (115) que tiene un eje en el sentido de la envergadura que se extiende longitudinalmente, un eje en el sentido de la cuerda que se extiende transversal al eje en el sentido de la envergadura, y un eje del grosor que se extiende transversal a los ejes tanto en el sentido de la cuerda como en el sentido de la envergadura; y
- 10 una pluralidad de largueros que se extienden longitudinalmente (170) que proporcionan soporte interno para la superficie aerodinámica (115), en la que al menos uno de los largueros incluye un laminado de material compuesto pre-curado, incluyendo el laminado de material compuesto pre-curado:
- 15 una pluralidad de capas de compuesto pre-curado apiladas (972) y una pluralidad de capas adhesivas interpuestas entre capas de compuesto pre-curado adyacentes (972); y
- el larguero se ahúsa hacia una parte extrema exterior (979f) mediante la finalización de diversas capas (972) de las capas de compuesto pre-curado cuando se aproximan a la parte extrema exterior.
- 20 2. La pala de turbina eólica de la reivindicación 1 en la que cada una de las capas de compuesto pre-curado (972) incluye un producto de resina reforzada por fibra pre-curada.
3. La pala de turbina eólica de la reivindicación 1 en la que cada una de las capas de compuesto pre-curado incluye una pultrusión de compuesto pre-curado.
- 25 4. La pala de turbina eólica de la reivindicación 1, en la que la superficie aerodinámica (115) define una sección transversal aerodinámica, en la que la pluralidad de largueros que se extienden longitudinalmente (170) incluye un larguero de presión (170b) y un larguero de succión (170a) espaciados entre sí a lo largo del eje del grosor, y un larguero posterior espaciado respecto a ambos largueros de presión y de succión a lo largo del eje en el sentido de la cuerda, y en el que cada uno de los largueros de presión, succión y posterior se componen de un laminado de pultrusiones de compuesto pre-curado (972).
- 30 5. La pala de turbina eólica de la reivindicación 1, que comprende además una pluralidad de cuadernas espaciadas longitudinalmente (172), y en la que el al menos un larguero (170) se une a las cuadernas.
- 35 6. La pala de turbina eólica de la reivindicación 1, que comprende además una tira (177) fijada circunferencialmente alrededor de la pluralidad de capas de compuesto pre-curado (972).
- 40 7. La pala de turbina eólica de la reivindicación 1, que comprende además:
- una pluralidad de cuadernas longitudinalmente espaciadas (142); y
- 45 una pluralidad de elementos de fijación de retícula (150), en la que cada uno de los elementos de fijación de retícula incluye una primera pieza (156a) y una segunda pieza correspondiente (156b), en la que cada una de las primeras piezas se fijan a la segunda pieza correspondiente para fijar una parte de las capas de compuesto pre-curado (972) juntas entre las mismas, y en la que al menos una de la primera pieza y la segunda pieza de cada elemento de fijación de retícula se une a una de las cuadernas espaciadas longitudinalmente.
- 50

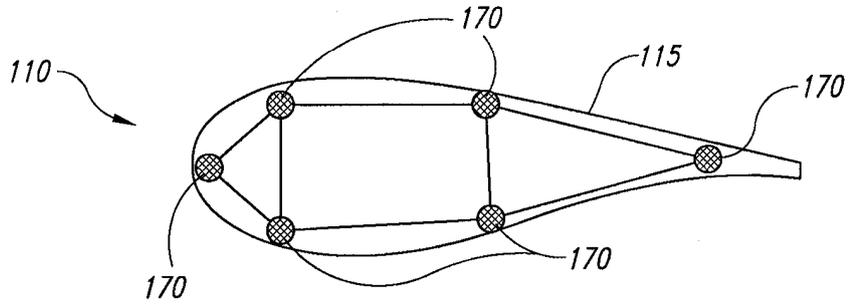


*Fig. 1*

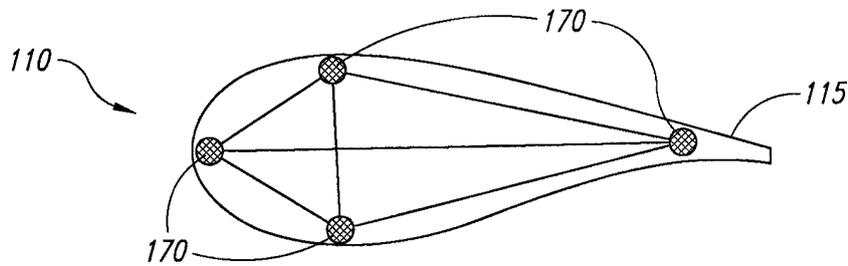




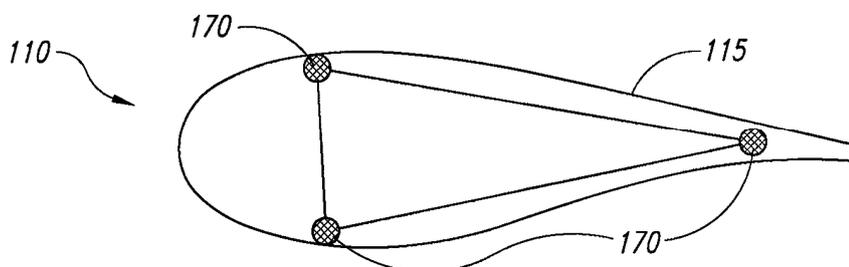
*Fig. 2C*



*Fig. 2D*



*Fig. 2E*



*Fig. 2F*

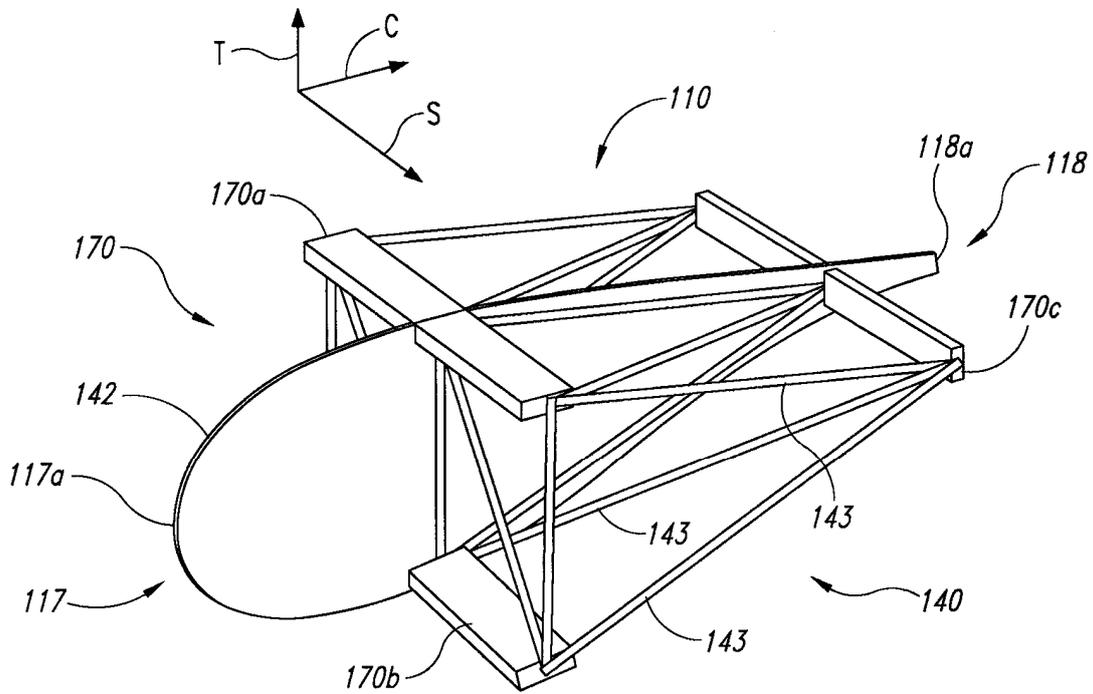


Fig. 3

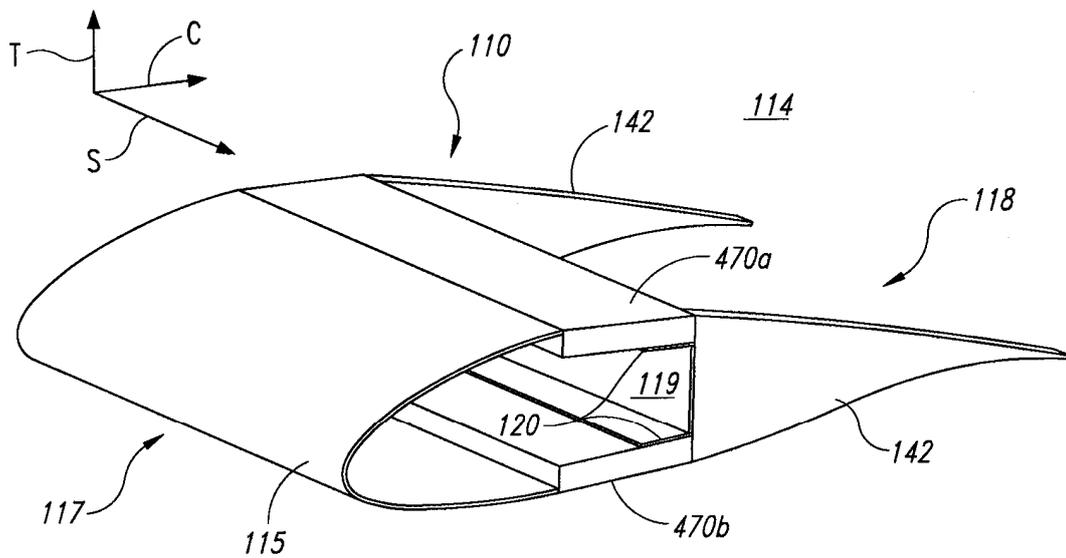
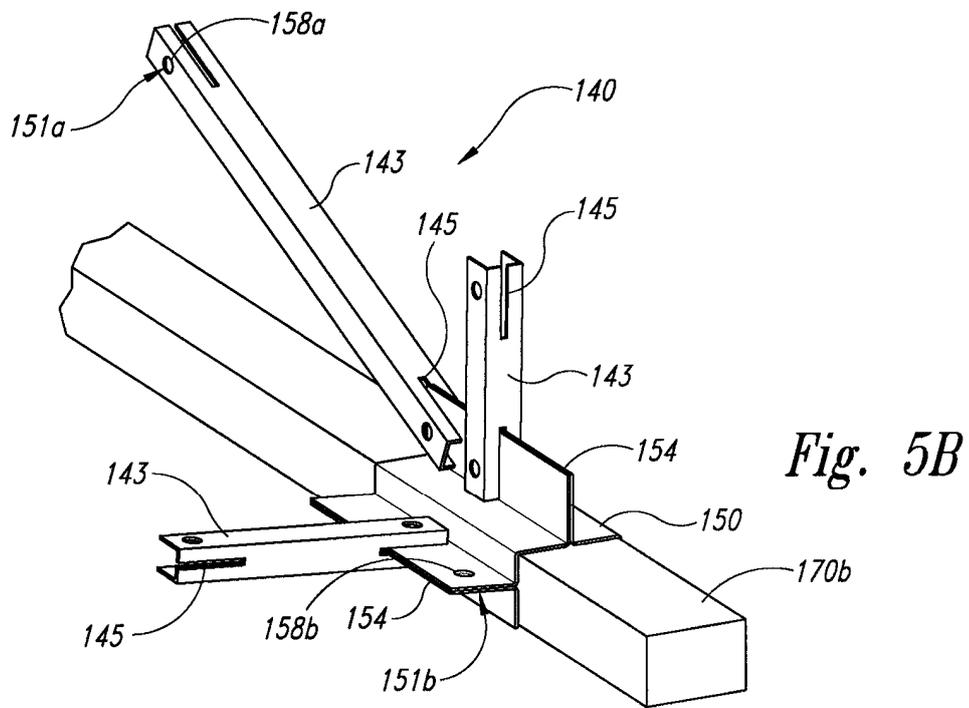
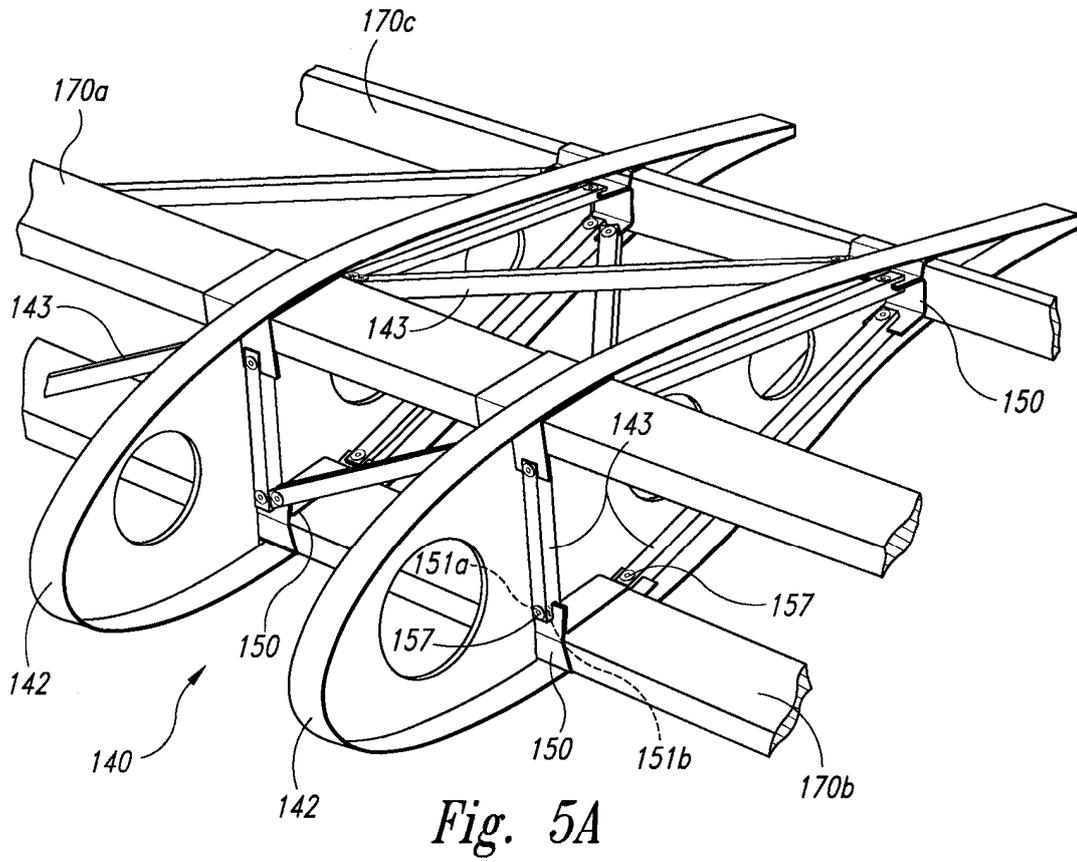
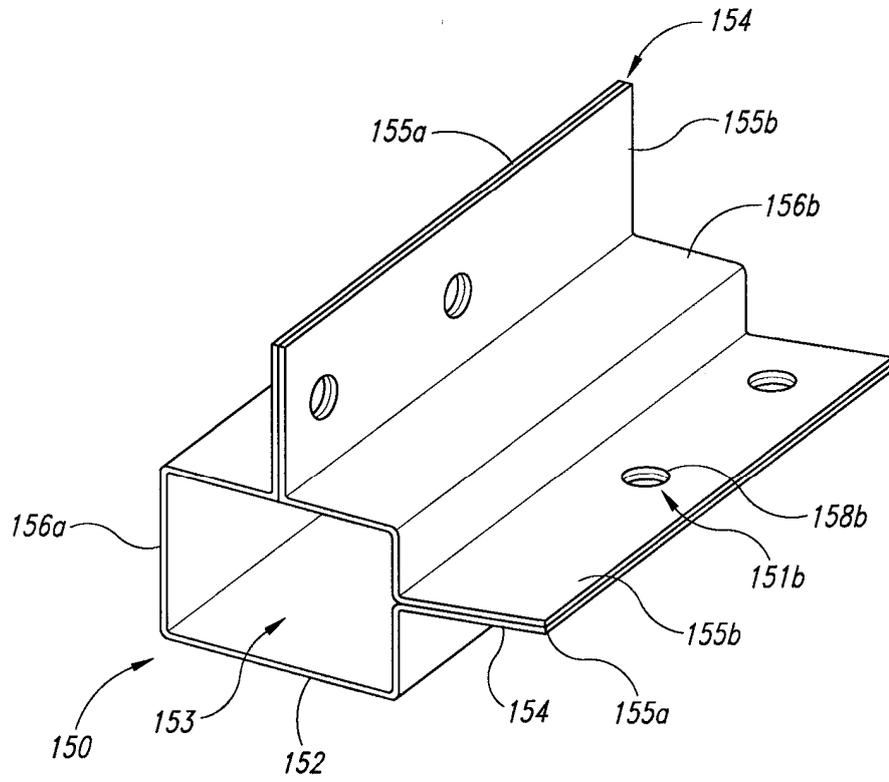
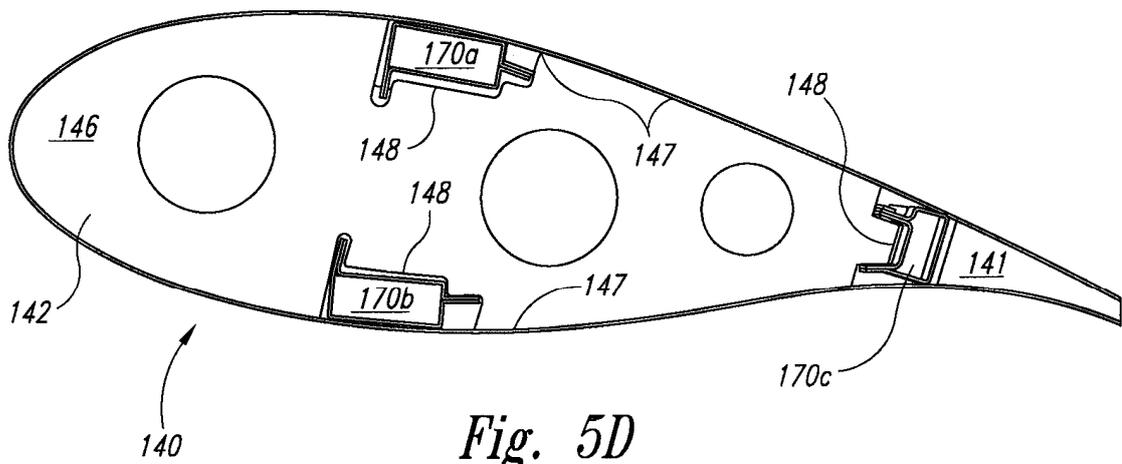


Fig. 4

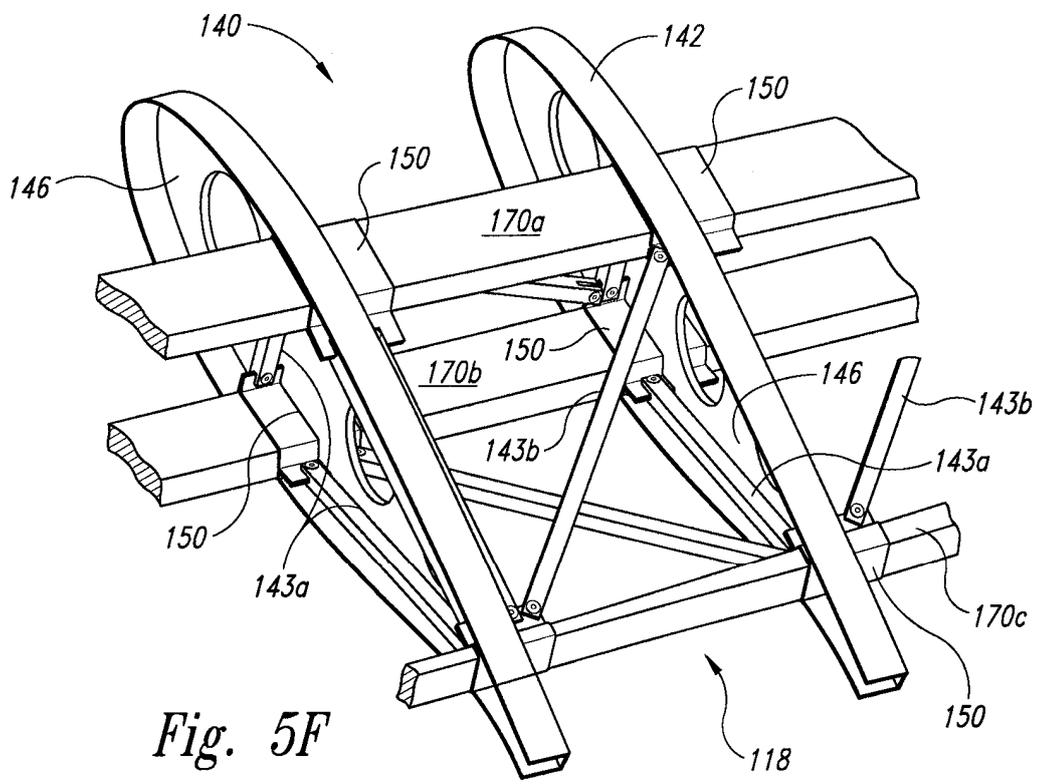
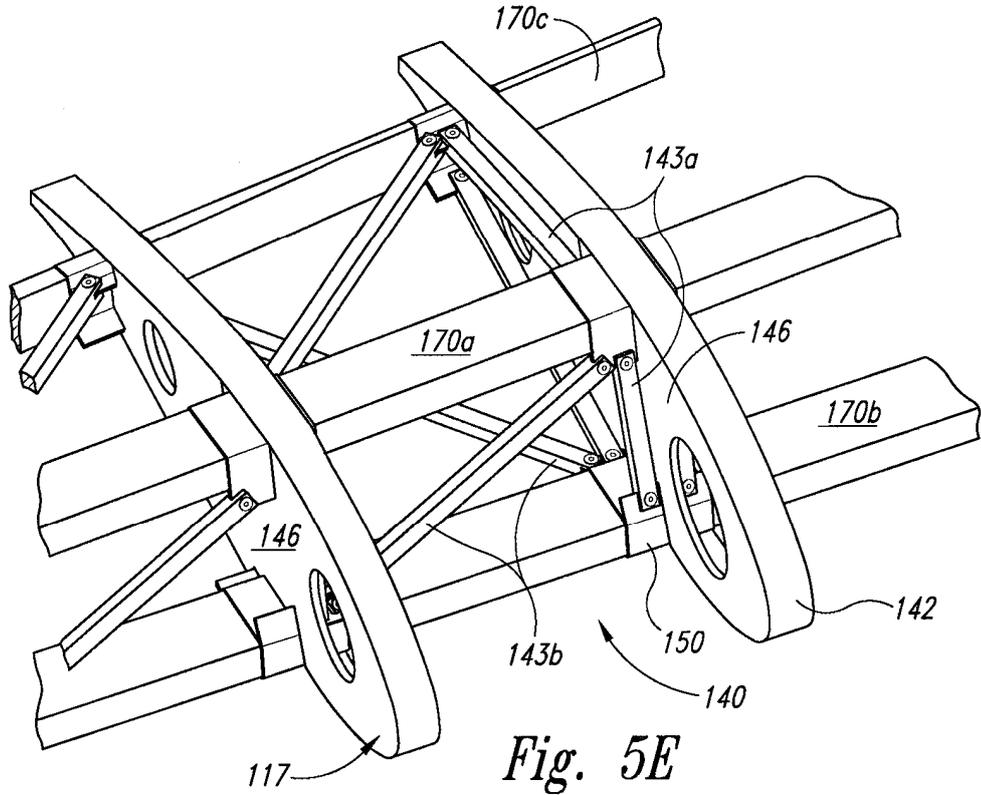




*Fig. 5C*



*Fig. 5D*



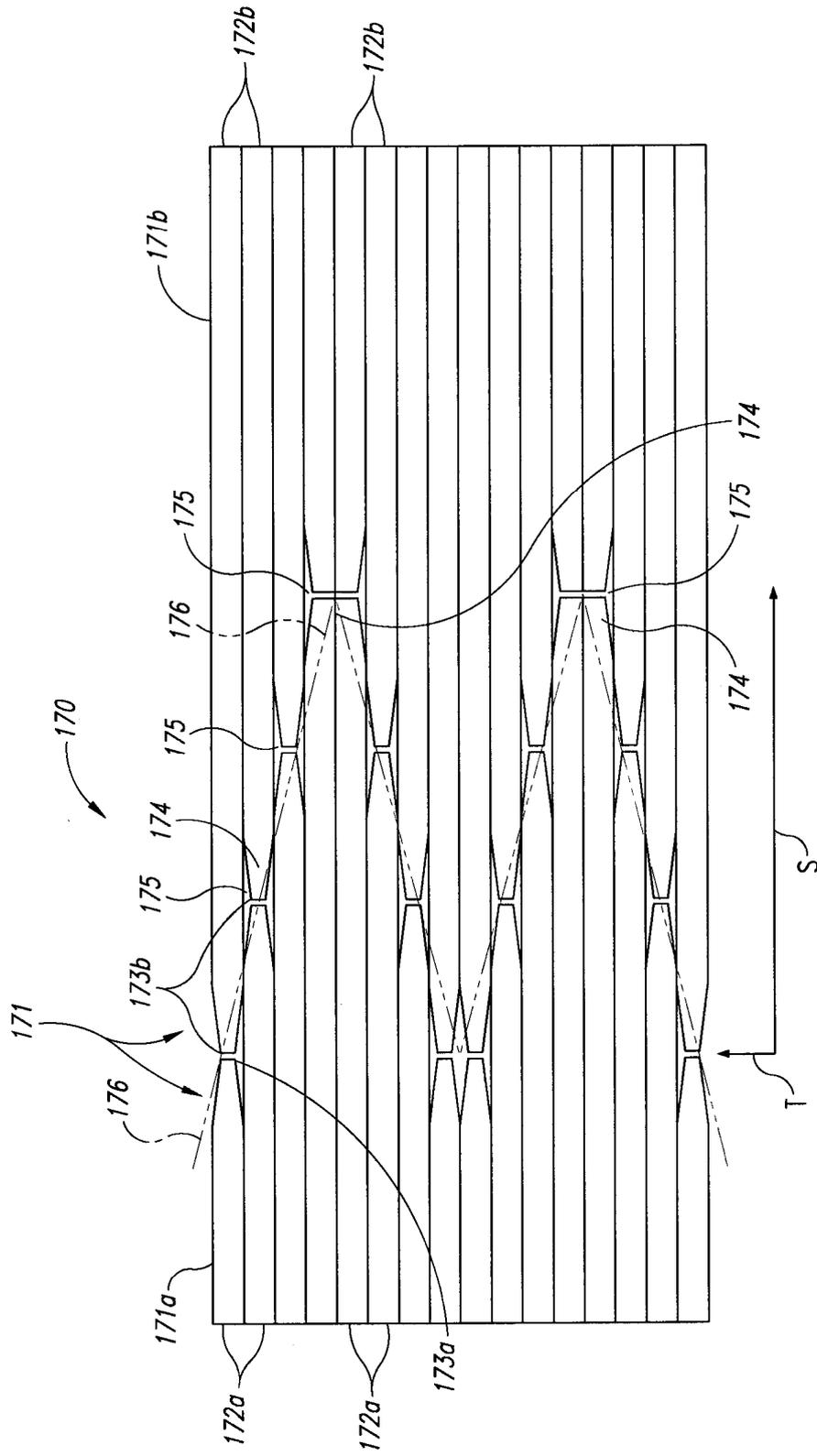
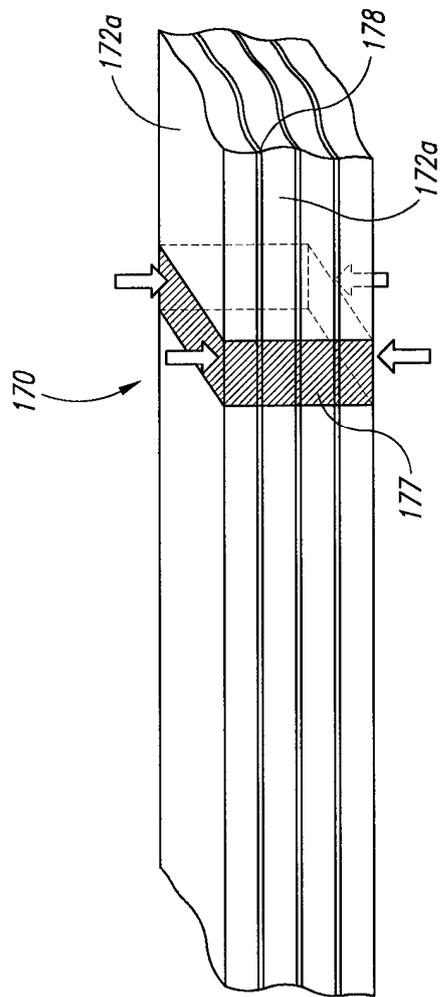
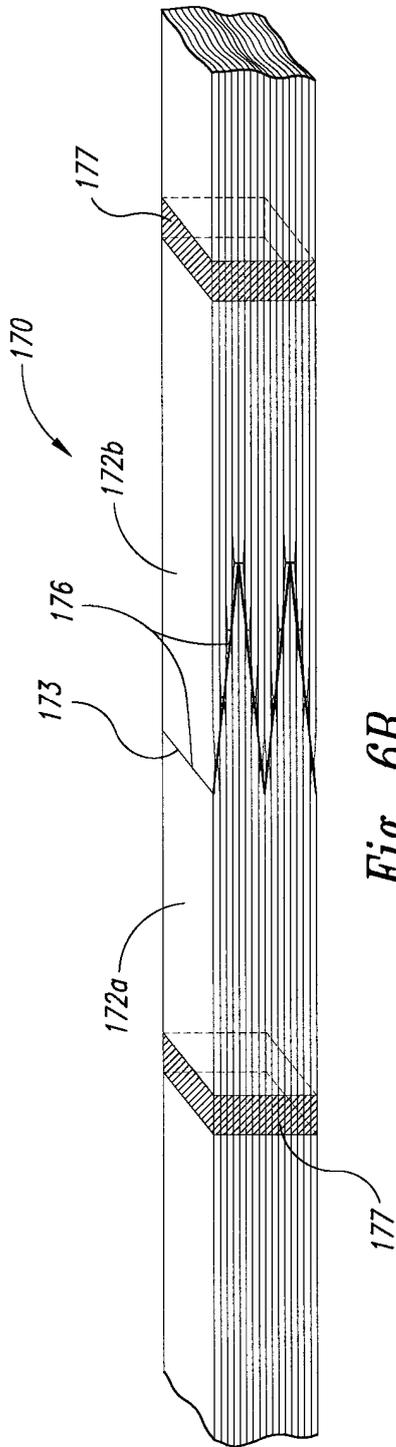
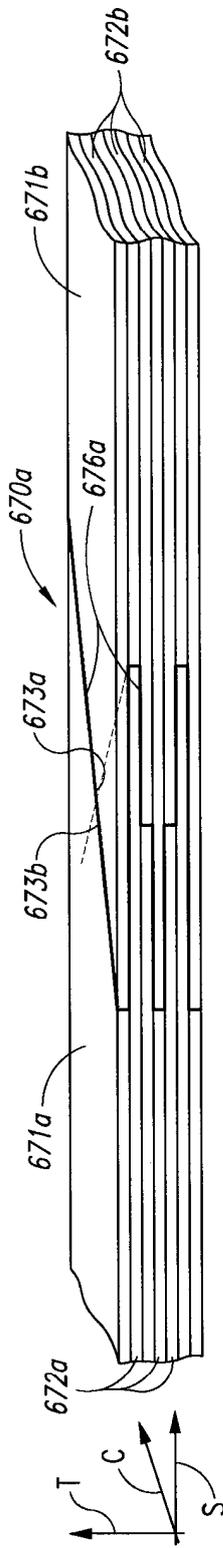
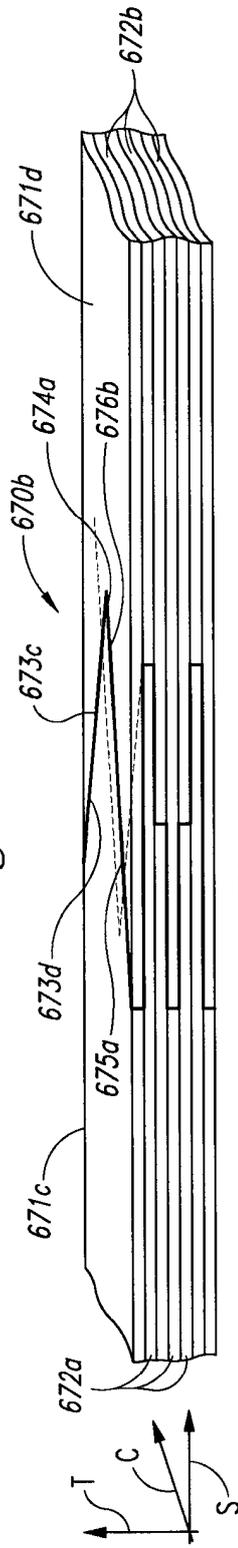


Fig. 6A

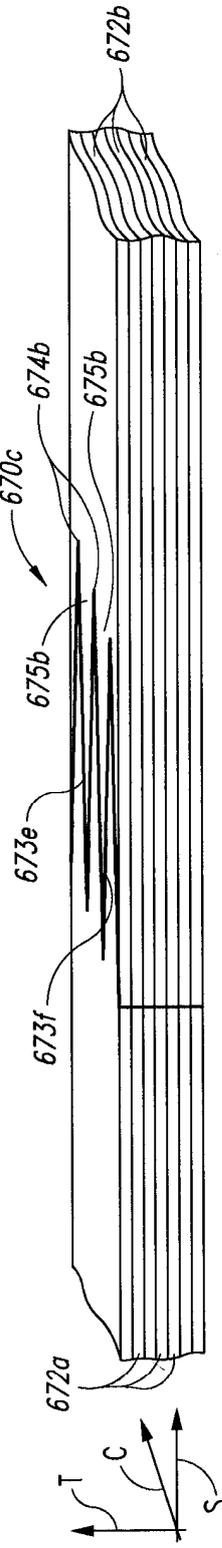




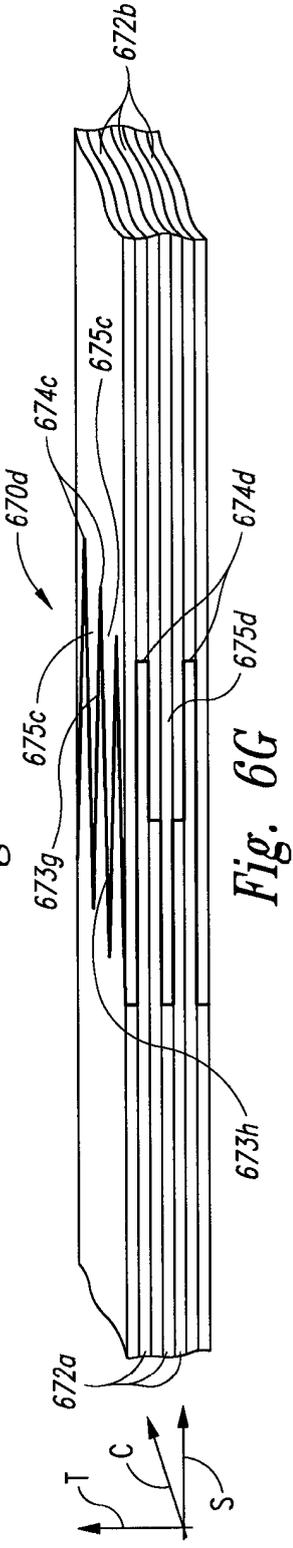
*Fig. 6D*



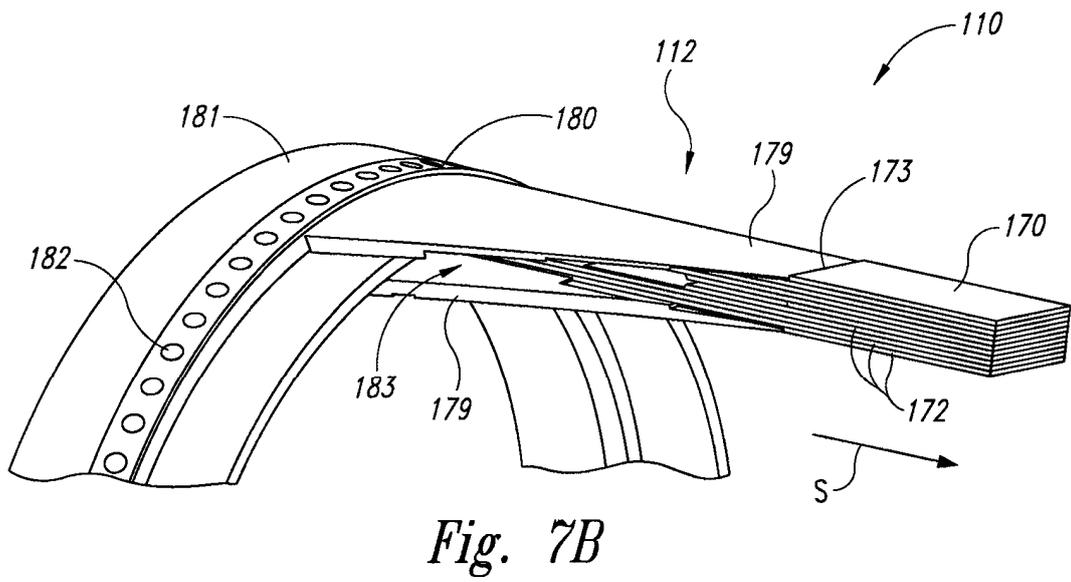
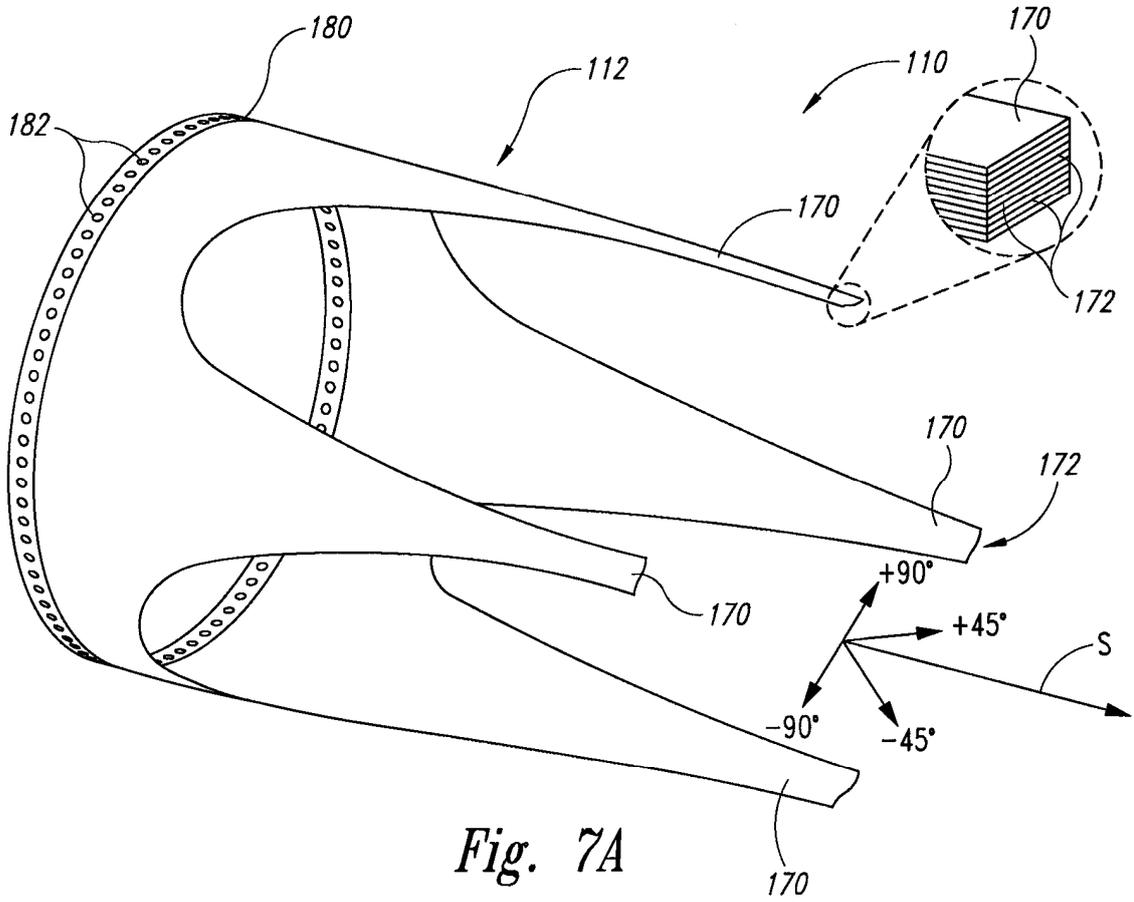
*Fig. 6E*

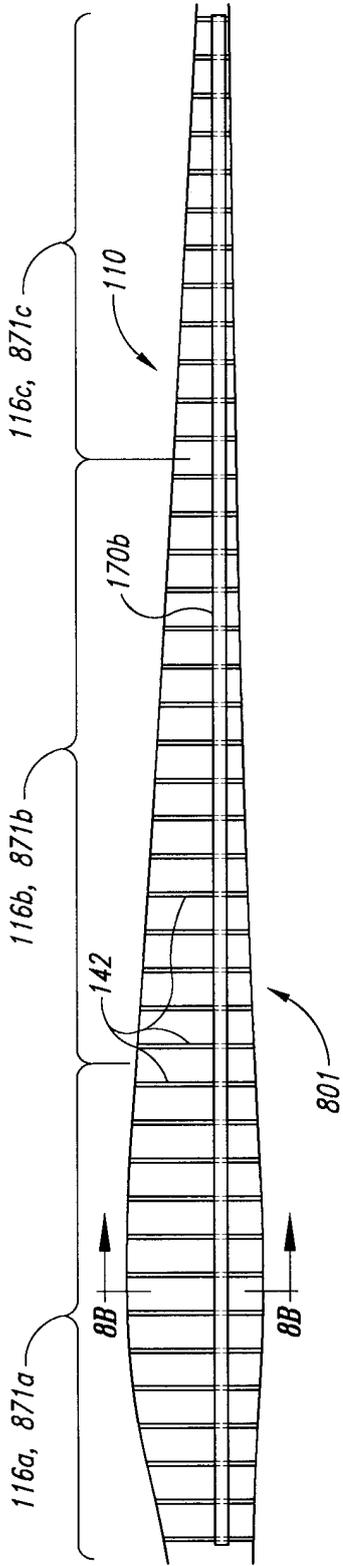


*Fig. 6F*

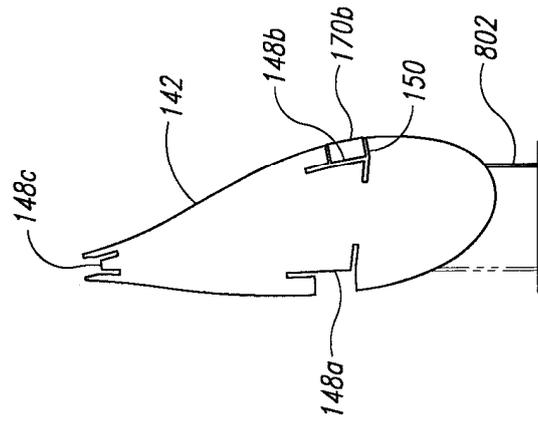


*Fig. 6G*





*Fig. 8A*



*Fig. 8B*

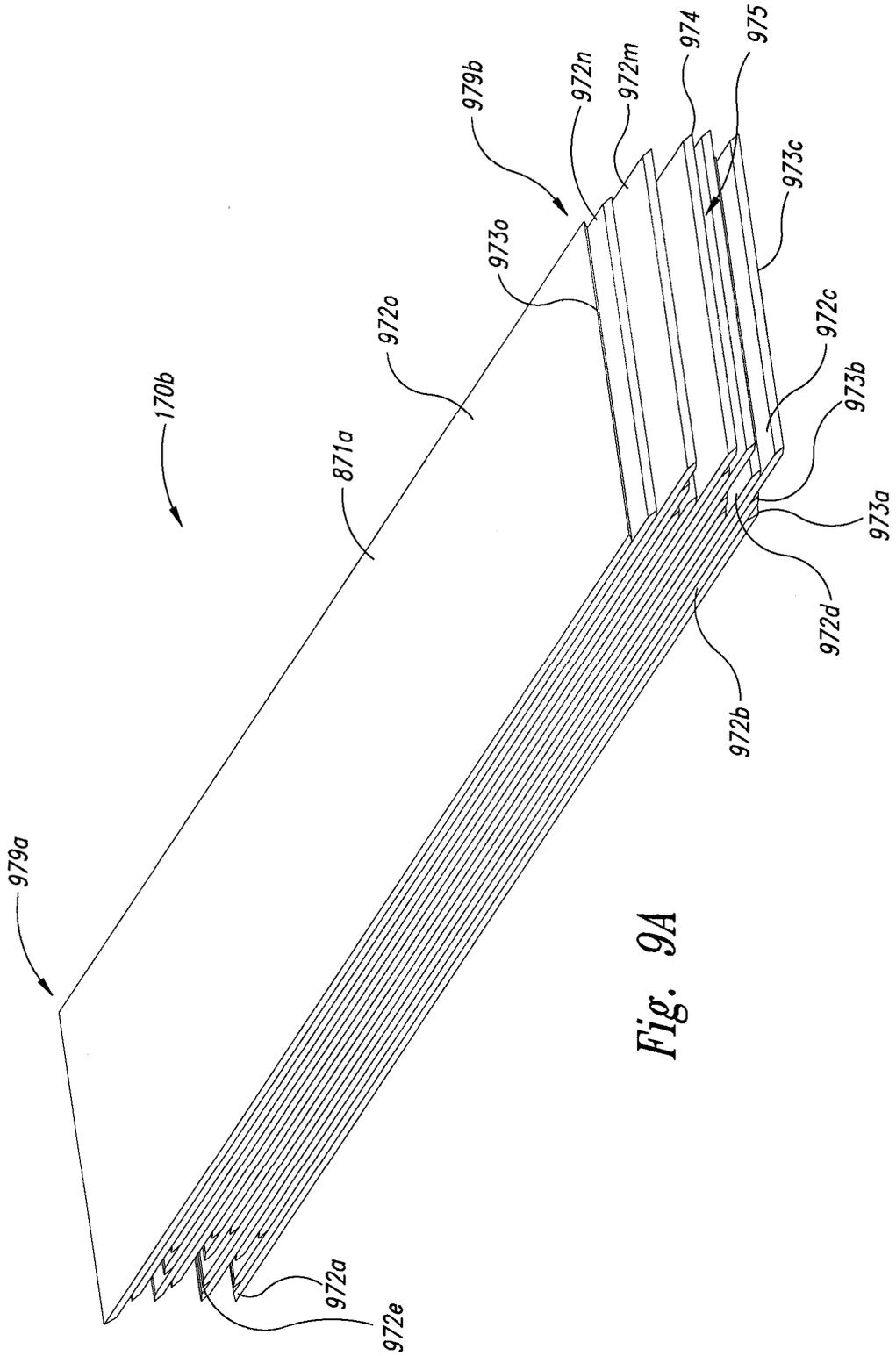
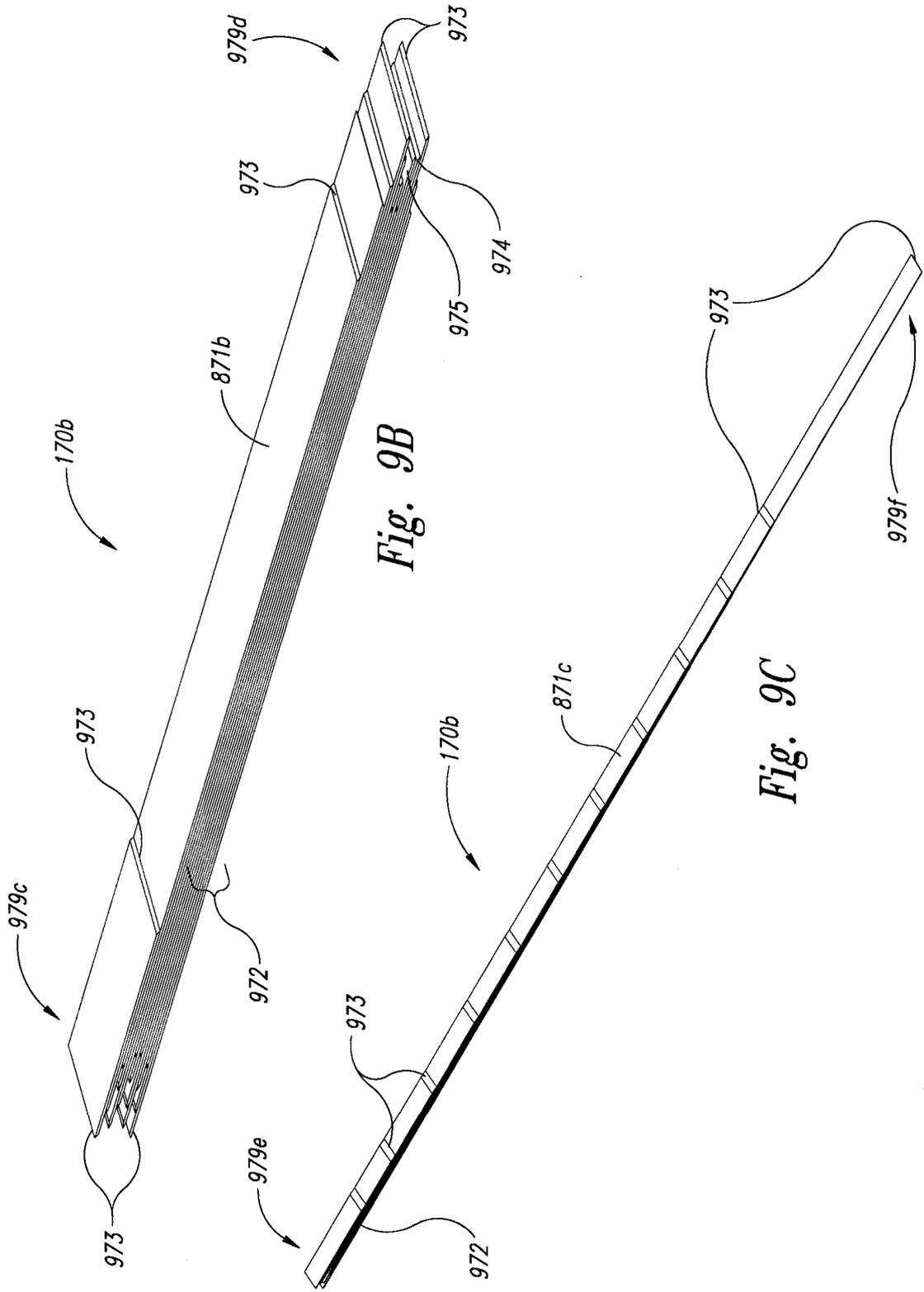


Fig. 9A



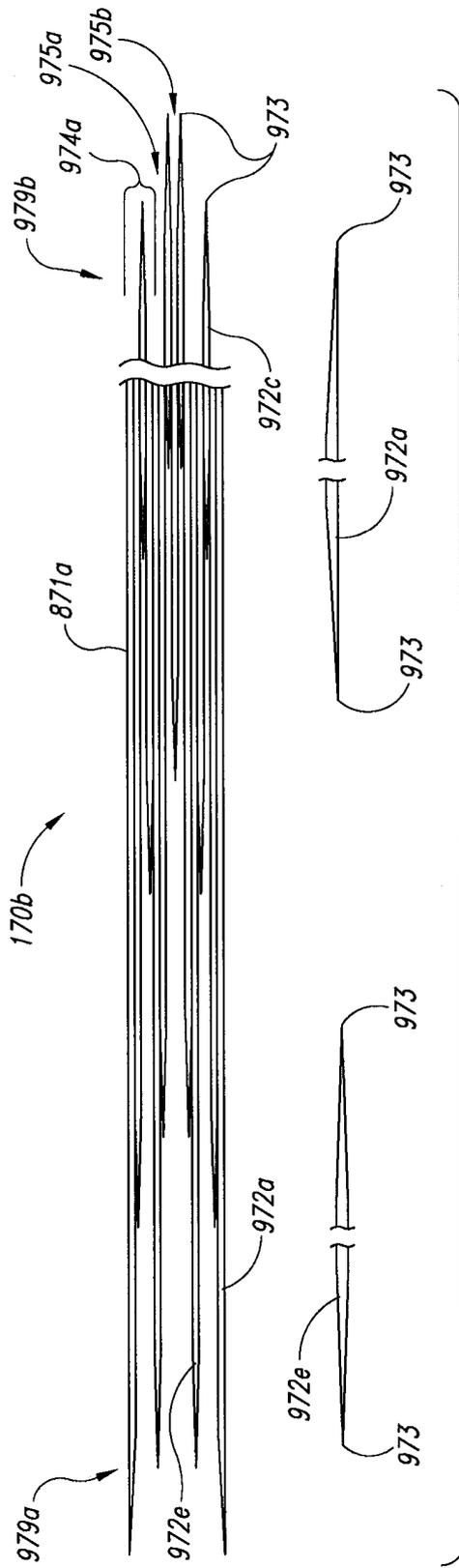


Fig. 9D

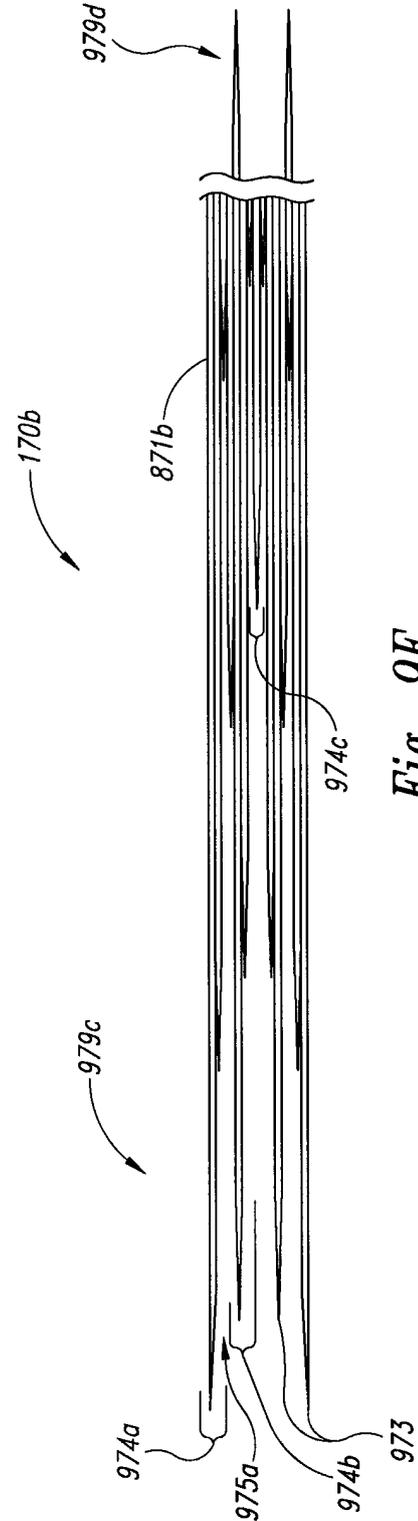


Fig. 9E

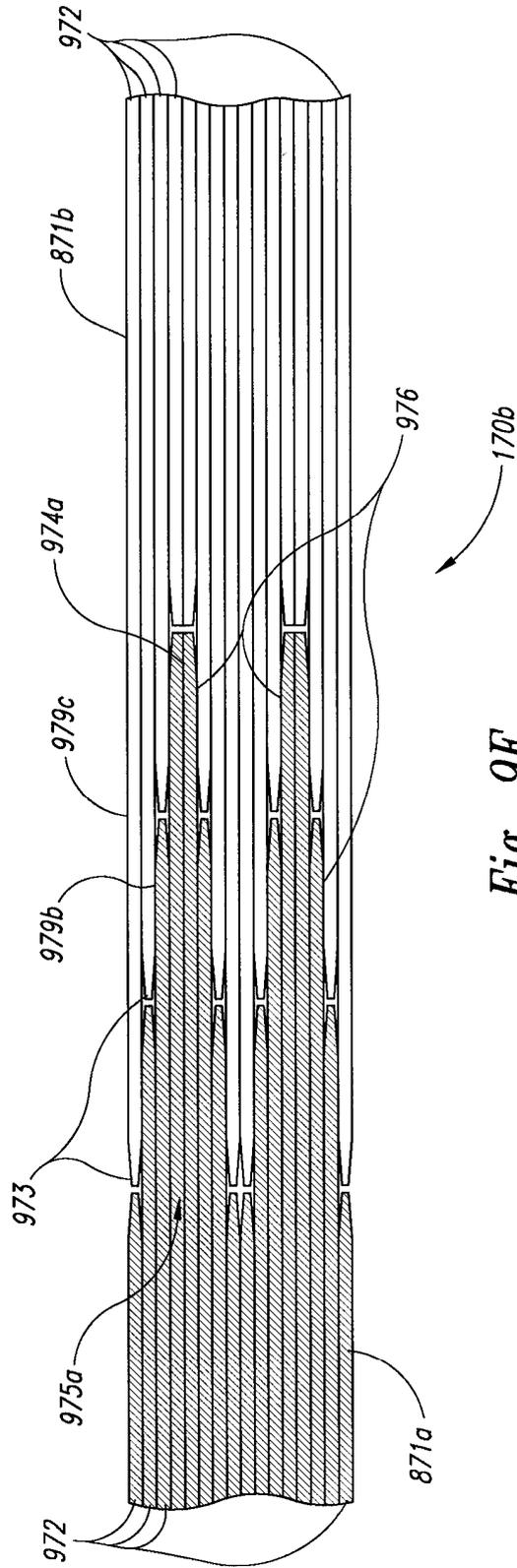
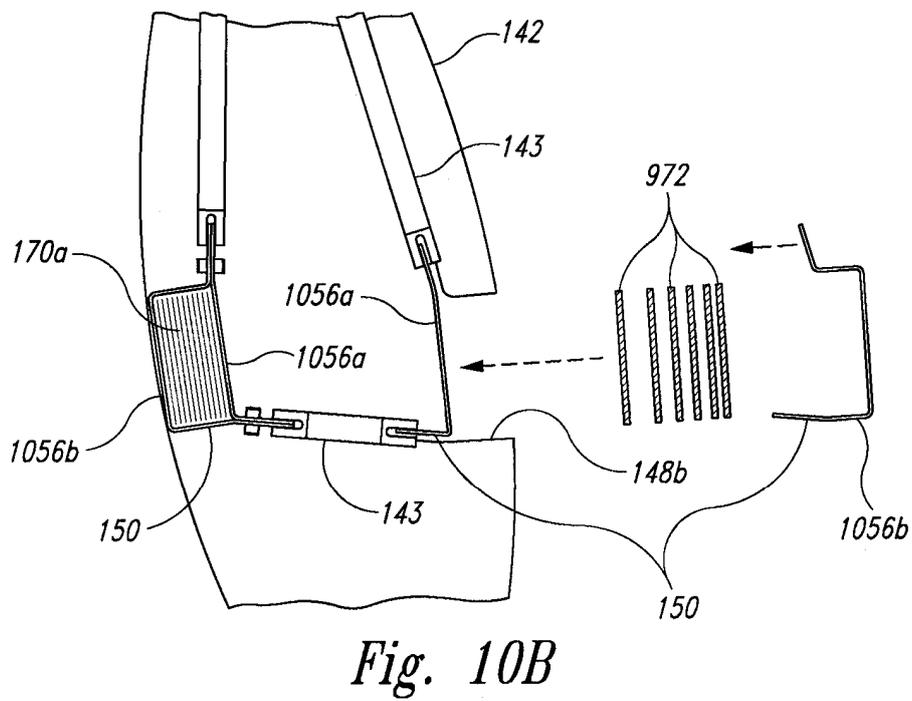
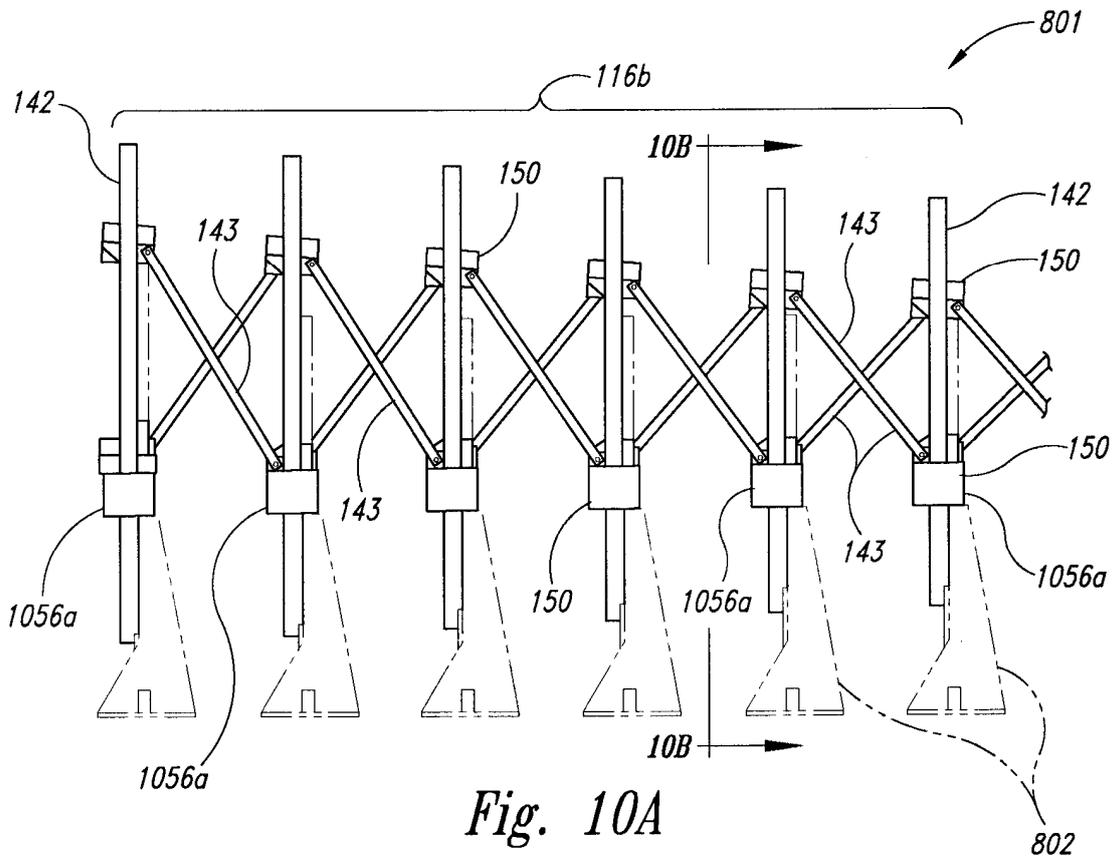


Fig. 9F



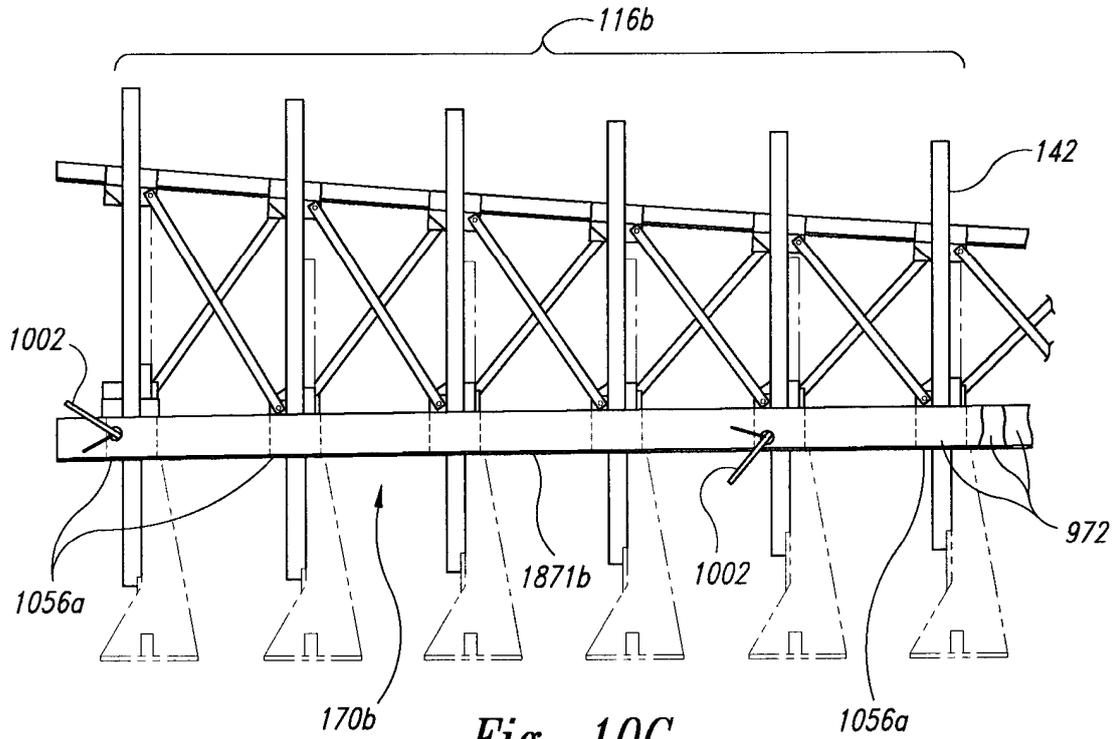


Fig. 10C

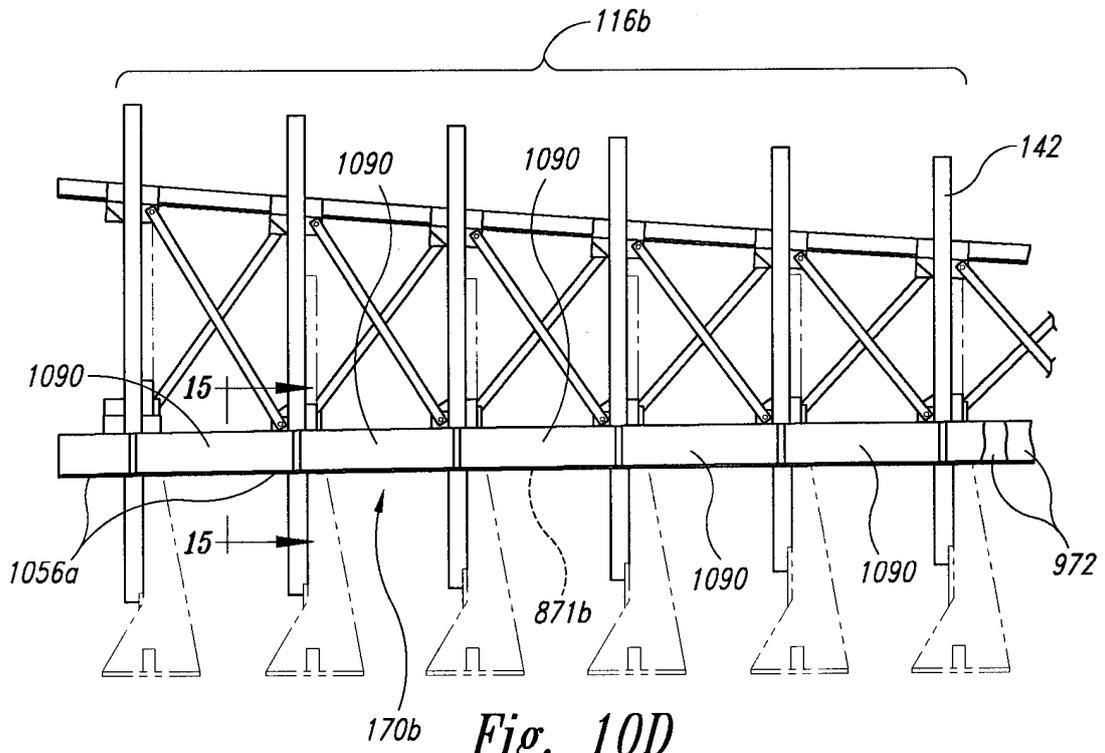
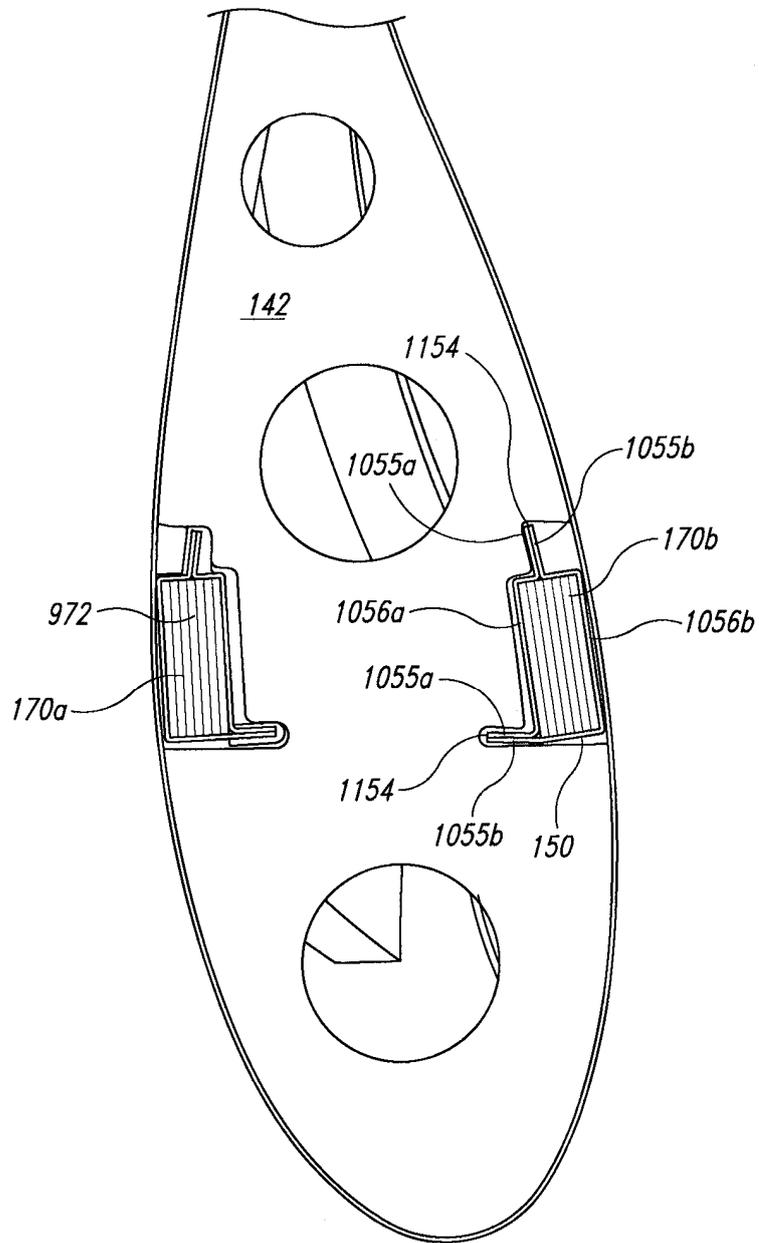


Fig. 10D





*Fig. 11B*

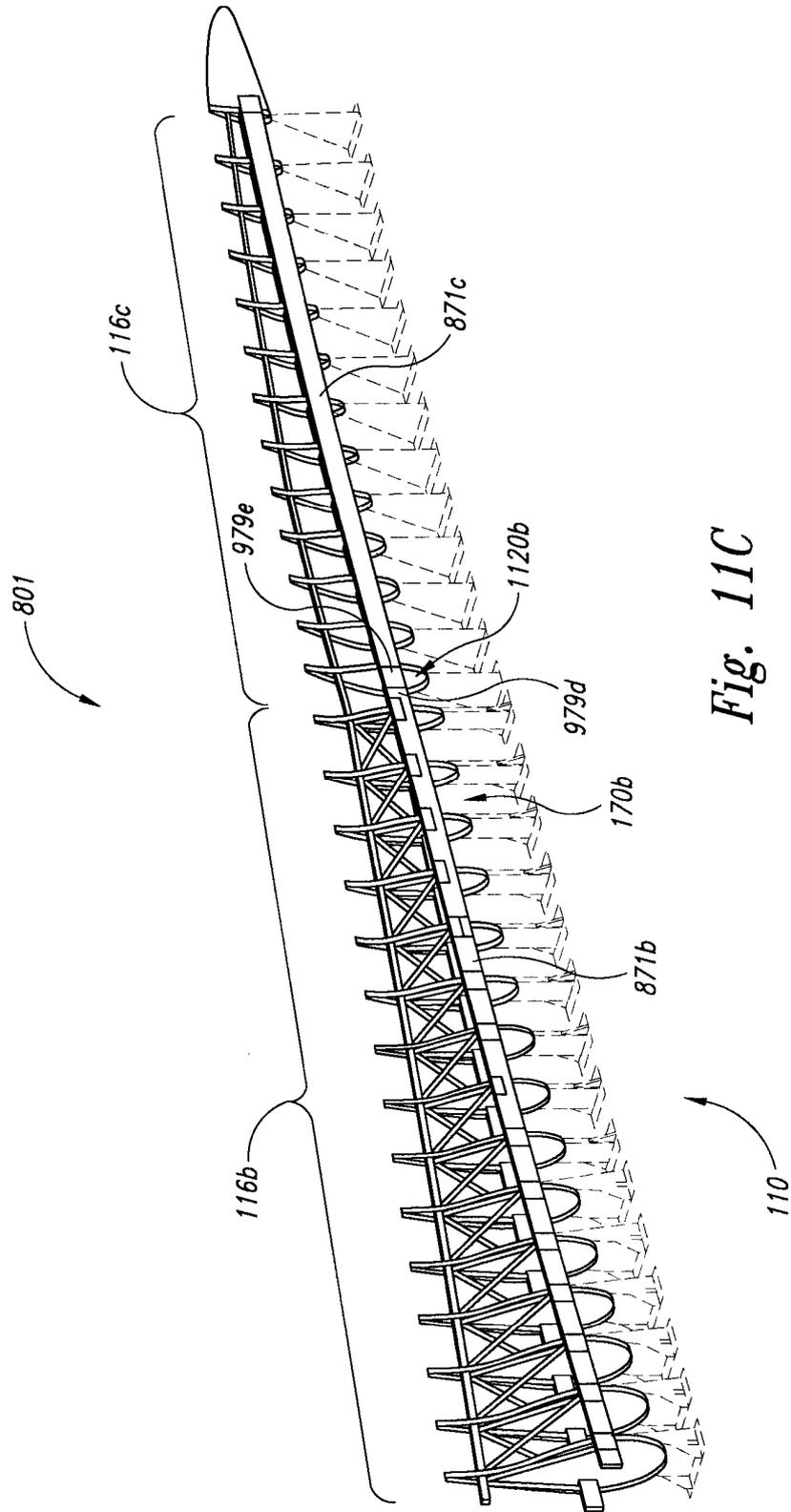
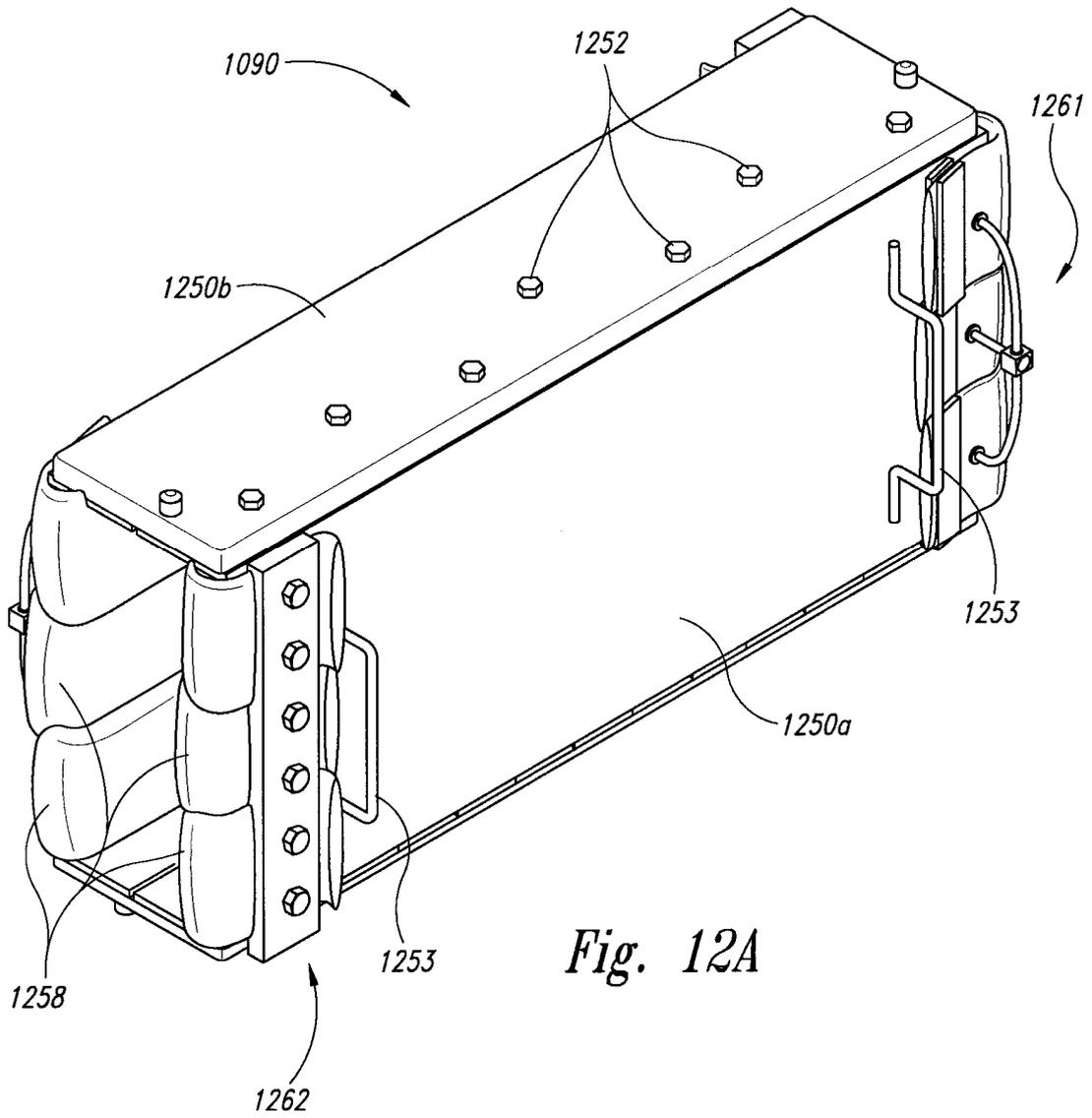
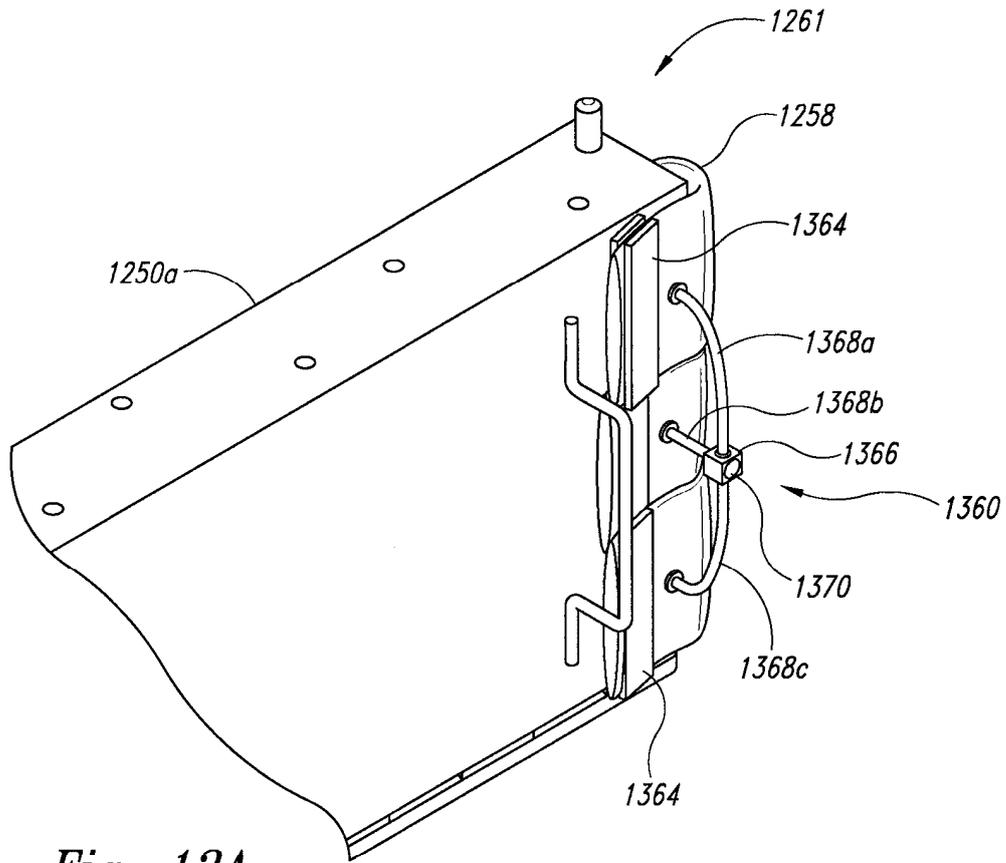


Fig. 11C

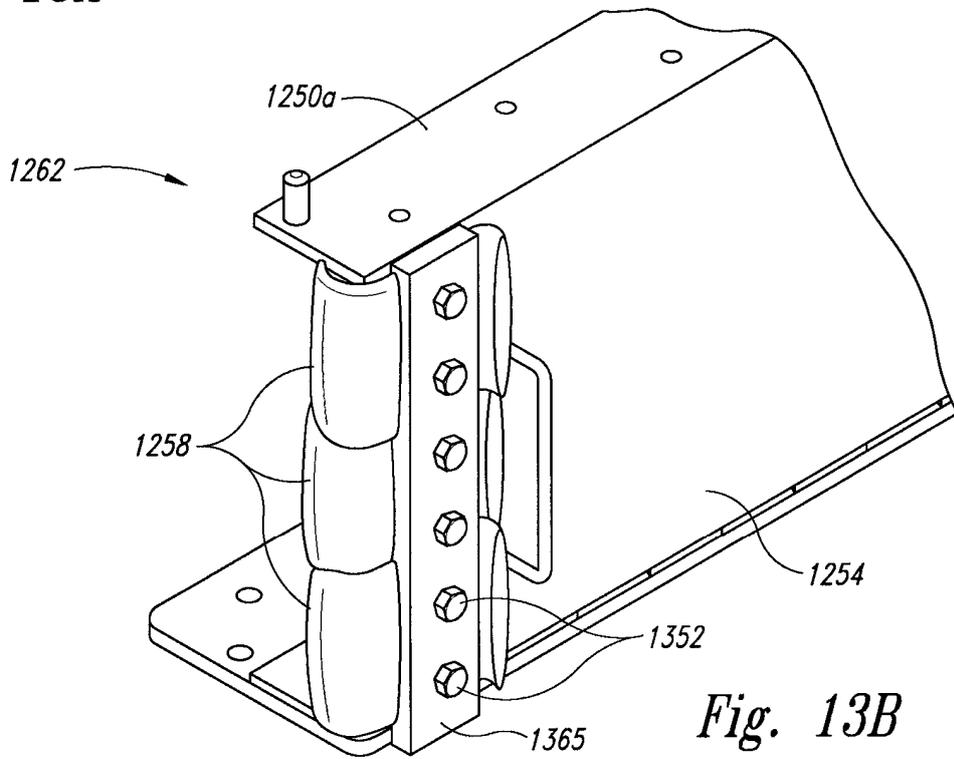


*Fig. 12A*





*Fig. 13A*



*Fig. 13B*

