

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 822 094**

51 Int. Cl.:

B29C 70/38 (2006.01)

B29C 35/02 (2006.01)

B29C 35/08 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.08.2018 E 18190436 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.07.2020 EP 3476577**

54 Título: **Sistema de calentador para máquina de colocación de fibras**

30 Prioridad:

29.08.2017 US 201715689703

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

29.04.2021

73 Titular/es:

**THE BOEING COMPANY (100.0%)
100 North Riverside Plaza
Chicago, IL 60606-2016, US**

72 Inventor/es:

**JOHNSON, BRICE A;
PEDIGO, SAMUEL F;
GHOSE, SAYATA y
LIN, JOHN Z**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 822 094 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

Sistema de calentador para máquina de colocación de fibras

Antecedentes

5 Esta divulgación se refiere, en general, a máquinas de colocación de fibras automática (AFP) que se basan en calentadores calibrados para controlar la salida de potencia. En particular, esta divulgación se refiere a sistemas y métodos para controlar la salida de calentador durante la colocación de estopas de material de plástico reforzado con fibras.

10 Los materiales compuestos reforzados con fibras comprenden fibras incrustadas en un material de matriz, tal como resinas de polímero termoplástico y termoestable. Las fibras llevan cargas y proporcionan resistencia y rigidez. Un material compuesto tiene alta resistencia y rigidez en la dirección de la fibra, y resistencia y rigidez más bajas en una dirección perpendicular a la fibra.

15 Existe una variedad de máquinas que pueden depositar materiales hechos de fibras de refuerzo preimpregnadas con resina termoplástica o termoendurecible (también conocidos como "material compuesto preimpregnado"). La colocación de fibras avanzada (también conocida como "tecnología de colocación de estopa") es un procedimiento completamente automatizado para la producción de estructuras laminadas compuestas a partir de una pluralidad de cintas preimpregnadas estrechas, o "estopas", que combina la capacidad de reembolso diferencial del bobinado de filamento y las capacidades de compactación y de corte-reanudación de la disposición de cinta automatizada. Las fibras de carbono preimpregnadas con resina termoestable se usan más comúnmente en la industria aeroespacial y, por tanto, el procedimiento de colocación de fibras se describirá en el presente documento asumiendo un sistema de material termoestable.

20 La mayoría de sistemas de colocación de fibras tienen siete ejes de movimiento y se controlan por ordenador. Los ejes de movimiento, es decir, tres ejes de posición, tres ejes de rotación y un eje para rotar el mandril de trabajo, proporcionan a la máquina de colocación de fibras flexibilidad para colocar la cabeza de colocación de fibras sobre la superficie de la pieza, permitiendo la producción de piezas compuestas complicadas. Durante el procedimiento de colocación de fibras, las estopas de cinta preimpregnada cortada se colocan sobre la superficie en bandas de fibras paralelas, llamadas pasadas (es decir, cada pasada consiste en múltiples estopas paralelas). La cabeza de AFP dispone pasadas sucesivas para formar la multiplicidad de capas o pliegues de los que se compone la estructura laminada compuesta final.

25 El parámetro de procedimiento principal para controlar las propiedades adhesivas y de pegajosidad del sistema preimpregnado durante la colocación de fibras es la temperatura de sustrato (es decir, la temperatura del material preimpregnado ya colocado en la herramienta). El sustrato se acumulará para incluir una pluralidad de capas de material preimpregnado sobre esa superficie de herramienta a medida que avanza el procedimiento de laminación. Las máquinas de colocación de fibras automática (AFP) usan calentadores, tales como lámparas infrarrojas delante del rodillo compactador para calentar el sustrato con el fin de mejorar la pegajosidad del material antes de laminar un nuevo pliegue sobre el sustrato. El calentamiento por rayos infrarrojos proporciona beneficios sustanciales de seguridad y facilidad de implementación en fuentes de calentamiento por láser y produce un medio más robusto y eficaz de calentamiento en comparación con el impacto de gas caliente que se usaba en primer lugar en la industria. El calor se necesita para provocar la adhesión del material a la superficie durante la estratificación de materiales compuestos termoestables. Un sistema de calentamiento por rayos infrarrojos debería calentar el sustrato lo suficiente como para establecer buena pegajosidad sin sobrecalentamiento.

30 Un método de control de calentador usa una curva calibrada de potencia de calentador en función de la velocidad de disposición de la máquina. Normalmente, durante la instalación de la máquina, se ejecuta una prueba de caracterización de calentador para medir la respuesta de la temperatura de sustrato a diversos parámetros de potencia. Después de barrer a través de un intervalo de condiciones de procesamiento, se estableció una tabla de respuesta que define la salida de potencia de calentador ordenada en función de la velocidad de máquina. Los parámetros se definen entonces en la documentación de las operaciones de la máquina, tal como los documentos de control del procedimiento, antes de su uso en la producción. Esta es una solución de circuito abierto de primer orden que no puede tener en cuenta todas las variables relevantes que afectan a la temperatura del material real, tal como el número de pliegues bajo el sustrato, el material de herramienta, la capacidad de emisión del sustrato, la acumulación de calor en la estructura laminada durante el procesamiento continuo, la acumulación de calor en el conjunto de calentador y el rodillo compactador durante el procesamiento continuo, las condiciones ambientales y los puntos de ajuste dinámicos en función de la velocidad, entre otros. Adicionalmente, los métodos existentes de calibración de los calentadores adaptan el procedimiento para la temperatura máxima del material que se produce antes del rodillo compactador. El material enfría entonces una determinada cantidad antes de la compactación, dando como resultado una comprensión incorrecta de la temperatura de material en el punto de compactación (es decir, la ubicación en la que el nuevo pliegue de entrada se pone en contacto con el sustrato).

35 40 45 50 55 La industria normalmente emplea controles de circuito abierto para lámparas infrarrojas debido a la simplicidad y la conveniencia de cualificación de máquinas para la producción. La lámpara usada para calentar el sustrato durante la AFP emplea actualmente un método de control de circuito abierto basado completamente en un único parámetro de calor a

partir del operario y la velocidad de la cabeza. Esto limita la capacidad de controlar el calentamiento de piezas de geometría compleja.

El documento US 2003/0102070 da a conocer un método de control de calentamiento y un sistema asociado para la colocación de fibras a alta velocidad en la construcción de materiales compuestos. El método de control de calentamiento incluye medir una temperatura de una cinta de fibra, determinar una velocidad de la cinta de fibra, determinar un valor de control de retroalimentación basándose en la temperatura de la cinta de fibra y una temperatura objetivo de la cinta de fibra, determinar un valor de control con prealimentación basándose en la temperatura objetivo de la cinta de fibra y la velocidad de la cinta de fibra, determinar un valor de control de calor basándose en el valor de control de retroalimentación y el valor de control con prealimentación y calentar la cinta de fibra basándose en el valor de control de calor. Empleando la naturaleza predictiva del control con prealimentación, se proporciona el calentamiento mejorado de la cinta de fibra.

Sumario

El contenido dado a conocer con cierto detalle a continuación se dirige a sistemas y métodos para controlar la salida de calentador durante la colocación de estopa automática basándose en una combinación de retroalimentación de sensor, modelos de procedimiento, datos de programación de control numérico (NC), condiciones ambientales y modelos de material para determinar la salida de potencia óptima del calentador. Más específicamente, esta divulgación se dirige a sistemas y métodos de circuito cerrado para controlar la temperatura en el punto de compactación (también denominado "punto de convergencia") para evitar el calentamiento excesivo o insuficiente mientras una máquina de AFP coloca estopas de material de plástico reforzado con fibras respecto a características de superficie complejas en velocidades variables. Estos sistemas y métodos proporcionan un control activo de la temperatura de material bajo el rodillo compactador durante el procedimiento de colocación de fibras, representando la variabilidad encontrada durante el procesamiento. La variable principal que controla la calidad de la pieza para la colocación de fibras es la temperatura de material durante la compactación. Los sistemas dados a conocer en el presente documento controlan este parámetro principal usando un circuito cerrado de manera que pueden mantenerse condiciones de procesamiento óptimas durante la fabricación de estructuras compuestas con el fin de proporcionar la mejor calidad en las tasas de disposición más altas posibles.

Un sistema de control de calentador de circuito cerrado ofrece una mejora respecto a un método de circuito abierto habitual. La temperatura de la estratificación (es decir, el sustrato) se mide en tiempo real por uno o más sensores de temperatura. El sistema de control de calentador puede conseguir la temperatura deseada a pesar de la variabilidad del procedimiento. La temperatura ambiente, la temperatura de estratificación inicial y la temperatura de las herramientas pueden ser todas fuentes de variación de procedimiento que puede compensar el sistema de circuito cerrado. El control de circuito cerrado del calentador permite el control sobre el procedimiento de fabricación mientras la geometría de las piezas de AFP aumenta en complejidad y capacidad. Las variables que afectan a la temperatura de sustrato real incluyen material de herramientas, número de pliegues en la superficie, temperatura de sustrato, material de rodillo compactador, temperatura del rodillo compactador, tasa de disposición, retardo de lámpara infrarroja, temperatura de alojamiento de calentador, nivel de compactación del sustrato y distancia del calentador a la superficie debido a variaciones de contorno. El sistema de circuito cerrado puede construirse alrededor de las variables más fundamentales. Puede integrarse retroalimentación de sensor para accionar la temperatura de sustrato apropiada para el procedimiento de laminación ideal.

Más específicamente, las realizaciones de un sistema de control de calentador de circuito cerrado dadas a conocer en el presente documento incorporan entradas desde uno o más sensores de temperatura (por ejemplo, pirómetros), velocidades de máquina y posición, modelos térmicos y entradas de programa de NC para mantener las condiciones de procesamiento óptimas para la colocación de materiales de plástico reforzados con fibras, tales como materiales preimpregnados termoestables. El sistema procesa las entradas en tiempo real y emite la potencia de calentador necesaria para alcanzar la temperatura de material óptima en el punto de compactación. También puede determinarse la temperatura de sustrato bajo el calentador. Esta información puede usarse para evitar que el material exceda temperaturas máximas permitidas además de controlar la temperatura en el punto de compactación.

Los sistemas de circuito cerrado dados a conocer en el presente documento usan pirómetros para controlar la temperatura del punto de compactación en tiempo real mientras se coloca una nueva estopa o una pluralidad de estopas. Según una realización, se desarrollaron modelos térmicos de la estratificación, las herramientas, el rodillo compactador y el calentador. Estos son modelos dinámicos que incorporan temperatura de sustrato, velocidad de estratificación y distancia del calentador al sustrato. Adicionalmente, el número de pliegues en la estratificación actual se incluirá para representar variaciones en el flujo térmico. El modelado térmico se usa para estimar la temperatura en el punto de compactación y, entonces, ajustar la salida de calentador. La salida de calentador deseada será un resultado del control proporcional, integral y derivado (PID) u otra estrategia de control conocida y puede accionarse por geometría, velocidad de estratificación y material.

Más específicamente, el sistema de control de calentador de circuito cerrado dado a conocer con cierto detalle a continuación comprende un ordenador de control que usa un modelo térmico bidimensional (2-D) que puede correlacionar mediciones de temperatura de uno o más sensores de temperatura con la temperatura de punto de compactación real. Esa temperatura de punto de compactación se usa como el punto de control. El modelo térmico tiene en cuenta variables tales como la temperatura de sustrato, el número de pliegues, el material de herramienta, la tasa de alimentación, la distancia que separa el calentador y el sustrato y la potencia de calentador. Para construir el modelo térmico, se generaron

curvas de correlación para relacionar la temperatura de compactación con las mediciones de sensor de temperatura. Estas correlaciones se usaron en tiempo real en el circuito de control para controlar la temperatura de sustrato en el punto de compactación. El enfriamiento significativo puede producirse desde el punto en el que el sensor mide la temperatura de sustrato hasta el lugar en el que se compacta el material. Para procedimientos de AFP avanzados, es importante conocer la temperatura del punto de compactación real para maximizar las capacidades de procedimiento y calidad de la pieza.

Según algunas realizaciones, múltiples sensores de temperatura infrarrojos (a continuación en el presente documento "sensores de temperatura IR") se dirigen a la superficie de estratificación delante del rodillo compactador y también a la nueva superficie de estratificación detrás (es decir, en la parte posterior) del rodillo compactador. Según realizaciones alternativas, se usan solo uno o más sensores de temperatura IR dirigidos a la superficie de estratificación delante del rodillo compactador o se usan solo uno o más sensores de temperatura IR dirigidos a la superficie de estratificación detrás (es decir, en la parte posterior) del rodillo compactador.

Tal como se usa en el presente documento, el término "sensor de temperatura IR" significa un sensor óptico-electrónico que convierte la radiación infrarroja de impacto en una medición de temperatura. Un sensor de temperatura IR de este tipo tiene la capacidad de medir la temperatura sin tocar un objeto. Estos sensores suministran lecturas de temperatura directas a un ordenador de control que controla la potencia suministrada a una lámpara infrarroja. Los sensores de temperatura IR deberían montarse y protegerse de tal manera que evitan que los fotones de la lámpara infrarroja se reflejen directamente en los sensores.

Adicionalmente, los datos de robot y programas NC se integran en el procedimiento de control. El ordenador de control se acopla de manera comunicativa a un controlador robótico de modo que puede recibir datos del robot. El ordenador de control y el controlador robótico se programan para pasar datos y calcular una salida de potencia de calentador final. Esta salida se envía a un controlador de potencia de calentador para modulación en tiempo real de potencia de calentador. El modelado térmico usa la velocidad de estratificación como una variable de entrada. Esto se suministrará por el controlador robótico de manera continua en la totalidad de la estratificación. Adicionalmente, las geometrías de cabeza y pieza influyen en qué sensores, si los hubiera, apuntan a la pieza. Estos datos se enviarán desde el controlador robótico hasta el ordenador de control. El ordenador de control usará esta información para inhabilitar sensores que no están sobre la superficie de la pieza. El ordenador de control también recibe una lista de estopas activas que van a colocarse desde el controlador robótico y se programa con el número de pliegues en la estratificación actual. Según una realización, el ordenador de control está configurado para ejecutar un circuito de PID para controlar la temperatura en el punto de compactación (por ejemplo, en la interfaz del rodillo compactador y una estopa recién dispuesta) y regular la potencia de calentador para conseguir la temperatura de punto de compactación deseada.

Aunque se describirán con cierto detalle a continuación diversas realizaciones de sistemas y métodos para controlar la temperatura en el punto de compactación en una máquina de AFP, una o más de esas realizaciones pueden caracterizarse por uno o más de los siguientes aspectos.

Un aspecto del contenido dado a conocer en detalle a continuación es una máquina de colocación de fibras automática que comprende: una cabeza que comprende un rodillo compactador; un calentador montado en la parte delantera del rodillo compactador; un primer sensor de temperatura dirigido a un primer punto de medición situado o bien en la parte delantera del rodillo compactador y en la parte posterior del calentador o bien en la parte posterior del rodillo compactador, en el que el primer sensor de temperatura, cuando está en funcionamiento, emite primeros datos de temperatura que representan una cantidad de radiación transducida en señales eléctricas por el primer sensor de temperatura cuando el rodillo compactador está en contacto con un sustrato; un medio de almacenamiento legible por ordenador tangible no transitorio que almacena código de ordenador que representa un modelo térmico que está configurado para inferir una temperatura de punto de compactación estimada del sustrato bajo el rodillo compactador basándose al menos en parte en los datos de temperatura emitidos por uno o más sensores de temperatura; y un sistema informático configurado para realizar las siguientes operaciones: usar el modelo térmico para calcular una cantidad de potencia eléctrica que va a suministrarse al calentador en función de al menos los primeros datos de temperatura emitidos por el primer sensor de temperatura; y emitir señales de control de potencia de calentador que representan la cantidad de potencia eléctrica que va a suministrarse al calentador. La máquina de colocación de fibras automática puede comprender, además, un segundo sensor de temperatura dirigido a un segundo punto de medición situado o bien en la parte delantera del rodillo compactador y en la parte posterior del calentador si el primer punto de medición se sitúa en la parte posterior del rodillo compactador o bien en la parte posterior del rodillo compactador si el primer punto de medición se sitúa en la parte delantera del rodillo compactador y en la parte posterior del calentador, en la que el segundo sensor de temperatura, cuando está en funcionamiento, emite segundos datos de temperatura que representan una cantidad de radiación transducida en señales eléctricas por el segundo sensor de temperatura cuando el rodillo compactador está en contacto con el sustrato, en la que el modelo térmico está configurado para inferir la temperatura de punto de compactación estimada del sustrato bajo el rodillo compactador basándose al menos en parte en los datos de temperatura primeros y segundos. Según una realización propuesta, el sistema informático está configurado para calcular la cantidad de potencia eléctrica que va a suministrarse al calentador en función de una diferencia entre los datos de temperatura primeros y segundos emitidos por los sensores de temperatura primero y segundo.

Según algunas realizaciones del sistema descrito en el párrafo anterior, el calentador comprende una lámpara infrarroja, mientras que los sensores de temperatura primero y segundo comprenden sensores de temperatura infrarrojos primero y

segundo respectivamente. La cabeza puede comprender, además, protección dispuesta y configurada para bloquear que la radiación reflejada por el sustrato alcance el primer sensor de temperatura.

5 Según una realización, el modelo térmico está configurado para tener en cuenta una velocidad a la que se mueve la cabeza y un número de pliegues del sustrato. Además, el modelo térmico puede estar configurado para calcular una diferencia entre la temperatura de punto de compactación estimada y una temperatura de punto de compactación objetivo.

10 Otro aspecto del contenido dado a conocer en el presente documento es un método para controlar un calentador durante la colocación de estopas de material de plástico reforzado con fibras por una máquina de colocación de fibras. El método comprende: (a) crear un modelo térmico que correlacione una temperatura de un punto de compactación bajo un rodillo compactador con al menos una primera temperatura de un sustrato en un primer punto de medición, en el que el primer punto de medición se sitúa o bien en la parte delantera del rodillo compactador y en la parte posterior del calentador o bien en la parte posterior del rodillo compactador cuando el rodillo compactador está en contacto con el sustrato; (b) compactar estopas de material de plástico reforzado con fibras en el sustrato haciendo rodar el rodillo compactador sobre una superficie del sustrato con las estopas entre el mismo; (c) calentar el sustrato en una zona aguas arriba del primer punto de medición durante la compactación usando un calentador alimentado eléctricamente; (d) adquirir una primera medición de temperatura a partir del primer punto de medición; (e) usar el modelo térmico para inferir una temperatura de punto de compactación estimada que es una función de al menos la primera medición de temperatura; (f) calcular una diferencia entre la temperatura de punto de compactación estimada y una temperatura de punto de compactación objetivo; (g) emitir señales de control que representan una orden para suministrar una cantidad de potencia eléctrica al calentador, cuya cantidad de potencia eléctrica se calcula para reducir la diferencia entre la temperatura de punto de compactación estimada y la temperatura de punto de compactación objetivo; y (h) suministrar la cantidad de potencia eléctrica al calentador, en el que las etapas (e) a (g) se realizan por un sistema informático.

25 Según algunas realizaciones del método descritas en el párrafo anterior, el modelo térmico también correlaciona la temperatura del punto de compactación con una segunda temperatura del sustrato en un segundo punto de medición, en el que el segundo punto de medición se sitúa en la parte delantera del rodillo compactador y en la parte posterior del calentador si el primer punto de medición está en la parte posterior del rodillo compactador o en la parte posterior del rodillo compactador si el primer punto de medición está en la parte delantera del rodillo compactador y en la parte posterior del calentador cuando el rodillo compactador está en contacto con el sustrato y la etapa (e) comprende el uso del modelo térmico para inferir una temperatura de punto de compactación estimada que es una función de una diferencia de las mediciones de temperatura primera y segunda.

30 Un aspecto adicional es un método para controlar un calentador durante la colocación de estopas de material de plástico reforzado con fibras por una máquina de colocación de fibras, que comprende: (a) compactar estopas de material de plástico reforzado con fibras en un sustrato soportado por una herramienta haciendo rodar un rodillo compactador sobre una superficie del sustrato con las estopas entre el mismo; (b) calentar el sustrato en una zona aguas arriba del rodillo compactador usando un calentador alimentado eléctricamente; (c) adquirir una primera medición de temperatura a partir de un primer punto de medición en una parte del sustrato situada en la parte posterior del calentador y en la parte delantera del rodillo compactador; (d) adquirir una segunda medición de temperatura a partir de un segundo punto de medición en una parte del sustrato situado en la parte posterior del rodillo compactador; (e) inferir una temperatura de punto de compactación estimada que es una función de al menos una de las mediciones de temperatura primera y segunda; (f) calcular una diferencia entre la temperatura de punto de compactación estimada y una temperatura de punto de compactación objetivo; (g) emitir señales de control que representan una orden para suministrar una cantidad de potencia eléctrica al calentador, cuya cantidad de potencia eléctrica se calcula para reducir la diferencia entre la temperatura de punto de compactación estimada y la temperatura de punto de compactación objetivo; y (h) suministrar la cantidad de potencia eléctrica al calentador, en el que al menos las etapas (e) a (g) se realizan por un sistema informático. Según algunas realizaciones, la etapa (c) comprende irradiar el sustrato con radiación infrarroja. Según una implementación a modo de ejemplo, el método comprende, además, calcular la cantidad de potencia eléctrica que va a suministrarse al calentador en función de una diferencia entre los datos de temperatura primeros y segundos emitidos por los sensores de temperatura primero y segundo.

A continuación, se dan a conocer otros aspectos de los sistemas y métodos para controlar la temperatura en el punto de compactación en una máquina de AFP.

50 **Breve descripción de los dibujos**

Las características, funciones y ventajas comentadas en la sección anterior pueden conseguirse de manera independiente en diversas realizaciones o pueden combinarse en aún otras realizaciones. A continuación en el presente documento, se describirán diversas realizaciones con referencia a dibujos con el fin de ilustrar los aspectos descritos anteriormente y aspectos adicionales. Ninguno de los diagramas descritos brevemente en esta sección está dibujados a escala.

55 La figura 1 es un diagrama que muestra una vista lateral de una cabeza de una máquina de AFP en el procedimiento de disposición de una estopa de material de plástico reforzado con fibras sobre un sustrato. La cabeza comprende un rodillo compactador, una lámpara infrarroja y sensores de temperatura IR.

La figura 2 es un diagrama de bloques que identifica algunos componentes de un sistema de circuito cerrado para controlar la temperatura en el punto de compactación en una máquina de AFP según una realización.

5 La figura 3 es un diagrama que representa una vista en sección de un rodillo compactador polimérico (por ejemplo, de poliuretano) que va a deformarse en la zona de compactación mientras presiona contra un sustrato compuesto dispuesto sobre una herramienta hecha de metal (por ejemplo, aluminio). Se indican tres puntos de interés tal como sigue: A - ubicación de detección de rodillo posterior; B - ubicación de detección de rodillo delantero; y C - punto de compactación bajo el rodillo.

La figura 4 es un diagrama de flujo que identifica etapas de un procedimiento de control principal de lámpara infrarroja según una realización.

10 La figura 5 es un diagrama de bloques que identifica algunas entradas de datos y algunos componentes de un ordenador de control configurado para controlar una lámpara infrarroja según una realización.

La figura 6 es un diagrama que muestra la misma vista lateral de la cabeza de AFP representada anteriormente en la figura 1, salvo que en la situación representada en la figura 6, la herramienta está más lejos de la lámpara infrarroja.

15 La figura 7 es un diagrama que muestra la misma vista lateral de la cabeza de AFP representada anteriormente en la figura 1, salvo que en la situación representada en la figura 7, la herramienta está más cerca de la lámpara infrarroja.

La figura 8 es un gráfico que muestra una evolución de temperatura conceptualizada en cualquier punto de la pasada de estratificación.

La figura 9 es un gráfico de la temperatura de sustrato frente a tiempo durante el calentamiento, el enfriamiento y la compactación de rodillo basándose en datos de termopar escondidos.

20 La figura 10 es un gráfico que muestra una evolución de tiempo conceptualizada de flujo de calor sobre cada elemento de superficie.

La figura 11 es un gráfico que muestra evoluciones de temperatura-tiempo para los tres puntos de interés (A, B y C) indicados en la figura 3.

25 La figura 12 es un gráfico que muestra evoluciones de temperatura-tiempo en el punto de compactación para velocidades de calentador (es decir, de cabeza) de 0,05 m/s, 0,1 m/s y 0,25 m/s.

La figura 13 es un gráfico que muestra evoluciones de temperatura-tiempo en el punto de compactación para porcentajes de salida de potencia de calentador de 20%, 40%, 60% y 80% (velocidad de calentador de 0,1 m/s).

30 La figura 14 es un gráfico que muestra la razón de la diferencia de temperatura entre los puntos C y A mostrados en la figura 3 respecto a la diferencia de temperatura entre los puntos B y A mostrados en la figura 3 en función del número de pliegues dispuestos (velocidad de calentador de 0,1 m/s).

A continuación en el presente documento, se hará referencia a los dibujos en los que elementos similares en diferentes dibujos llevan los mismos números de referencia.

Descripción detallada

35 Con fines de ilustración, se describirán ahora con cierto detalle sistemas y métodos para el control de circuito cerrado de la temperatura en el punto de compactación en una máquina de AFP. Sin embargo, no se describen todas las características de una implementación real en esta memoria descriptiva. Un experto en la técnica apreciará que en el desarrollo de cualquier realización de este tipo, deben tomarse numerosas decisiones específicas de implementación para conseguir los objetivos específicos de desarrollador, tales como el cumplimiento con limitaciones relacionadas con negocios y relacionadas con sistemas, que variarán de una implementación a otra. Además, resultará evidente que un esfuerzo de desarrollo de este tipo podría ser complejo y requerir mucho tiempo, pero constituiría, sin embargo, una práctica rutinaria para los expertos habituales en la técnica que tiene el beneficio de esta divulgación.

40 Las realizaciones a modo de ejemplo particulares dadas a conocer a continuación se basan en una o más de las siguientes filosofías de control general: (1) se usan sensores de temperatura IR para detectar la temperatura de sustrato; (2) se controlan el montaje y la protección para evitar que los fotones reflejados impacten en los sensores de temperatura IR; (3) se caracteriza la temperatura de sustrato en función de la potencia de calentador, la velocidad del rodillo compactador y el número de pliegues en el sustrato; (4) se desarrolla un modelo térmico que relaciona temperaturas medidas con temperaturas de procedimiento reales; (5) se ejecuta un esquema de control de circuito abierto cuando los datos de temperatura no son válidos; (6) se ejecuta un esquema de control de circuito cerrado para ajustar la temperatura cuando los datos de temperatura son válidos; y (7) también se usan datos en vivo de la programación de control numérico (NC) y robótico como controles de procedimiento.

50 Según una realización, las entradas al sistema de controlador incluyen lo siguiente: (1) al menos un pirómetro (a continuación en el presente documento "sensor de temperatura") para medir la temperatura de material cerca del rodillo

compactador (puede usarse más de uno para medir delante del rodillo, detrás del rodillo y en los bordes izquierdo y derecho del rodillo); (2) un modelo térmico que predice la temperatura de material basándose en la salida de calentador, la velocidad de procedimiento, el material de herramientas, el número de pliegues respecto a la herramienta, la distancia del calentador al sustrato y la orientación del calentador al sustrato; (3) los datos de programa de NC que pasan la orientación del calentador al sustrato para representar contornos complejos; (4) los datos de estado robóticos para la velocidad, posición y aceleración; (5) el número de pliegues anteriormente colocados, tal como se presentan por el programa de NC; (6) la capacidad de emisión de material de sustrato; (7) los datos de programa de NC que definen qué estopas se procesan por la cabeza; (8) la temperatura del rodillo compactador; y (9) las temperaturas de sustrato tal como se mide por los sensores de temperatura. El ordenador de control procesa estas señales y emite señales de control que representan el nivel de potencia de calentador ordenado.

La figura 1 es un diagrama que muestra una vista lateral de una cabeza 10 de una máquina de AFP robótica en el procedimiento de disposición de una estopa 14 de material de plástico reforzado con fibras en un sustrato 16 según una realización. La cabeza se mueve en la dirección indicada por una flecha horizontal en la figura 1. La cabeza 10 comprende un rodillo compactador 12 y está equipada con una lámpara infrarroja 20 (por ejemplo, una pluralidad de bombillas infrarrojas) y una multitud de sensores de temperatura IR montados en ubicaciones estratégicas. La multitud de sensores de temperatura IR incluye una primera fila de sensores de temperatura IR 22 espaciados (solo uno de ellos es visible en la figura 1) delante del rodillo compactador 12 y una segunda fila de sensores de temperatura IR 24 espaciados (solo uno de ellos es visible en la figura 1) detrás del rodillo compactador 12. Según una realización, ambas filas tienen tres sensores de temperatura IR. Los sensores de temperatura IR 22 miden la temperatura de sustrato después del calentamiento y antes de la compactación; los sensores de temperatura IR 24 miden la temperatura de sustrato después del calentamiento y después de la compactación. En la figura 1 no se muestran sensores de temperatura IR adicionales para medir la temperatura de sustrato antes del calentamiento ni cualquier cambio en la temperatura del rodillo compactador.

Un sensor de temperatura IR habitual comprende una lente, un filtro espectral que selecciona el espectro de longitud de onda de interés, un detector óptico que convierte la radiación infrarroja en una señal eléctrica y una unidad de procesamiento de señal electrónica que analiza la señal eléctrica y la convierte en una medición de temperatura. Un sensor de temperatura IR de este tipo tiene la capacidad de medir la temperatura sin tocar un objeto. Por ejemplo, los sensores de temperatura IR adecuados están disponibles comercialmente de Fluke Process Instruments N.A., Santa Cruz, California.

El reflejo de la energía infrarroja del sustrato 16 en los sensores de temperatura IR 22 evitaría el control adecuado. Para evitar esta situación, se dispone y se configura la protección de bombilla 26 para bloquear que la energía infrarroja reflejada por el sustrato 16 alcance los sensores de temperatura IR 22. Más específicamente, la lámpara infrarroja 20 se une a la protección de bombilla 26, que se une, a su vez, a la cabeza 10 de la máquina de AFP. Preferiblemente, el detector óptico de cada uno de los sensores de temperatura IR 22 es capaz de formar un tamaño de punto de medición razonable dada la posición de montaje cercana y el deseo de minimizar la observación de energía reflejada.

El sustrato 16 comprende una multitud de estopas de material de plástico reforzado con fibras anteriormente dispuestas sobre una herramienta 18 (por ejemplo, un mandril). Las estopas forman pliegues de material compuesto. A medida que la cabeza 10 se mueve en la dirección indicada por la flecha en la figura 1, una o más estopas adicionales 14 se disponen sobre el sustrato 16. Las bombillas infrarrojas 20 delante del rodillo compactador 12 calientan el sustrato 16 con el fin de mejorar la pegajosidad del material antes de laminar un nuevo pliegue sobre el sustrato 16. Los pliegues del material compuesto se curarán en un autoclave después de que se haya completado el procedimiento de estratificación.

La variable principal que controla la calidad de la pieza para la colocación de fibras es la temperatura de sustrato bajo el rodillo compactador 12 durante la compactación (a continuación en el presente documento "temperatura de punto de compactación"). Sin embargo, la temperatura del punto de compactación no puede medirse en tiempo real. La metodología para el calentamiento propuesta en el presente documento infiere (es decir, estima) la temperatura de sustrato bajo el rodillo compactador 12. Más específicamente, el modelado térmico bidimensional se usa para correlacionar la temperatura del punto de compactación con las lecturas de temperatura de los sensores de temperatura IR 22 y 24. La metodología propuesta controla este parámetro principal (es decir, la temperatura de punto de compactación) en un sistema de control de calentador de circuito cerrado de manera que pueden mantenerse condiciones de procesamiento óptimas durante la fabricación de estructuras compuestas con el fin de proporcionar la calidad óptima en las tasas de estratificación más altas posibles. Más específicamente, el sistema de control de calentador de circuito cerrado dado a conocer en el presente documento controla la salida de calentador basándose en una combinación de la retroalimentación de sensor de temperatura IR, modelos de procedimiento, datos de programación de NC, condiciones ambientales y modelos de material para determinar la potencia eléctrica óptima para suministrar a la lámpara infrarroja 20.

Según una implementación adoptada durante el desarrollo, se montaron ocho sensores de temperatura IR a la cabeza 10 de una máquina de AFP robótica. Un primer conjunto de tres sensores de temperatura IR 22 se montaron delante del rodillo compactador 12. Un segundo conjunto de tres sensores de temperatura IR 24 se montaron detrás del rodillo compactador 12. Cada sensor de temperatura IR de los conjuntos primero y segundo se apuntó a un punto de medición respectivo en el sustrato que va a procesarse. Estos puntos de medición se situaron tan cerca del rodillo compactador 12 como fue posible. Un séptimo sensor de temperatura IR (no mostrado en la figura 1) se montó delante de la lámpara infrarroja 20 para medir la temperatura de sustrato antes del calentamiento. El último sensor de temperatura IR (no

mostrado en la figura 1) se montó cerca del rodillo compactador 12 y se situó con el fin de medir cualquier cambio en la temperatura del rodillo compactador 12.

Los sensores de temperatura IR 22 entre el rodillo compactador 12 y la lámpara infrarroja 20 permiten monitorizar de cerca temperaturas de sustrato, que pueden aumentar a medida que acumulan ciclos de calentamiento repetidos. Los sensores de temperatura IR 24 detrás del rodillo compactador 12 proporcionan una lectura sin reflejo fiable que es un indicador de retardo de la respuesta de calentador. Los sensores de temperatura IR 22 y 24 se sitúan preferiblemente de modo que están entre ± 45 grados perpendiculares a la superficie. Adicionalmente, el punto de compactación es la región de interés, así que apuntar los sensores tan cerca como sea posible al punto de convergencia mejora el rendimiento de sistema.

Según diversas realizaciones del sistema de control de calentador dado a conocer en el presente documento, el número de sensores de temperatura puede ser diferente a ocho. Por ejemplo, el modelo térmico puede estar configurado para inferir una temperatura de punto de compactación estimada en función de uno o más sensores de temperatura dirigidos a puntos de medición respectivos situados en la parte delantera del rodillo compactador y en la parte posterior del calentador (y no en función de cualquier sensor de temperatura dirigido a puntos de medición respectivos situados en la parte posterior del rodillo compactador). En un ejemplo alternativo, el modelo térmico puede estar configurado para inferir una temperatura de punto de compactación estimada en función de uno o más sensores de temperatura dirigidos a puntos de medición respectivos situados en la parte posterior del rodillo compactador (y no en función de cualquier sensor de temperatura dirigido a puntos de medición respectivos situados en la parte delantera del rodillo compactador y en la parte posterior del calentador).

La figura 2 es un diagrama de bloques que identifica algunos componentes de un sistema de circuito cerrado para controlar la temperatura en el punto de compactación en una máquina de AFP. El sistema general comprende un ordenador de control 2 para controlar la lámpara infrarroja 20 y un controlador robótico 4 para controlar el movimiento de la cabeza 10 de la máquina de AFP. El controlador robótico 4 proporciona datos al ordenador de control 2 respecto a una conexión de red (por ejemplo, una conexión de Ethernet). El controlador robótico 4 está programado para proporcionar códigos de salida de control de estopa y velocidad respecto a la conexión de red al ordenador de control 2. Según una realización, el ordenador de control 2 se conecta a un multiplexor 28 para leer los sensores de temperatura IR 22, 24. Los sensores de temperatura IR también se conectan al multiplexor 28.

El ordenador de control 2 lee datos de temperatura, datos robóticos e información de programa de la pieza y emite señales de control de potencia de calentador que controlan la potencia suministrada a la lámpara infrarroja 20 en un sistema de control de circuito cerrado. Las señales de control de potencia de calentador se envían por el ordenador de control 2 a un acondicionador de señal 6, que a su vez emite señales de control de potencia de calentador condicionadas a un controlador de potencia de calentador 8. El controlador de potencia de calentador 8 está configurado para convertir señales de control de potencia de calentador condicionadas a un voltaje de salida que se usa para alimentar la lámpara infrarroja 20.

El ordenador de control 2 está configurado para emplear un modelo térmico, en forma de un conjunto de ecuaciones algebraicas, que incorpora resultados de análisis térmico respectivos de las propiedades térmicas y de geometría de las herramientas, la estratificación, el rodillo compactador y el calentador y sus interacciones térmicas. El modelo térmico recibe variables de entrada (incluyendo las lecturas del sensor de temperatura IR) y entonces estima la temperatura de sustrato en la interfaz del rodillo compactador 12 y el sustrato 16 (a continuación en el presente documento "el punto de compactación" o "punto de convergencia"). Las variables de entrada incluyen datos de modelo de estratificación/herramienta tales como el número de pliegues bajo la estratificación actual (para representar variaciones en el flujo térmico), datos de geometría de cabeza (por ejemplo, de rodillo compactador), datos de temperatura (a partir de los sensores de temperatura IR 22, 24 y opcionalmente a partir del sensor de temperatura IR que mide la temperatura del rodillo compactador 12) y la velocidad de estratificación (suministrada por el controlador robótico 4 de manera continua en la totalidad de la estratificación). Adicionalmente, las geometrías de cabeza y pieza influyen en qué sensores de temperatura IR 22 y 24, si los hubiera, apuntan a la pieza. Estos datos se enviarán desde el controlador robótico 4 hasta el ordenador de control 2. El ordenador de control 2 usará esta información para inhabilitar los sensores de temperatura IR que no están sobre la superficie de la pieza y, por tanto, no captan datos significativos.

La figura 3 es un diagrama que representa una vista en sección de un rodillo compactador 12 polimérico (por ejemplo, de poliuretano) que se deforma en la zona de compactación a medida que presiona contra un sustrato compuesto 16 dispuesto sobre una herramienta 18 hecha de metal (por ejemplo, aluminio). Se indican tres puntos de interés en la figura 3: A - ubicación de detección de rodillo posterior; B - ubicación de detección de rodillo delantero; y C - punto de compactación bajo el rodillo. Las partes del rodillo compactador 12, el sustrato 16 y la herramienta 18 dentro del rectángulo de líneas discontinuas en la parte superior de la figura 3 se muestran en escala ampliada en la parte inferior de la figura 3. En esta parte ampliada, puede observarse que la parte de la circunferencia exterior del rodillo compactador 12 que está en contacto con el sustrato 16 en la zona de compactación se aplanará. La temperatura de interés, que se deriva usando el modelo térmico, es la temperatura en el punto de compactación.

El modelo térmico asume que el procedimiento térmico ya ha alcanzado el estado estable. Por tanto, cada punto en la trayectoria de disposición de cinta experimenta la misma evolución de temperatura, salvo para el tiempo de inicio absoluto en cada punto. Sin embargo, en realidad, el estado estable no es siempre cierto. Por ejemplo, durante las trayectorias de

arranque iniciales cuando todo está frío (a temperatura ambiente). Asimismo, otros factores (tales como las temperaturas de rodillo y sustrato) normalmente no permanecen constantes durante el procedimiento entero y son difíciles de representar en un modelo térmico de estado estable bidimensional. En consecuencia, se adoptó un enfoque diferencial usando una razón derivada empíricamente R (aproximadamente constante respecto a los intervalos de temperatura de interés) que iguala la diferencia entre las temperaturas de sustrato en los puntos A y C y la diferencia entre las temperaturas de sustrato en los puntos A y B (es decir, $R = (T_C - T_A)/(T_B - T_A)$) para minimizar errores del modelo debido a cambios de condición inicial de tiempo en tiempo y de trayectoria en trayectoria. Según una implementación propuesta, el modelo térmico usa la razón R para estimar la temperatura del punto de compactación T_C en respuesta a la entrada de todas las variables identificadas anteriormente, incluyendo las lecturas de sensor y potencia de calentador actuales (es decir, temperaturas medidas) T_A y T_B . El modelo térmico está configurado, además, para calcular una potencia de calentador objetivo basándose en la desviación de la temperatura de punto de compactación estimada T_C de una temperatura de punto de compactación predeterminada (seleccionada a partir de curvas almacenadas previamente) decididas a ser el valor óptimo para las condiciones de procesamiento aplicables.

El modelo térmico se usó para desarrollar algoritmos de control relacionados con la velocidad, el número de pliegues y la potencia de calentador para la temperatura de estratificación bajo el rodillo compactador 12. Estos algoritmos de control están programados en el ordenador de control 2. Según una realización, los algoritmos de control se implementan usando un controlador de PID (incorporado en el ordenador de control 2). Un controlador de PID es un mecanismo de retroalimentación de circuito de control que calcula de manera continua un valor de error a medida que la diferencia entre un punto de ajuste deseado (por ejemplo, una temperatura de punto de compactación objetivo) y una variable de procedimiento medida (por ejemplo, la temperatura de punto de compactación estimada) y aplica una corrección basándose en términos proporcionales, integrales y derivativos. En este caso, el controlador de PID calcula de manera continua una diferencia entre la potencia de calentador actual y una potencia de calentador objetivo determinada usando la diferencia de temperatura del modelo térmico. Las ganancias para el controlador de PID se adaptan para asegurar el control satisfactorio de la potencia suministrada a la lámpara infrarroja 20. Por ejemplo, esas ganancias se adaptan para abordar el retardo térmico de los sensores y el calentador.

Tal como puede observarse en la figura 1, las bombillas de la lámpara infrarroja 20 están separadas por cierta distancia. El patrón de irradiación es aproximadamente cilíndrico para cada elemento en cada bombilla doble, así que la zona calentada, en general, variará dependiendo de la distancia desde la lámpara infrarroja 20, dando como resultado la variación en la densidad de potencia promedio o general en función de la zona. Se llevaron a cabo pruebas para determinar la absorción de energía del sustrato en diferentes parámetros de potencia, grosores de sustrato y tasas de alimentación de cabeza de suministro. Usando los sensores de temperatura IR montados, se ejecutaron una serie de pruebas de potencia constante, velocidad constante respecto a un número variable de pliegues de sustrato. Se adquirieron datos de temperatura a partir de zonas respectivas antes y después del rodillo compactador 12, tanto cuando se dispone material como cuando no se dispone material. Los datos recopilados en estas pruebas se usaron para calibrar la eficacia de la lámpara infrarroja 20 sobre la zona calentada entera en función de la entrada de potencia y la tasa de alimentación. Estos datos también se usaron para derivar los parámetros para la inclinación y la ordenada en el origen para determinar la entrada de calor en función de la tasa de alimentación y la temperatura objetivo.

Aunque no se relaciona directamente con la caracterización de calentador, el rodillo compactador 12 contribuye significativamente a la temperatura de sustrato durante el procesamiento. La temperatura de procesamiento real durante la colocación de fibras (es decir, la temperatura en el punto de compactación) no está cuando el material está en su punto más cálido. Dado que el rodillo compactador 12 está separado de la lámpara infrarroja 20 por una distancia (véase la figura 1), existe un periodo de enfriamiento que se produce antes de que el rodillo compactador 12 comprima el nuevo material sobre el sustrato 16 en el punto de compactación. Este es el punto en el que el procedimiento de AFP tiene lugar en realidad. Se desarrolló una prueba para caracterizar la ubicación del procedimiento de compactación en los diagramas de temperatura frente a tiempo de un único punto a lo largo de una pasada. Esta prueba implica colocar un termopar (no mostrado en los dibujos) a lo largo de la línea central de una pasada y situar un conmutador accionado por rodillo compactador aguas arriba de una distancia conocida, que produce una señal de sincronización para calcular la posición del rodillo compactador 12 en relación con los datos de termopar. Una pasada se ejecutó durante el montaje para pruebas con la lámpara infrarroja 20 funcionando en modo de potencia constante. La temperatura de sustrato y los datos de conmutador de sincronización se recopilaron para la única pasada con el rodillo compactador 12 en contacto con el sustrato 16 bajo cargas de compactación normales. Se recopilaron datos en un segundo pase idéntico, salvo porque el rodillo compactador 12 no estaba en contacto con y solo apenas por encima de la superficie del sustrato 16, para minimizar efectos de la distancia aumentada al sustrato. Los resultados de esta prueba se representan en la figura 9 (comentada en más detalle a continuación).

Tal como se describió anteriormente, el ordenador de control 2 está programado para controlar la potencia suministrada a la lámpara infrarroja 20 durante la disposición de estopas y la compactación del sustrato. La figura 4 es un diagrama de flujo que identifica etapas de un procedimiento de control principal de lámpara infrarroja 100 según una realización. El primer punto de ramificación en este flujo es el punto de decisión 102, en el que se hace una determinación de si se requiere una función especial o no. Esta ramificación maneja esas situaciones cuando no puede usarse el circuito de retroalimentación de sensor básico. Por ejemplo, cuando los sensores no apuntan directamente a la estratificación, se emplea una función especial de método de pieza con sensor inactivo 116. Cuando no pueden usarse los sensores de temperatura IR, el ordenador de control para el sistema de control de calentador vuelve al método tradicional usando ecuaciones de circuito abierto basadas en velocidad para el control de potencia. Cuando la estratificación inicia una rutina

agregada de pasada, se emplea una función especial tal como el método de inicio de pasada 112 o el método de reinicio de pasada 114.

5 La ramificación izquierda en el diagrama de flujo observado en la figura 4 es el método usado cuando los sensores son válidos (es decir, no se requiere función especial). En este circuito, el sistema adquiere datos de estado de estopa y velocidad a partir del controlador robótico y datos de temperatura a partir de los sensores de temperatura IR (etapa 104). Esta información se canaliza hasta las ecuaciones de modelo térmico junto con el número de pliegues en la estratificación actual (etapa 106).

10 Inicialmente, los calentadores pueden funcionar a una potencia baja (por ejemplo, durante el inicio). Después de recibir todos los datos relevantes, el modelo térmico (en forma de ecuaciones algebraicas en el sistema) infiere (es decir, estima) la temperatura del punto de compactación basándose en las lecturas de temperatura de los sensores de temperatura IR posterior y delantero 22 y 24 (etapa 108) y emite un nivel de potencia de calentador que debería producir una temperatura de punto de compactación (predeterminada) deseable (a continuación en el presente documento "temperatura de punto de compactación objetivo"). Ahora el calentador puede funcionar al nivel de potencia determinado por el modelo térmico. Sin embargo, mientras siguen recibiendo lecturas de temperatura durante el calentamiento del sustrato y el funcionamiento de la máquina de AFP, el modelo térmico registrará y emitirá de manera continua señales que representan la diferencia actual (es decir, "DELTA" en la figura 4) entre la temperatura de punto de compactación predicha (es decir, estimada) por el modelo térmico y la temperatura de punto de compactación objetivo (etapa 110). El circuito de PID 118 incorporado en los algoritmos de control usa esas desviaciones cambiantes para ajustar de manera continua (es decir, aplicar una pequeña corrección a) el nivel de potencia de calentador para conseguir o mantener la temperatura de punto de compactación objetivo. La temperatura de punto de compactación estimada T_C se calcula usando la ecuación $T_C = T_A + R(T_B - T_A)$.

Tal como se muestra en la figura 4, las funciones especiales al inicio y final de una pasada y durante el movimiento de pieza inactiva se controlan en el método de circuito abierto. Solo cuando la cabeza dispone material y los datos de temperatura son válidos, se implementa el control de circuito cerrado.

25 La figura 5 es un diagrama de bloques que identifica las entradas de datos a y los algoritmos ejecutados por un ordenador de control 2 configurado para emitir señales de control de potencia de lámpara infrarroja según una realización. Este sistema de control de calentador de circuito cerrado usa un modelo térmico 40 (descrito anteriormente) que puede cargarse en la memoria (por ejemplo, memoria de acceso aleatorio) del ordenador de control 2. El modelo térmico 40 tiene en cuenta un modelo de estratificación/herramienta 42 (que proporciona el número de pliegues en la estratificación actual) y un modelo de geometría de cabeza 44, ambos de los cuales pueden recuperarse de un medio de almacenamiento legible por ordenador tangible no transitorio (no mostrado). El modelo de estratificación/herramienta 42 incluye información de la programación de NC 48. Adicionalmente, el modelo térmico 40 (cuando se carga en el ordenador de control 2) recibe entradas de datos robóticos 46 (tal como la velocidad y la posición de la cabeza 10, la distancia que separa el calentador y el sustrato y el número de estopas activas) del controlador robótico 4 (véase la figura 2) y datos de temperatura de los sensores de temperatura IR 22, 24. El modelo térmico 40 comprende ecuaciones configuradas para emitir estimaciones de temperatura 50 basándose en la entrada de variables al modelo térmico 40. Estas estimaciones de temperatura 50 incluyen la temperatura de sustrato inferida bajo el rodillo compactador 12 y la temperatura de sustrato inferida bajo la lámpara infrarroja 20.

40 El modelo térmico 40 recibe entradas de los sensores de temperatura IR (incluyendo los sensores de temperatura IR 22, 24 y los otros sensores de temperatura IR). Puede usarse más de un sensor de temperatura IR para medir la temperatura de material delante del rodillo compactador, detrás del rodillo compactador y en los bordes derecho e izquierdo del rodillo compactador. Además de las mediciones de temperatura de los sensores de temperatura IR, el modelo térmico 40 está configurado para tener en cuenta el número de pliegues colocados anteriormente, tal como se presenta por la programación de NC 48 y la capacidad de emisión de material de sustrato, cuya información se incluye en el modelo de estratificación/herramienta 42. Para representar contornos complejos en la herramienta 18, el ordenador de control 4 recibe datos robóticos 46 que representan la posición, la velocidad y la aceleración en tiempo real de la cabeza de AFP 10, la distancia y la orientación en tiempo real de la lámpara infrarroja 20 en relación con el sustrato, el número de estopas activas que van a procesarse por la cabeza de AFP 10. Usando la información recibida, el modelo térmico 40 estima la temperatura de sustrato bajo el rodillo compactador 12.

50 El ordenador de control 2 ejecuta, además, algoritmos de control 60 que están configurados para mantener las condiciones de calentamiento óptimas para la colocación de fibras de materiales preimpregnados termoestables en respuesta a la recepción de las estimaciones de temperatura 50. El ordenador de control 2 procesa las entradas en tiempo real y emite señales de control que indican la potencia de calentador necesaria para alcanzar la temperatura de sustrato objetivo en el punto de compactación. Los algoritmos de control 52 incluyen un controlador de PID. Basándose en la diferencia entre las temperaturas de punto de compactación objetivo y estimada, el controlador de PID genera señales de control de potencia de calentador para cambiar la potencia eléctrica suministrada a la lámpara infrarroja 20 de una manera que reduce la diferencia entre las temperaturas de punto de compactación objetivo y estimada. Adicionalmente, la temperatura estimada bajo la lámpara infrarroja 20 puede usarse para evitar que el material exceda las temperaturas máximas permitidas.

En particular, el ordenador de control 2 está configurado para controlar la lámpara infrarroja 20 basándose en la proximidad de la herramienta 18. La figura 6 es un diagrama que muestra la misma vista lateral de la cabeza de AFP 10 anteriormente representada en la figura 1, salvo que en la situación representada en la figura 6, la herramienta 18 está, además, lejos de la lámpara infrarroja 20 debido al contorno de la herramienta 18. A la inversa, en la situación representada en la figura 7, la herramienta 18 está más cerca de la lámpara infrarroja 20.

La distancia que separa la herramienta 18 y la lámpara infrarroja 20 en el punto más cercano (es decir, la distancia mínima) puede calcularse por el controlador robótico 4 (véase la figura 2) usando información del modelo de estratificación/herramienta 42, información del modelo de geometría de cabeza 44 y datos de posición de cabeza extraídos de la programación de NC 48 (cuyos datos de posición de cabeza son un componente de datos robóticos 46). Para compensar los cambios en la distancia entre la herramienta 18 y la lámpara infrarroja 20, la potencia suministrada a la lámpara infrarroja de potencia variable 20 debería ajustarse por el ordenador de control 2 para ser inversamente proporcional a esa distancia. Según realizaciones alternativas, la distancia entre la herramienta 18 y la lámpara infrarroja 20 puede medirse usando sensores de distancia (por ejemplo, una cabeza de detector óptico que comprende un interferómetro y un fotodetector).

Según una realización, existen tres situaciones en las que las estopas se dispensan de la cabeza. Los sensores de temperatura IR 22, 24 necesitan situarse de modo que existan datos de temperatura disponibles para el ordenador de control 2 para cada situación. La primera situación es cuando una pasada progresa hacia abajo de una superficie de sección decreciente y, en consecuencia, las estopas exteriores se cortan para disminuir el ancho de banda. Las otras dos situaciones son imágenes especulares de la otra, cuando las estopas se colocan activamente o bien en un borde de la banda de estopa o bien en el otro. Por ejemplo, la última pasada al final de un pliegue cuando la trayectoria de fibra es paralela al límite de pliegue, pueden existir solo unas pocas estopas que van a colocarse. En este caso, se usan las estopas exteriores, no las estopas centrales, a menos que se seleccionen específicamente por el programador de NC. Se necesitan sensores para medir temperaturas de sustrato cuando se colocan las estopas exteriores. En una implementación propuesta, se usaría una cabeza de doce estopas. Por tanto, los tres sensores de temperatura IR de cada conjunto (es decir, el conjunto de sensores de temperatura IR 22 y el conjunto de sensores de temperatura IR 24) se situarían para detectar las respectivas temperaturas de la estopa n.º 1, entre las estopas n.º 7 y n.º 8 y la estopa n.º 12. El séptimo sensor de temperatura IR apuntaría al lado trasero del rodillo compactador 12 para medir su temperatura. Y el último sensor de temperatura IR se colocaría delante de la lámpara infrarroja 20 para medir la temperatura de sustrato antes del calentamiento activo.

Durante un procedimiento de colocación de fibras, no todos los sensores de temperatura IR estarán en una posición para proporcionar una lectura válida. Al inicio y al final de las pasadas, a medida que la cabeza se aproxima o se aleja de la superficie, puede haber reflejos que se visualizan por un sensor de temperatura IR. Asimismo, los sensores de temperatura IR exteriores (por ejemplo, los sensores situados para medir con la estopa n.º 1 o la estopa n.º 12 en una banda de doce estopas) pueden no visualizar la zona que va a procesarse debido al número de estopas que va a colocarse. Adicionalmente, al principio o final de las pasadas, los sensores de temperatura IR podrían visualizar las herramientas 18, produciendo una respuesta no relevante. Según una realización, se incorporan medios para determinar cuándo proporciona el sensor de temperatura IR una señal válida. El procesamiento posterior se configurará para leer el programa de NC e insertar códigos para definir qué sensores producen señales válidas.

Debido a que hay tres sensores de temperatura IR 22 delante del rodillo compactador 12 y tres sensores de temperatura IR 24 detrás del rodillo compactador 12, se incluyen medios para integrar las señales de los tres sensores de temperatura IR delanteros y los tres posteriores en una entrada útil para los algoritmos de control 52 en el software. Por ejemplo, si los tres sensores de temperatura IR 22 delante del rodillo compactador 12 producen diferentes temperaturas, es deseable un método para producir una señal común al ordenador de control 2. Según una técnica, los sensores de temperatura IR centrales pueden usarse para accionar el algoritmo de control.

El fin del modelado térmico es proporcionar la máquina de AFP con una temperatura predicha de manera precisa en el punto de compactación en relación con las mediciones de sensor de temperatura IR de rodillo posterior y anterior. Se construyó de manera paramétrica un modelo de elementos finitos (FEM) bidimensional y se llevaron a cabo análisis para predecir la temperatura del punto de compactación en función de la velocidad de procesamiento y la salida de potencia de la lámpara infrarroja 20. La simulación de FEM también representó la pérdida de calor debido al contacto de rodillo y el efecto del número de pliegues ya dispuestos.

Considerando el procedimiento físico de colocación de fibras, puede derivarse una evolución de temperatura conceptualizada en cualquier punto de la pasada de estratificación. La figura 8 es un gráfico que muestra una evolución de temperatura conceptualizada en cualquier punto de la pasada de estratificación. La lectura de los sensores de temperatura IR 22 antes del rodillo compactador 12 (indicada por el punto sombreado del extremo izquierdo en la figura 8) está ligeramente a la derecha del punto máximo debido a la distancia de retardo entre la ubicación de detección y el borde de salida de la lámpara infrarroja 20. El contacto de rodillo se produce en el cambio del punto de inclinación y dura un cierto tiempo dependiendo de la velocidad y la longitud de contacto. Después del contacto de rodillo, continúa el enfriamiento natural mediante convección y se adquiere la lectura de los sensores de temperatura IR 24 después del rodillo compactador 12 (indicada por el punto sombreado del extremo derecho en la figura 8). En resumen, la tarea para el modelado térmico es simular analíticamente esta curva de evolución de temperatura y desarrollar ecuaciones para predecir la temperatura del punto de compactación, definida como la temperatura en el punto de inicio del enfriamiento

bajo la zona de rodillo, tal como se indica en la figura 8. A continuación, se proporcionarán detalles adicionales en cuanto al enfoque técnico en la simulación del procedimiento real.

El sistema de control de calentador dado a conocer en el presente documento se basa en los algoritmos de circuito abierto para gestionar los controles de calentador de parte inactiva así como las regiones de transición cuando el material se coloca pero los sensores de temperatura IR no proporcionan datos válidos debido a sus ubicaciones, tal como en el inicio y final de una pasada. La arquitectura de control también se basa en los algoritmos de circuito abierto para proporcionar un parámetro de potencia objetivo basándose en la velocidad de cabeza de AFP y el controlador de circuito cerrado de PID varía el parámetro de potencia real basándose en el objetivo, para conseguir la temperatura de sustrato ordenada. Se recopilaron datos de cámara infrarroja para comprender el perfil de la zona afectada por calor del sistema de calentador instalado en el sistema de AFP robótico. Según un prototipo, las bombillas de calentador tenían un ancho de 6 pulgadas (15 cm), mientras que la cabeza de suministro se diseñó para doce estopas de media pulgada (1,3 cm) de ancho para un ancho de banda de 6 pulgadas (15 cm). Las imágenes infrarrojas adquiridas mostraron que este calentador no produjo una temperatura uniforme a través del ancho de banda de 6 pulgadas (15 cm) entero. Había una diferencia aproximada de 40°C en temperatura desde el centro de la zona de calentador hasta el borde exterior en el que se colocan las estopas exteriores. Dado que esta fue una prueba estática, la temperatura real registrada no era representativa de la temperatura de sustrato real esperada durante la colocación de fibras, sino que era en su lugar un indicador de la uniformidad de calentador. Para mitigar esta variabilidad, pueden utilizarse bombillas infrarrojas que son más anchas que el ancho de banda del material. Según una realización, el modelo térmico puede estar configurado para usar los sensores de temperatura IR centrales exclusivamente,

Al final de la pasada, las temperaturas de material caen y, entonces, llegan a su máximo cuando la cabeza de AFP 10 llega al final de la pasada y se despega. Esta acción produce una oscilación momentánea de temperatura. El sistema de circuito cerrado puede estar configurado para ignorar los datos de entrada cuando ya no son válidos, tal como cuando la retracción de la cabeza de AFP 10 desde la superficie produce una oscilación momentánea de temperatura.

Como parte del procedimiento de calibración del modelo térmico, se llevaron a cabo pruebas para medir las temperaturas de las zonas detectadas por los sensores de temperatura IR centrales posteriores y centrales delanteros. Hubo una caída significativa en la temperatura de sustrato entre los sensores posteriores y delanteros. El procedimiento real se produce en el punto de compactación y es el punto deseado de control para el sistema de circuito cerrado. Sin embargo, ese punto no puede medirse. Por esta razón, se desarrolló un modelo térmico para comprender la relación entre las lecturas de sensor antes y después del rodillo y la temperatura en el punto de compactación. A partir del modelo térmico, puede calcularse una temperatura de punto de compactación inferida y usarse para accionar el sistema de control de calentador para producir una temperatura de punto de compactación deseada. El modelo térmico puede estar configurado para replicar las condiciones de pruebas reales. Los datos de temperatura adquiridos durante la prueba también se usaron para calibrar los valores de eficiencia de calentador en el modelo térmico.

Se llevaron a cabo las pruebas mencionadas anteriormente mientras no se disponía estopa. Algunas de las pruebas se repitieron mientras se disponía estopa. Para un sustrato de cuatro u ocho pliegues, la temperatura de sustrato medida varió en un número de grados Celsius en comparación a cuando no se disponía estopa. Estos datos también se usaron para calibrar el modelo térmico.

Se muestra otro ejemplo de los efectos del rodillo compactador 12 en la figura 9, que es un gráfico de temperatura de sustrato frente a tiempo durante el calentamiento, el enfriamiento y la compactación de rodillo basándose en datos de termopar escondidos. Los diagramas muestran la temperatura de sustrato tal como se mide por un termopar en el pliegue por debajo de la superficie, mientras la lámpara infrarroja 20 y el rodillo compactador 12 pasan sobre el termopar. La línea marcada como "con compactación" representa datos recopilados con el rodillo en contacto con la superficie. La línea marcada como "sin compactación" representa datos recopilados con el rodillo apenas fuera de la superficie. Las dos líneas verticales representan los límites del intervalo de tiempo (delimitados por un tiempo de "inicio de compactación" y un tiempo de "detención de compactación") durante el que el material se compactó por el rodillo. Las flechas aproximan el lugar al que apuntan los sensores de temperatura IR posteriores y delanteros. En este diagrama, la temperatura en el punto de compactación cae rápidamente cuando el material está bajo compactación por el rodillo. En el presente documento, el rodillo enfría bruscamente el material. Cuando se vuelve a ejecutar sin contacto de rodillo, no se produce el enfriamiento brusco. También es evidente en este diagrama que la temperatura de sustrato empieza a enfriarse antes de la compactación, debido a la proximidad del calentador al punto de compactación.

Dada la configuración de dos bombillas infrarrojas de la lámpara infrarroja representada en la figura 1, es razonable asumir que el flujo de calor en el centro de la zona de compactación calentada es mayor que el de los bordes. Al construir un modelo térmico con el fin de desarrollo inicial, la distribución de flujo de calor espacial aproximada se aproximó, además, en una evolución de tiempo de flujo de calor que cada elemento de superficie experimenta cuando el calentador se mueve de izquierda a derecha. La figura 10 es un gráfico que muestra una evolución de tiempo conceptualizada de flujo de calor sobre cada elemento de superficie. En este ejemplo de desarrollo, el flujo de calor promedio era de H , $H1 = 0,5H$, $H2 = 1,5H$ y $H2 = 3H1$. El parámetro t_1 es el tiempo de retardo que controla el comienzo del calentamiento según la ubicación de un elemento de superficie particular y la velocidad de movimiento de calentador. El parámetro t_4 es el tiempo de retardo que controla el final del calentamiento. El momento de nivel máximo de flujo de calor $t_p = t_1 + L_H/(2V)$, donde L_H es la longitud de calentamiento y V es la velocidad del calentador de movimiento. $\Delta t = t_2 - t_1 = t_4 - t_3$ es un tiempo de rampa insignificante solo por motivos informáticos. Se tomó un enfoque empírico para derivar la relación entre la salida de

potencia de calentador y el flujo de calor, que se encontró que era aproximadamente lineal. A través de la ejecución de los procedimientos reales a diferentes velocidades, se obtuvo un coeficiente de eficiencia empírico $C(V, d)$ que regula el flujo de calor real aplicado al modelo térmico, donde d es la distancia entre la superficie de lámpara y la superficie del pliegue superior del sustrato. Según una realización propuesta de un método de caracterización del perfil de flujo de calor, se diseñó un perfil térmico que se centraba en calcular el perfil de calor basándose en características de bombilla como factor de visualización, número de bombillas, curvatura de herramienta y distancia de calentador a herramienta.

Se llevaron a cabo análisis de FEM para predecir la temperatura del punto de compactación en función de la velocidad de procesamiento y la salida de potencia de la lámpara infrarroja 20. La simulación de FEM también representó la pérdida de calor debido al contacto de rodillo y el efecto del número de pliegues ya dispuestos. La figura 11 muestra evoluciones de tiempo-temperatura en los tres puntos de interés (A, B y C, véase la figura 3) cuando el calentador se movió a 0,1 m/s y la salida de potencia era del 100%. La curva de ubicación de detección de rodillo delantero B es básicamente una desviación desde la curva de punto de compactación C antes del contacto de rodillo, que solo se introduce en el punto de compactación C. La ubicación de detección de rodillo posterior A es más fría que el punto de compactación C y la ubicación de detección de rodillo delantero B porque está encima del pliegue preimpregnado solo dispuesto con la misma temperatura inicial que la temperatura ambiental.

La figura 12 muestra el efecto de velocidad de procesamiento en la temperatura del punto de compactación (punto de interés C), con salida de potencia del 100%. Tal como se espera, cuando la velocidad de procesamiento aumenta desde 0,05 m/s hasta 0,1 m/s y 0,25 m/s, la temperatura del punto de compactación disminuye. (Estas velocidades bajas se seleccionan solo con fines de simulación; la colocación de fibras normalmente se produce a velocidades más rápidas, por ejemplo, 0,5 o más metros por segundo). La figura 13 demuestra el efecto de salida de potencia en la temperatura de punto de compactación, que se escala de manera lineal con el porcentaje de salida de potencia. De nuevo, los datos mostrados en las figuras 12 y 13 se derivaron usando simulación de FEM.

Los resultados del estudio paramétrico para un sistema de control de temperatura de punto de compactación según una simulación de FEM llevaron a las siguientes conclusiones: (a) el aumento de temperatura en cada uno de los puntos de interés es linealmente proporcional a la salida de potencia; (b) la temperatura de punto de compactación (C) está más cercana al punto de detección de rodillo posterior (B) debido al enfriamiento por contacto de rodillo y al hecho de que el punto B se sitúa más cerca del punto de compactación C que el punto A; (c) no hay esencialmente ninguna diferencia cuando el número de pliegues estratificados es mayor a cuatro porque la conducción de calor transitorio a través del grosor en el tiempo de duración de interés no va más allá de ocho pliegues para el material de CFRP dado; y (d) como resultado, la razón de la diferencia de temperatura entre los puntos C y A respecto a la diferencia de temperatura entre B y A en función del número de pliegues dispuestos se aproxima a una constante (véase la figura 14).

Para validar el modelo térmico, se usaron resultados de prueba de caracterización de calentador para correlacionar con predicciones de modelo para la prueba de calentador preimpregnado de un pliegue. Después de investigación adicional, se concluyó que los resultados de análisis de elementos finitos eran consecuentes con la teoría: el aumento de temperatura debería ser proporcional a la entrada de flujo de calor.

Los datos de temperatura de punto de compactación modelados se desarrollaron en un método de predicción de la potencia porcentual necesaria para la lámpara infrarroja en función del número de pliegues en el sustrato, las tasas de alimentación y las temperaturas objetivo. El método que se implementó asumió una razón fija de la diferencia entre la temperatura del punto de compactación y la temperatura de sensor de temperatura IR posterior dividida por la diferencia entre el sensor de temperatura IR delantero y el sensor de temperatura IR posterior. Usando esta razón fija, la temperatura del punto de compactación puede inferirse entonces conociendo la diferencia de temperatura entre los sensores de temperatura IR posterior y delantero.

El sistema de retroalimentación de circuito cerrado descrito anteriormente está destinado a controlar variables extrañas. La temperatura de sustrato es una variable de este tipo. Se reflejarán cambios en la temperatura de sustrato en las lecturas del sensor de temperatura IR y entonces provocarán cambios en la potencia de calentador para conseguir la temperatura de punto de compactación deseada.

En resumen, el sistema descrito anteriormente permite practicar un método para controlar un calentador 20 durante la colocación de estopas de material de plástico reforzado con fibras por una máquina de colocación de fibras. Según una realización, el método comprende: (a) crear un modelo térmico 40 que correlacione una temperatura de un punto de compactación bajo un rodillo compactador 12 con temperaturas primera y segunda de un sustrato 16 en puntos de medición primero y segundo respectivamente, en el que el primer punto de medición se sitúa en la parte delantera del rodillo compactador 12 y en la parte posterior del calentador 20 y el segundo punto de medición se sitúa en la parte posterior del rodillo compactador 12 cuando el rodillo compactador 12 está en contacto con el sustrato 16; (b) compactar estopas de material de plástico reforzado con fibras en el sustrato 16 haciendo rodar el rodillo compactador 12 sobre una superficie del sustrato 16 con las estopas entre el mismo; (c) calentar el sustrato 16 en una zona aguas arriba del primer punto de medición durante la compactación usando un calentador alimentado eléctricamente 20; (d) adquirir una primera medición de temperatura a partir del primer punto de medición; (e) adquirir una segunda medición de temperatura a partir del segundo punto de medición; (f) usar el modelo térmico 40 para inferir una temperatura de punto de compactación estimada que es una función de al menos una de las mediciones de temperatura primera y segunda; (g) calcular una diferencia entre la temperatura de punto de compactación estimada y una temperatura de punto de compactación objetivo;

(h) emitir señales de control que representan una orden para suministrar una cantidad de potencia eléctrica al calentador 20, cuya cantidad de potencia eléctrica se calcula para reducir la diferencia entre la temperatura de punto de compactación estimada y la temperatura de punto de compactación objetivo; y (i) suministrar la cantidad de potencia eléctrica al calentador, en el que las etapas (f) a (g) se realizan por un sistema informático (por ejemplo, el ordenador de control 4).
5 Este método puede comprender, además: adquirir una tercera medición de temperatura a partir de un tercer punto de medición en el sustrato 16 situado en la parte delantera del calentador 20; configurar el modelo térmico 40 para inferir una temperatura de punto de calentamiento estimada de la parte del sustrato 16 bajo el calentador 20 basándose al menos en parte en la diferencia entre las temperaturas primera y tercera; determinar si la temperatura de punto de calentamiento estimada excede una temperatura de sustrato máxima permitida o no; y apagar el calentador 20 si la temperatura de
10 punto de calentamiento estimada excede la temperatura de sustrato máxima permitida.

Aunque se han descrito métodos para el control de circuito cerrado de calentamiento de AFP con referencia a diversas realizaciones, se comprenderá por los expertos en la técnica que pueden hacerse diversos cambios. Adicionalmente, pueden hacerse muchas modificaciones para adaptar las enseñanzas en el presente documento a una situación particular. Por tanto, se pretende que las reivindicaciones no estén limitadas a las realizaciones particulares dadas a conocer en el
15 presente documento. El alcance de protección se define por las reivindicaciones adjuntas.

Las realizaciones dadas a conocer anteriormente usan uno o más sistemas informáticos. Tal como se usa en las reivindicaciones, el término "sistema informático" comprende uno o más dispositivos informáticos o de procesamiento. Tales dispositivos informáticos o de procesamiento normalmente incluyen uno o más de lo siguiente: un procesador, un controlador, una unidad de procesamiento central, un microcontrolador, un procesador informático con grupo reducido de
20 instrucciones, un circuito integrado de aplicación específica, un circuito de lógica programable, una matriz de puertas de campo programable, un procesador de señales digitales y/o cualquier otro circuito o dispositivo de procesamiento capaz de ejecutar las funciones descritas en el presente documento. Los ejemplos anteriores son simplemente a modo de ejemplo y, por tanto, no están destinados a limitar de ninguna manera la definición y/o el significado del término "sistema informático".

Los métodos descritos en el presente documento pueden codificarse como instrucciones ejecutables realizadas en un medio de almacenamiento legible por ordenador tangible no transitorio, que incluye, sin limitación, un dispositivo de almacenamiento y/o un dispositivo de memoria. Tales instrucciones, cuando se ejecutan por un sistema informático o de procesamiento, provocan que el dispositivo de sistema realice al menos una parte de los métodos descritos en el presente documento.
25

30

REIVINDICACIONES

1. Máquina de colocación de fibras automática que comprende:
una cabeza (10) que comprende un rodillo compactador (12);
un calentador (20) montado en la parte delantera del rodillo compactador;
- 5 un primer sensor de temperatura (22) dirigido a un primer punto de medición de sustrato (16) situado en la parte delantera del rodillo compactador y en la parte posterior del calentador, en la que el primer sensor de temperatura, cuando está en funcionamiento, emite primeros datos de temperatura cuando el rodillo compactador está en contacto con el sustrato;
- un segundo sensor de temperatura (24) dirigido a un segundo punto de medición del sustrato situado en la parte posterior del rodillo compactador, en la que el segundo sensor de temperatura, cuando está en funcionamiento, emite segundos datos de temperatura cuando el rodillo compactador está en contacto con el sustrato;
- 10 un medio de almacenamiento legible por ordenador tangible no transitorio que almacena código de ordenador que representa un modelo térmico (40) que está configurado para inferir una temperatura de punto de compactación estimada del sustrato bajo el rodillo compactador en el punto de compactación basándose al menos en parte en los datos de temperatura primeros y segundos; y
- 15 un sistema informático (2) configurado para realizar las siguientes operaciones:
usar el modelo térmico para calcular una cantidad de potencia eléctrica que va a suministrarse al calentador en función de una diferencia entre los datos de temperatura primeros y segundos emitidos por los sensores de temperatura primero y segundo; y
emitir señales de control de potencia de calentador que representan la cantidad de potencia eléctrica que va a suministrarse al calentador.
- 20 2. Máquina de colocación de fibras automática según la reivindicación 1, en la que el calentador comprende una lámpara infrarroja, mientras los sensores de temperatura primero y segundo comprenden sensores de temperatura infrarrojos primero y segundo respectivamente.
- 25 3. Máquina de colocación de fibras automática según la reivindicación 1 o 2, que comprende, además, un tercer sensor de temperatura dirigido a un tercer punto de medición del sustrato situado en la parte delantera del calentador, en la que el tercer sensor de temperatura, cuando está en funcionamiento, emite terceros datos de temperatura cuando el rodillo compactador está en contacto con el sustrato y en la que el modelo térmico está configurado, además, para inferir la temperatura de punto de compactación estimada del sustrato bajo el calentador basándose al menos en parte en una diferencia entre los datos de temperatura primeros y terceros emitidos por los sensores de temperatura primero y tercero.
- 30 4. Máquina de colocación de fibras automática según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en la que la cabeza comprende, además, protección (26) dispuesta y configurada para bloquear que la radiación reflejada por el sustrato alcance el primer sensor de temperatura.
5. Máquina de colocación de fibras automática según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en la que el modelo térmico está configurado para calcular una diferencia entre la temperatura de punto de compactación estimada y una temperatura de punto de compactación objetivo.
- 35 6. Máquina de colocación de fibras automática según la reivindicación 5, en la que el sistema informático comprende, además, un controlador proporcional, integral y derivativo (52) que recibe una señal que representa la diferencia calculada usando el modelo térmico y emite señales de control de potencia de calentador configuradas para provocar que el calentador funcione de una manera que reduce la diferencia entre la temperatura de punto de compactación estimada y la temperatura de punto de compactación objetivo.
- 40 7. Máquina de colocación de fibras automática según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, que comprende, además:
un acondicionador de señal (6) acoplado de manera operativa para recibir las señales de control de potencia de calentador del sistema informático; y
un controlador de potencia de calentador (8) acoplado de manera operativa al acondicionador de señal, en la que el controlador de potencia de calentador está configurado para convertir señales de control de potencia de calentador acondicionadas a un voltaje de salida que se usa para alimentar el calentador.
- 45 8. Máquina de colocación de fibras automática según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en la que el sistema informático está configurado, además, para ejecutar un algoritmo de control de circuito abierto cuando la cabeza dispone material y los primeros datos de temperatura son inválidos y un algoritmo de control de circuito cerrado cuando la cabeza dispone material y los primeros datos de temperatura son válidos.
- 50

9. Método para controlar un calentador (20) durante la colocación de estopas (14) de material de plástico reforzado con fibras por una cabeza de una máquina de colocación de fibras, que comprende:
- 5 (a) crear un modelo térmico (40) que correlaciona una temperatura de un punto de compactación bajo un rodillo compactador (12) con al menos una primera temperatura de un sustrato (16) en un primer punto de medición, en el que el primer punto de medición se sitúa sobre el sustrato en la parte delantera del rodillo compactador y en la parte posterior del calentador (20) cuando el rodillo compactador está en contacto con el sustrato;
- (b) compactar estopas (14) de material de plástico reforzado con fibras en el sustrato haciendo rodar el rodillo compactador sobre una superficie del sustrato con las estopas entre el mismo;
- 10 (c) calentar el sustrato en una zona aguas arriba del primer punto de medición durante la compactación usando el calentador (20), estando el calentador (20) alimentado eléctricamente;
- (d) adquirir una primera medición de temperatura del primer punto de medición;
- (e) usar el modelo térmico para inferir una temperatura de punto de compactación estimada del sustrato bajo el rodillo compactador en el punto de compactación que es una función de al menos la primera medición de temperatura;
- 15 (f) calcular una diferencia entre la temperatura de punto de compactación estimada y una temperatura de punto de compactación objetivo;
- (g) emitir señales de control que representan una orden para suministrar una cantidad de potencia eléctrica al calentador, cuya cantidad de potencia eléctrica se calcula para reducir la diferencia entre la temperatura de punto de compactación estimada y la temperatura de punto de compactación objetivo; y
- (h) suministrar la cantidad de potencia eléctrica al calentador,
- 20 en el que al menos las etapas (e) a (g) se realizan por un sistema informático (2);
- en el que el modelo térmico también correlaciona la temperatura del punto de compactación con una segunda temperatura del sustrato en un segundo punto de medición, en el que el segundo punto de medición se sitúa en el sustrato en la parte posterior del rodillo compactador cuando el rodillo compactador está en contacto con el sustrato y la etapa (e) comprende usar el modelo térmico para inferir una temperatura de punto de compactación estimada que es una función de una diferencia de las mediciones de temperatura primera y segunda.
- 25 10. Método según la reivindicación 9, en el que la etapa (c) comprende irradiar el sustrato con radiación infrarroja.
11. Método según la reivindicación 9 o 10, en el que la temperatura de punto de compactación estimada emitida por el modelo térmico es una función de una velocidad a la que se mueve la cabeza.
- 30 12. Método según la reivindicación 9, 10 u 11, en el que la temperatura de punto de compactación estimada emitida por el modelo térmico es una función de un número de pliegues del sustrato.
13. Método según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 12 que comprende, además:
- adquirir una tercera medición de temperatura a partir de un tercer punto de medición en el sustrato situado en la parte delantera del calentador;
- 35 configurar el modelo térmico para inferir una temperatura de punto de calentamiento estimada de una parte del sustrato bajo el calentador basándose al menos en parte en la diferencia entre las temperaturas primera y tercera;
- determinar si la temperatura de punto de calentamiento estimada excede una temperatura de sustrato máxima permitida o no; y
- apagar el calentador si la temperatura de punto de calentamiento estimada excede la temperatura de sustrato máxima permitida.
- 40

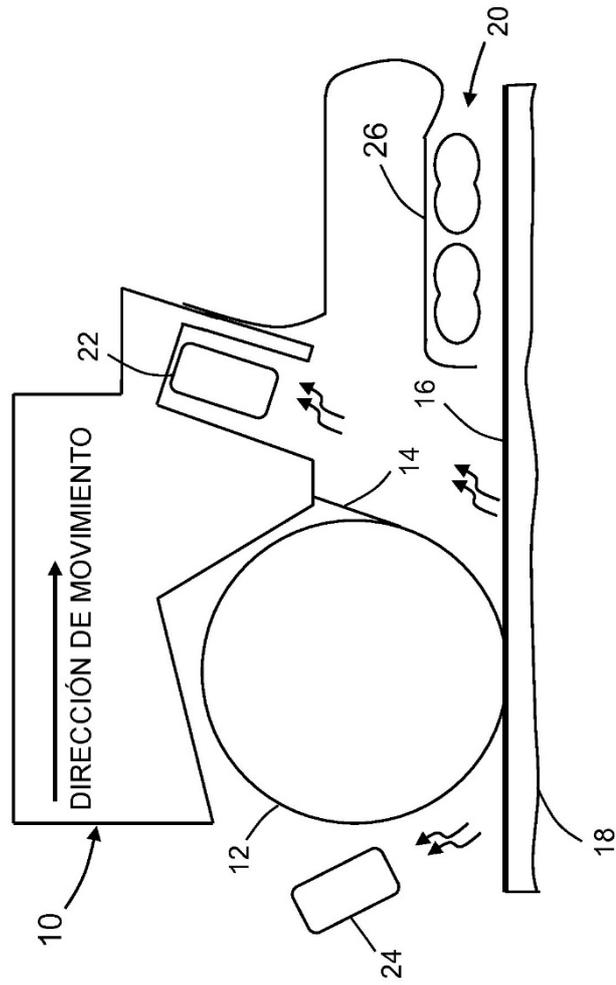


FIG. 1

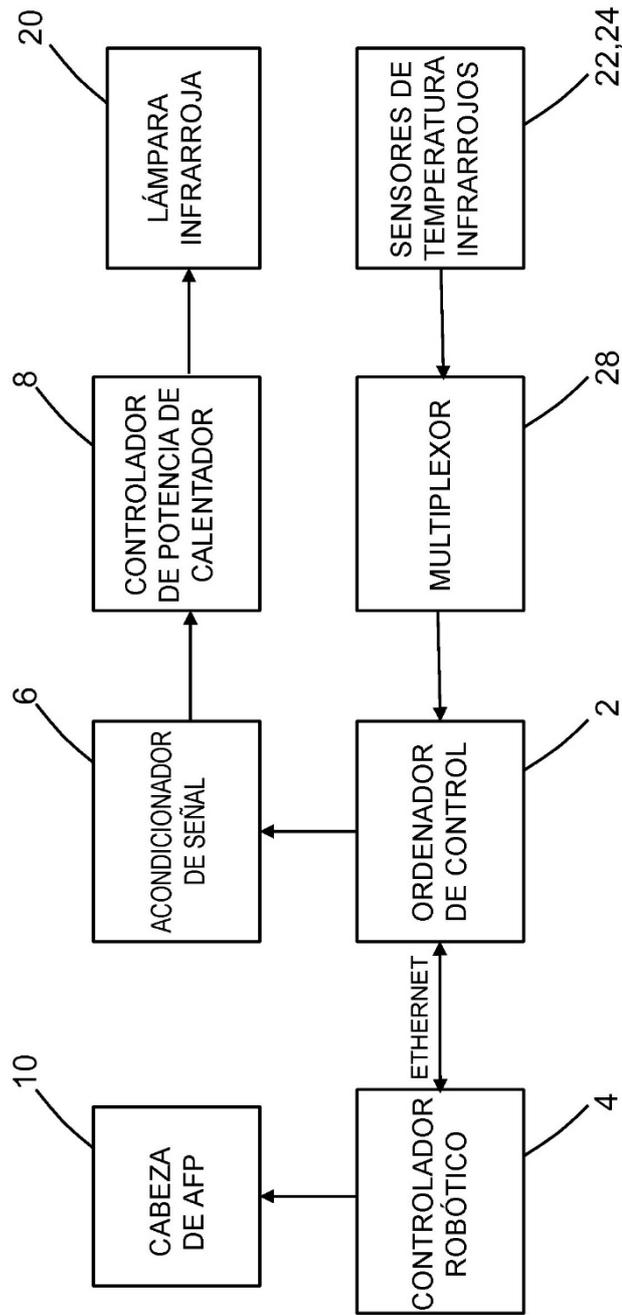


FIG. 2

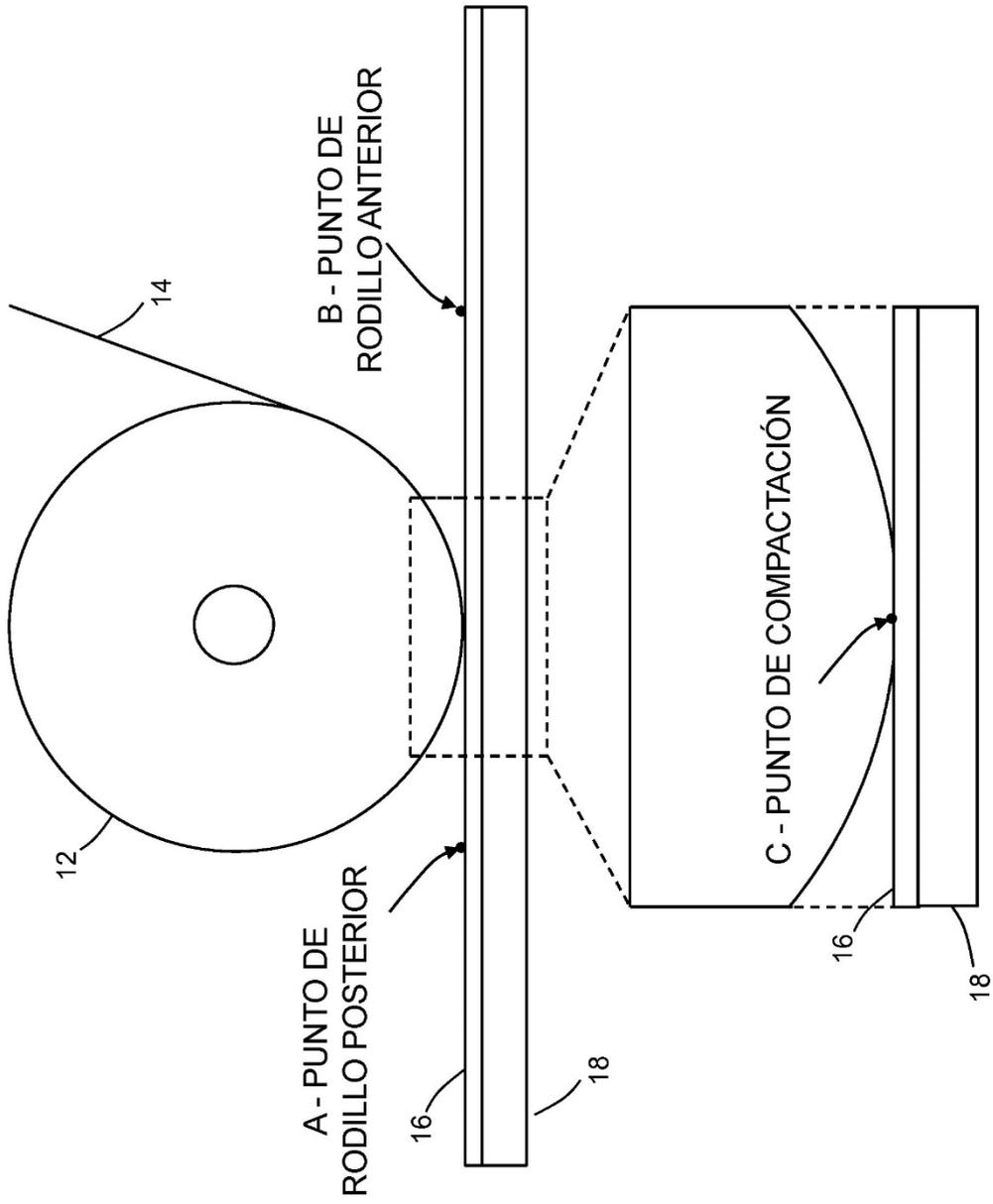


FIG. 3

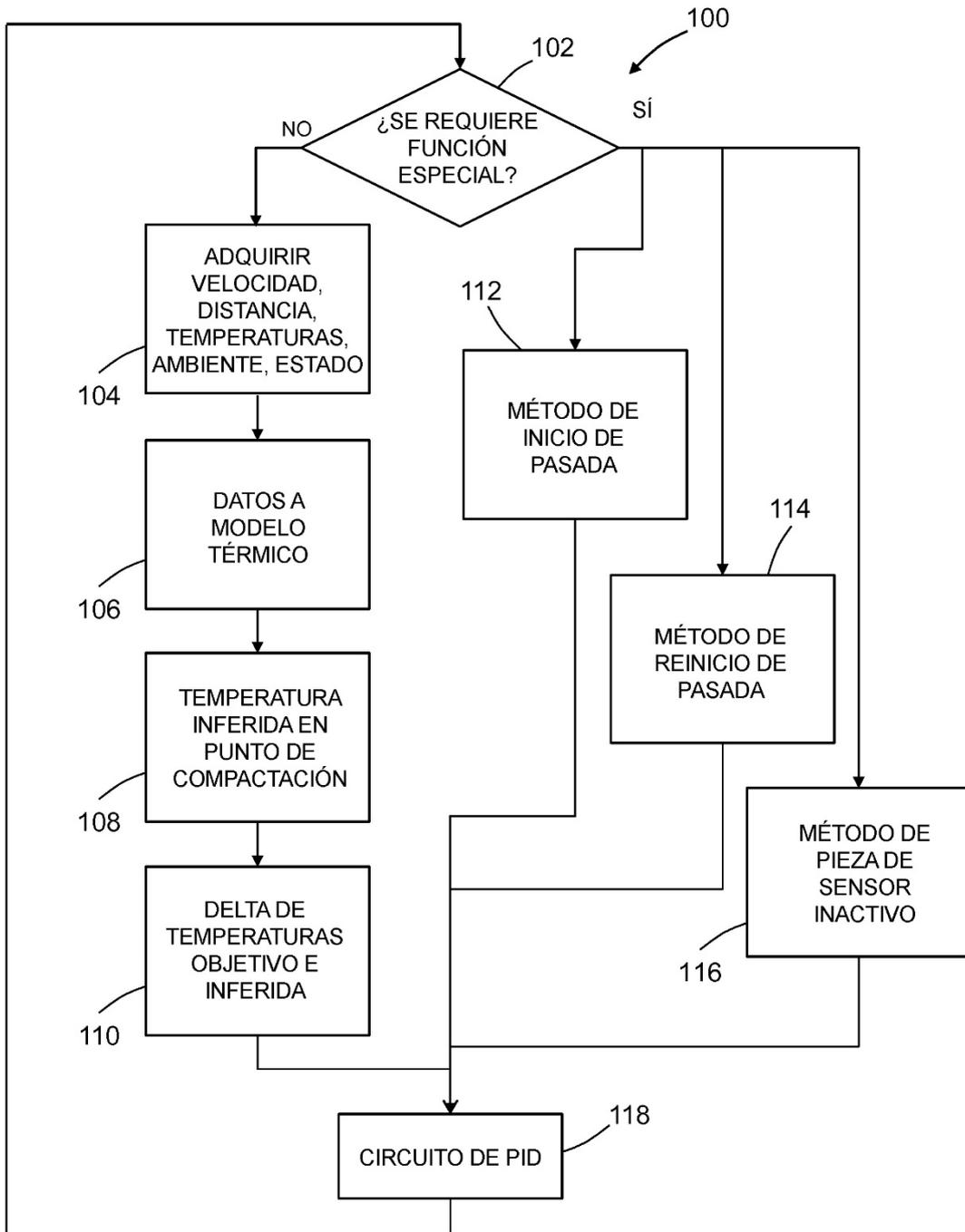


FIG. 4

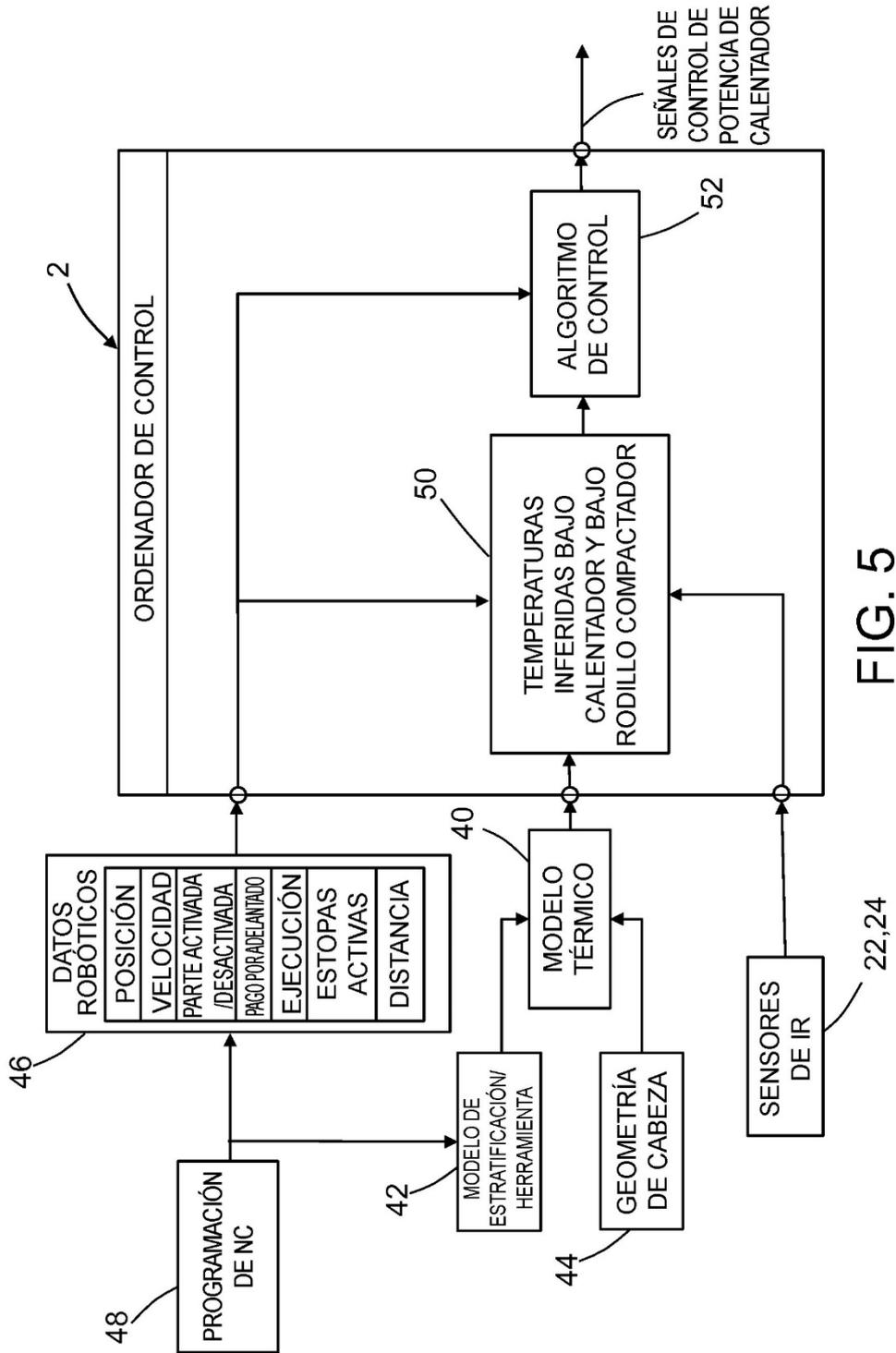
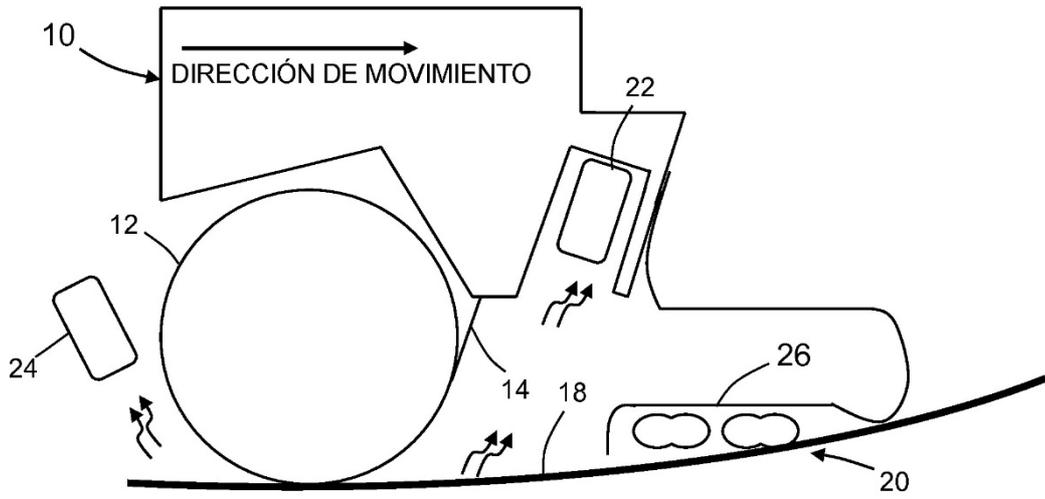
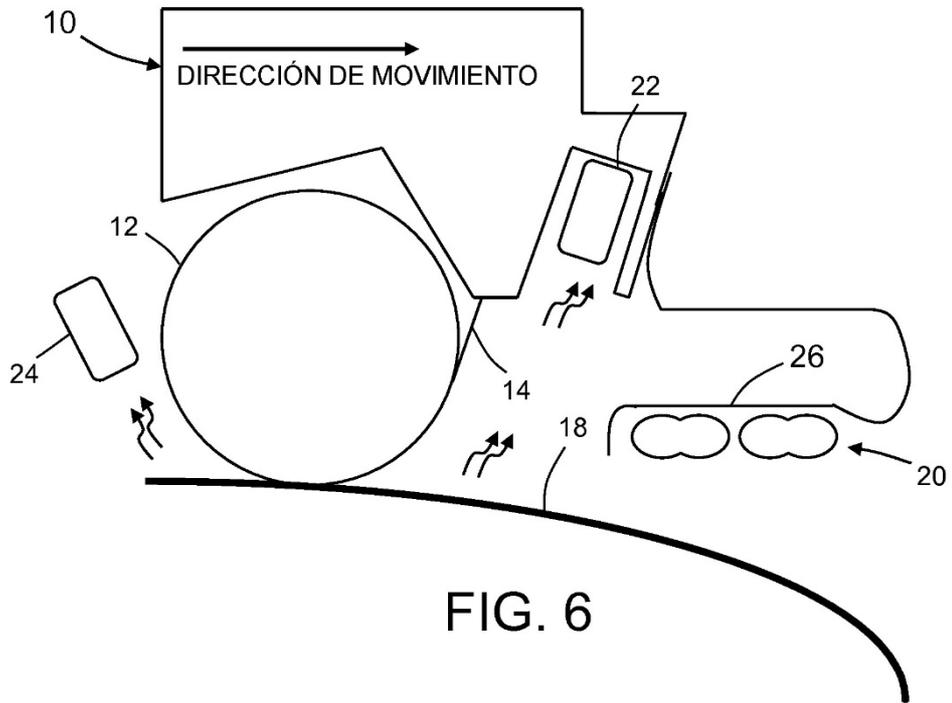
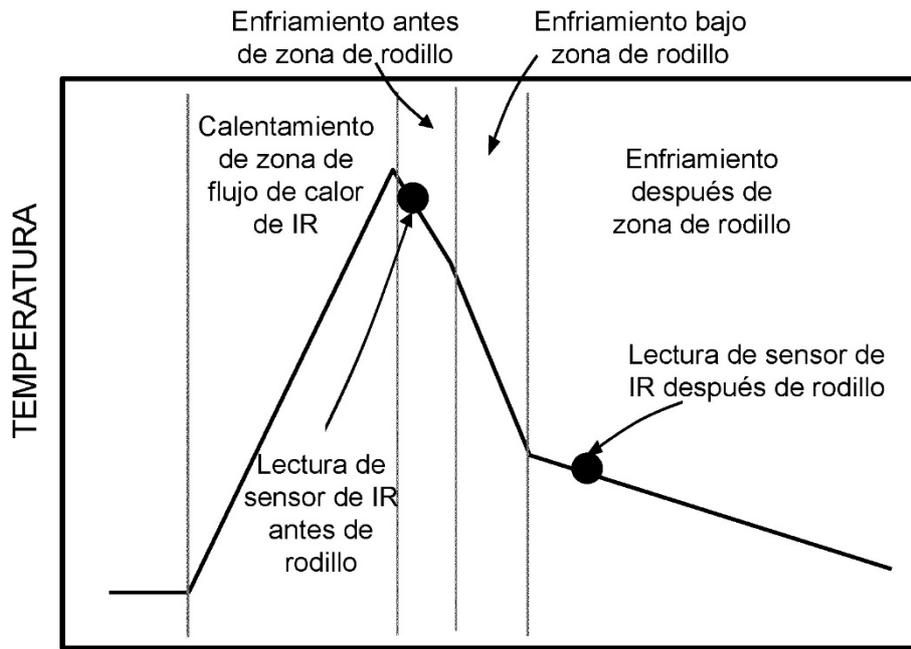


FIG. 5





TIEMPO

FIG. 8

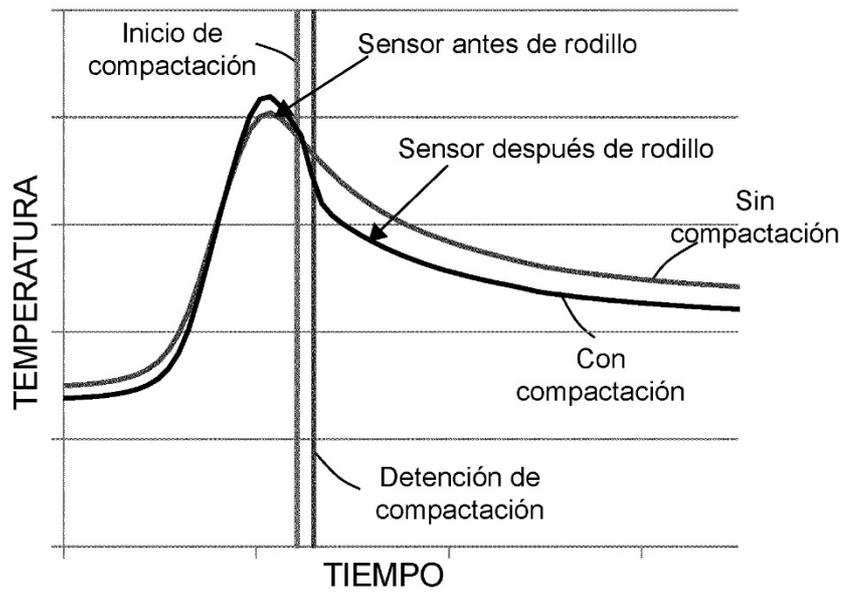


FIG. 9

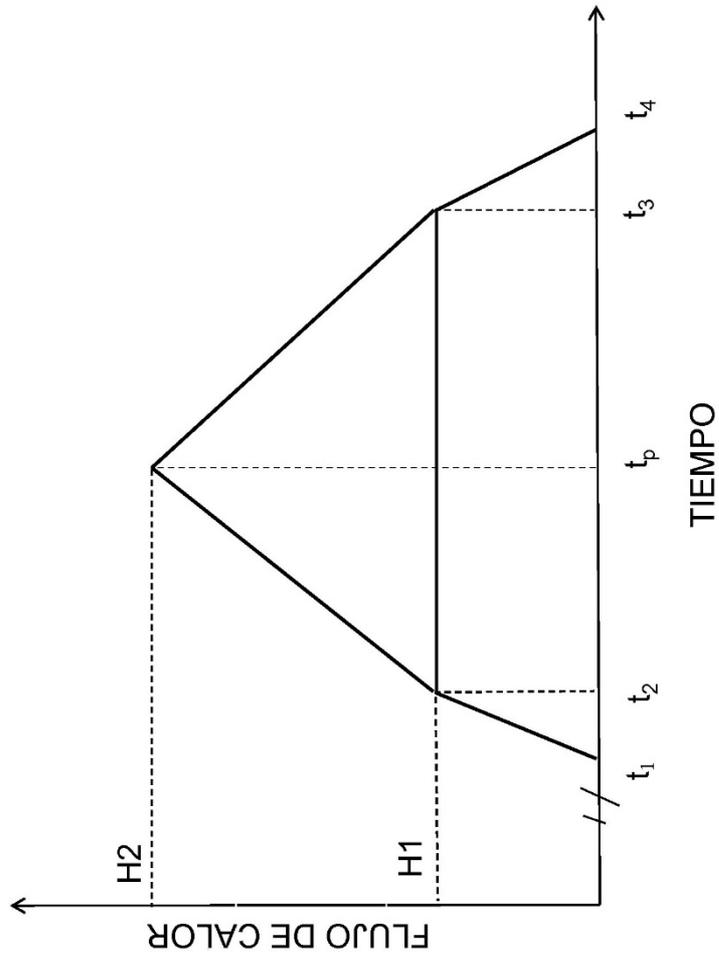


FIG. 10

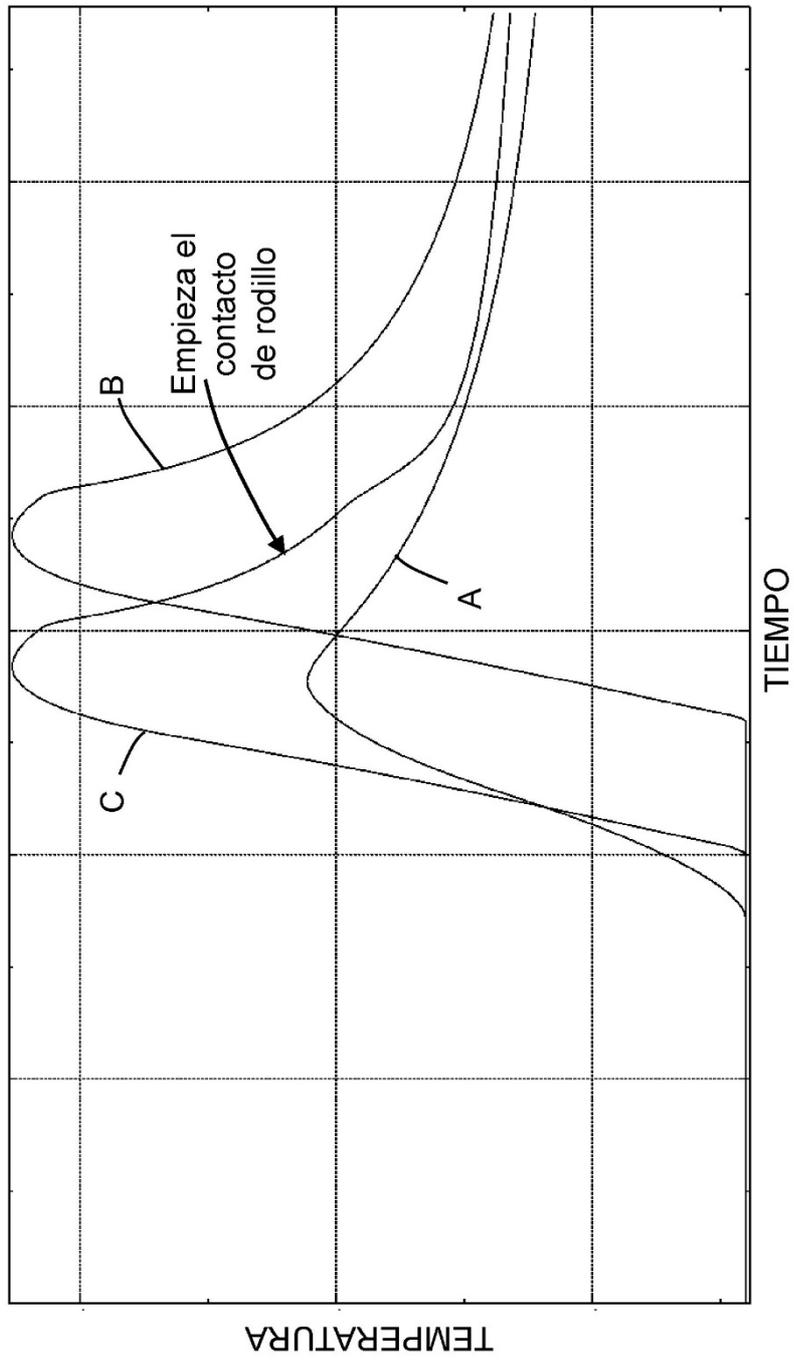


FIG. 11

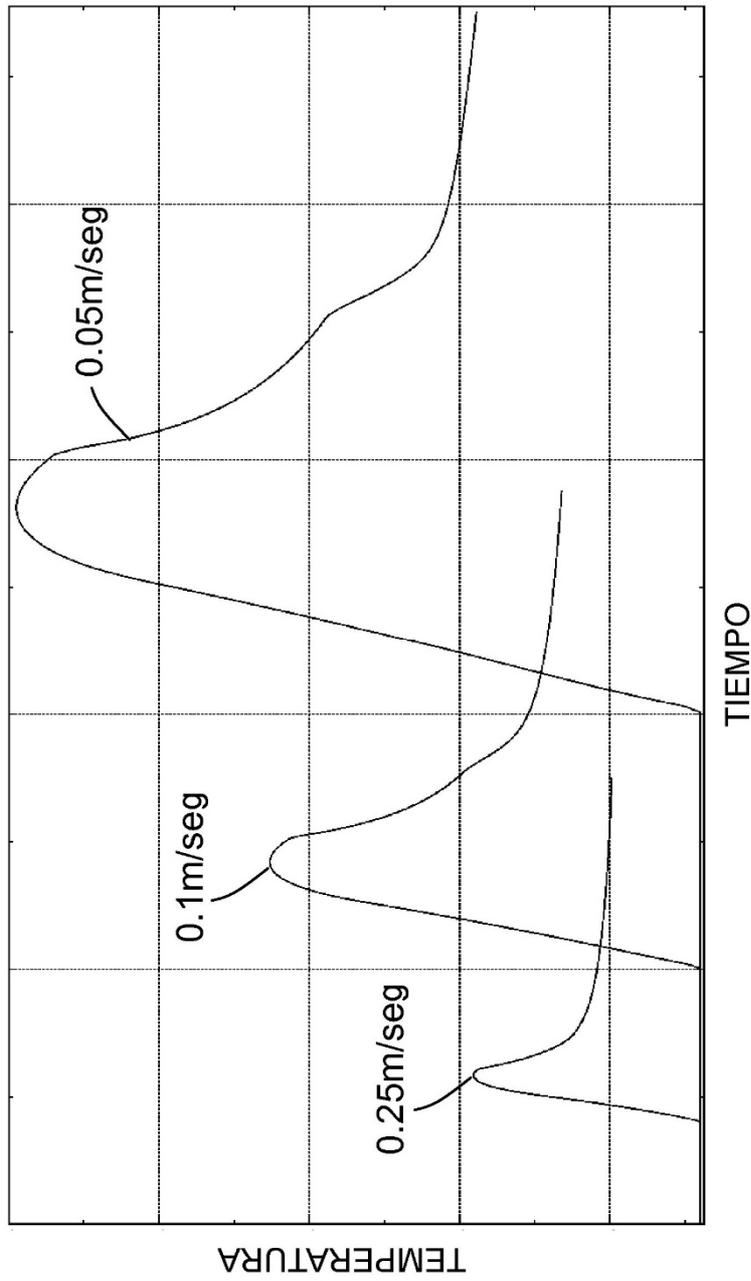


FIG. 12

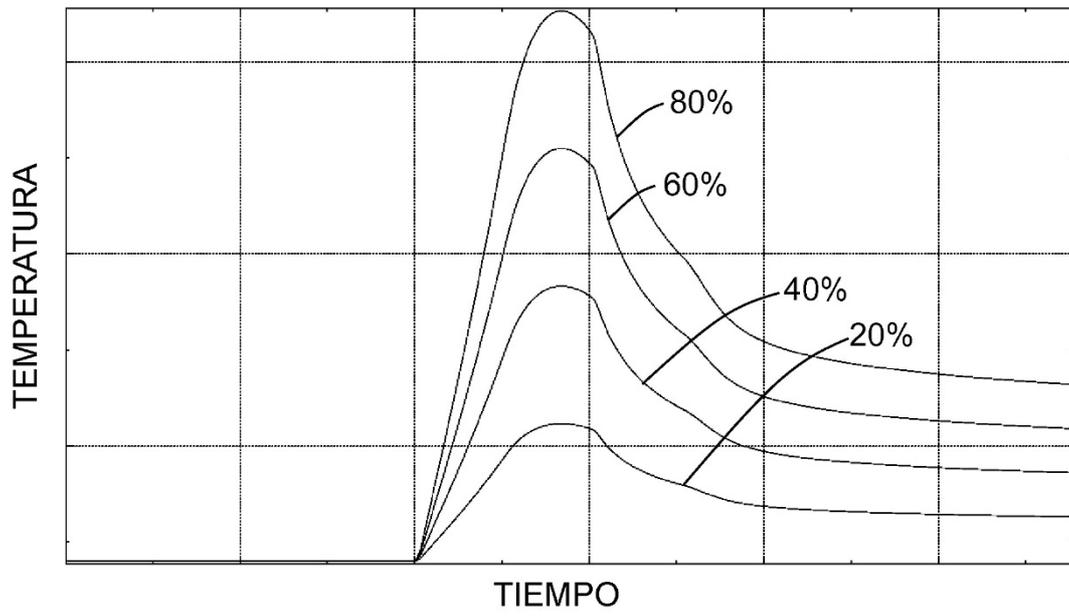


FIG. 13

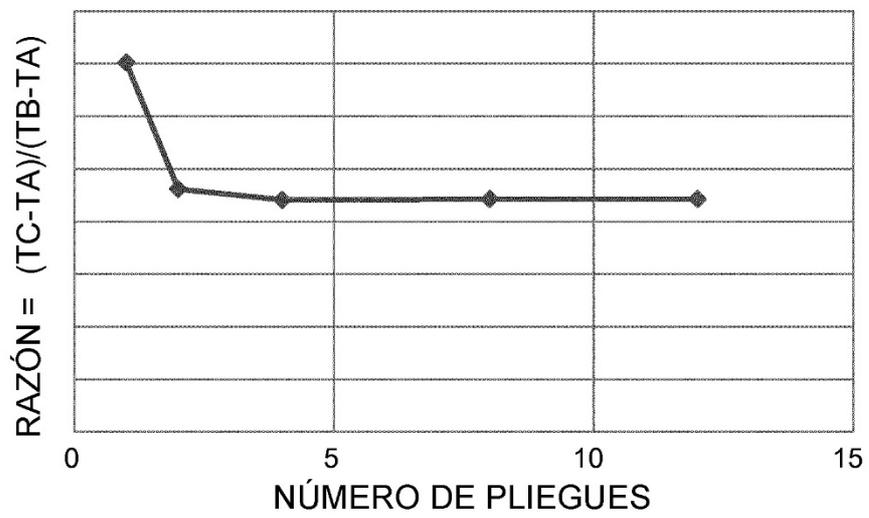


FIG. 14