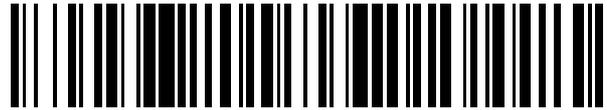


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 554 379**

51 Int. Cl.:

**B23H 7/30** (2006.01)

**B23H 1/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.09.2010 E 10174798 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.11.2015 EP 2295181**

54 Título: **Método y máquina para mecanizar partes usando fresado por erosión por arco o electroerosión**

30 Prioridad:

**09.09.2009 CH 14022009**

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

**18.12.2015**

73 Titular/es:

**AGIE CHARMILLES SA (50.0%)**

**Via dei Pioppi 2**

**6616 Losone, CH y**

**CHARMILLES TECHNOLOGIES S.A. (50.0%)**

72 Inventor/es:

**TRICARICO, CLAUDIO;**

**ROLLET, CLAUDE;**

**JAQUES, FABRICE y**

**DIOT, JEAN-CLAUDE**

74 Agente/Representante:

**DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto**

**ES 2 554 379 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**

Método y máquina para mecanizar partes usando fresado por erosión por arco o electroerosión

La invención se refiere a un método de mecanización por erosión por arco o chispa y a un uso de una máquina de erosión por arco que implementa:

- 5 - una separación de mecanización situada entre un electrodo de herramienta y una parte, ambos conductores de la electricidad, una separación dentro de la que se generan una multitud de descargas eléctricas erosivas, que constituyen un borde de mecanización que es desplazado según los movimientos del electrodo de herramienta,
- un medio dieléctrico presente dentro de la separación de mecanización,
- 10 - dicho electrodo de herramienta es de forma cilíndrica o tubular, y es movido a lo largo de un número de ejes de la máquina de mecanización, respecto al borde de mecanización y a la parte,
- un regulador del proceso
- un sistema de control numérico para controlar los desplazamientos de los varios ejes de la máquina de mecanización,
- 15 - una Trayectoria Nominal del electrodo definida por medio de un archivo de ordenador suministrado aguas arriba del sistema de control numérico de la máquina de mecanización y que consiste en una sucesión de segmentos lineales definidos respecto a un sistema de coordenadas de la parte X, Y, Z, esta Trayectoria Nominal describe un movimiento del electrodo de herramienta respecto a la parte que define cómo debe proceder si no ocurre ninguna perturbación durante la mecanización.

20 En este tipo de método de mecanización, el electrodo de herramienta cilíndrico es movido a lo largo de una trayectoria sustancialmente paralela a la superficie de la parte a ser mecanizada. El método usa un electrodo de herramienta cilíndrico sobre el que se imponen movimientos para evitar cortocircuitos, contrarrestar la perturbación inherente al método, compensar el desgaste y mantener la herramienta próxima y tan cerca como sea posible de la trayectoria.

Dicho método y dicho uso son conocidos por la patente de los EE.UU. US 5.589.086.

25 El mecanizado por erosión de arco o de descarga eléctrica es realizado por medio de un electrodo usado como herramienta. El electrodo puede tener una forma particular en el caso de penetración por erosión por arco. Puede ser también una varilla que se extiende entre dos guías.

30 En el documento presente se considera que se usa un cilindro o un tubo como herramienta, cuyo extremo es desplazado a lo largo de y/o próximo a un recorrido predeterminado de mecanización, que en general consiste en un número de segmentos lineales. La dirección de avance de la herramienta puede cambiar de un segmento al siguiente. La invención presente se refiere más particularmente al último caso en el que una herramienta de forma cilíndrica o tubular mecaniza por erosión por arco mediante el uso de su extremo. La mecanización progresa por capas sucesivas; cada capa sigue más o menos la forma exacta de la parte a ser mecanizada, la última capa sirve como guía para la herramienta. Dicho método se denomina comúnmente "fresado por erosión por arco".

35 Cuando las partes a mecanizar usan este método, debido a las velocidades de avance relativamente altas, existe un riesgo permanente de cortocircuitos que detienen la mecanización y pueden causar una colisión abrupta entre la herramienta y la parte. Cuando dicho riesgo ocurre, la herramienta debe aumentar rápidamente su separación de la parte, más precisamente: debe aumentar la separación para el arco. Comúnmente, estos movimientos de regulación de la mecanización son realizados mediante movimientos hacia delante o hacia atrás, y por tanto por desplazamientos del electrodo en la dirección del recorrido predeterminado de la herramienta. En teoría, dichos movimientos de regulación son también posibles cuando se realiza el acabado de partes en casos en los que la capa a ser mecanizada es muy delgada. Sin embargo, el inconveniente de estas condiciones de trabajo consiste en que, para obtener una modificación suficiente de la anchura de la separación, es necesario realizar movimientos considerablemente mayores desplazándose hacia atrás a lo largo del recorrido predeterminado de la herramienta.

40 Dichos movimientos de gran amplitud no pueden ser realizados con suficiente rapidez debido a la inercia de los elementos de la herramienta de la máquina que soporta la herramienta; además, en operaciones de acabado, la anchura de la separación no es modificada sustancialmente por movimientos en la dirección de avance a lo largo de la trayectoria principal, lo que reduce considerablemente la efectividad de estos movimientos.

50 La patente europea EP 0 555 818 describe un método de mecanización similar, que se caracteriza particularmente por el hecho de que la separación está situada en la misma dirección del recorrido de la herramienta, lo que plantea problemas de estabilidad cuando se mecanizan capas de pequeño espesor con riesgo continuo de colisión lo que resulta fatal para la herramienta. Además, la herramienta está sometida a un desgaste regular y debe ser aproximada a la parte a ser mecanizada durante su desplazamiento a lo largo de la trayectoria predeterminada para compensar dicho desgaste. El desgaste es compensado por un avance continuo hacia abajo del eje Z de la máquina

y no está previsto reorientar dicho avance durante el desplazamiento de la herramienta.

La patente US 5.438.178 describe un método de mecanización por erosión por arco que usa un electrodo de varilla, destinado a refinar la rugosidad de la superficie lateral de una parte que no realiza un desplazamiento relativo desde la posición que ésta ocupaba durante la operación de desbastado. A pesar de este desplazamiento que es mayor que la anchura de la separación de mecanizado, existe una necesidad de refinar la rugosidad de la superficie sin tener que reposicionar la parte en la tabla de la máquina fresadora.

La patente explica cómo debe usarse la superficie lateral de la parte como referencia en lugar de forzar la herramienta (en este caso una varilla de electrodo) para seguir precisamente una trayectoria predeterminada. El fenómeno de deformación ocurre cuando los esfuerzos internos del material son liberados por el paso de la varilla en modo de corte directo; a lo que se añade el resultado de las derivas térmicas. Consecuentemente, ya no es posible definir una trayectoria precisa con la que seguir el contorno de la parte que ha sido preformada. La operación es similar a la de una operación de medida durante la que la herramienta reproduce la superficie de la parte siguiendo su contorno. En el caso explicado por la patente de los EE.UU. US 5.438.178 el regulador del proceso no corrige el error de posición de la herramienta en la dirección de la normal a la superficie.

Esta patente es representativa de un aspecto típico del fresado por erosión por arco: para definir un intervalo de mecanización, se ha de programar una trayectoria ideal, teniendo en cuenta que, por varias razones, la herramienta no sigue con precisión dicha trayectoria.

Sin embargo la patente de los EE.UU. US 5.438.178 no explica totalmente todas las modalidades según las que la herramienta debe estar distanciada de dicha trayectoria. Ciertos aspectos clave asociados al fresado por erosión por arco no pueden ser deducidos de ella: en particular:

- El cometido exacto de la trayectoria planeada no puede ser totalmente olvidado durante el desplazamiento de la herramienta, a pesar del hecho de que la trayectoria no sea estrictamente observada.

- La superficie lateral de la parte no hace que sea posible deducir toda la información necesaria para guiar la herramienta durante la operación de acabado.

- El(los) regulador(es) del proceso deben incorporar funcionalidades específicas para guiar la herramienta fuera de la trayectoria, en particular para proporcionar correcciones.

- Fenómenos distintos de las deformaciones de la parte requieren que, durante su desplazamiento, la herramienta no siga la trayectoria planeada. Estos fenómenos son esfuerzos impuestos por la separación de mecanizado y por las deformaciones del electrodo debidas al desgaste.

El objetivo de la invención es desarrollar un método diseñado para permitir la mecanización por erosión por arco de partes, en particular su acabado, usando herramientas cilíndricas o tubulares mediante capas sucesivas, y para eliminar los riesgos e inconvenientes de la mecanización mencionados anteriormente.

El método según la invención se caracteriza por este objetivo porque la información contenida en la Trayectoria Nominal se usa para definir al menos dos vectores de control que orientan, dentro del sistema de coordenadas de la parte, al menos dos movimientos de regulación independientes,

- el primero de dichos vectores de control, o Vector de Separación, define la dirección en la que el sistema de control numérico debe realizar un primer movimiento de regulación de los ejes de la máquina de mecanización diseñado para mantener el rebajado del material,

- un segundo de dichos vectores de control, o Vector de Posición, define la dirección en la que el regulador de mecanización debe realizar un segundo movimiento de regulación de los ejes de la máquina de mecanización para corregir un error de posición del electrodo de herramienta respecto a la Trayectoria Nominal, las amplitudes respectivas de los movimientos de regulación son calculadas en tiempo real por el regulador del proceso.

Por consiguiente, el electrodo de herramienta realiza movimientos que resultan de la suma de los vectores de los desplazamientos a lo largo y/o en las proximidades de la Trayectoria Nominal; dichos desplazamientos están definidos al menos por dos vectores de control elementales e independientes y cada uno de ellos regula individualmente ya sea la separación o la corrección de los errores de posición. Dicha configuración de los movimientos de regulación puede ser manipulada fácilmente ya que, en estas condiciones, los desplazamientos respectivos que eran previamente incompatibles ya no interfieren entre sí porque han sido hechos independientes. Dichas disposiciones son implementadas, en particular en el acabado donde pueden mecanizarse capas muy finas de una manera estable y a una velocidad de avance relativamente alta.

Las instrucciones descritas en la invención hacen que sea posible implementar cambios de dirección de una manera más efectiva, en particular porque se minimizan los movimientos de regulación requeridos.

De preferencia, el Vector de Posición no incluye ninguna componente del vector paralela al Vector de Separación y viceversa. De esta manera, se consigue una regulación particularmente efectiva de la mecanización.

Según un modo de ejecución preferido, se define un tercer vector de control o Vector de Desgaste, que hace que sea posible realizar un tercer movimiento de regulación destinado a compensar el desgaste de la herramienta, su definición se toma de la Trayectoria Nominal.

5 Ventajosamente, un cuarto vector de control, o Vector de Avance, orienta la acción de avanzar la herramienta paralela a la Trayectoria Nominal.

En un modo de ejecución particular, el Vector de Separación y el Vector de Desgaste son colineales; en otro modo de ejecución son perpendiculares y se tienen en cuenta los movimientos de regulación de la separación para que puedan realizarse casi perpendicularmente a la trayectoria, haciendo de esta manera que sea posible compensar el desgaste del electrodo de una forma particularmente simple.

10 Hay otros casos, en particular en los que la acción de regulación de la separación idealmente aplicada al centro de la zona de mecanización, en otras palabras, al centro de gravedad momentáneo del lugar donde se está rebajando el material, no está orientada en ángulo recto respecto al recorrido de la herramienta, sino en un ángulo ampliamente obtuso. En dichas condiciones, la invención proporciona una configuración particular, en la que los movimientos de regulación se realizan en la dirección del centro momentáneo de la mecanización, y en los que en particular los  
15 movimientos de regulación de la separación son realizados en una dirección intermedia entre el recorrido de la herramienta y el eje de simetría de la herramienta.

Como ya se ha mencionado anteriormente, los movimientos de la herramienta son definidos por numerosos segmentos de la trayectoria preplaneados y preprogramados, cuya dirección varía posiblemente desde un segmento al siguiente. Por esta razón, es posible determinar, en dicha modificación de la orientación, el punto al que los  
20 movimientos de regulación elementales deben ser reorientados para que se correspondan con el siguiente segmento. En particular, se usa la línea bisectriz entre dos segmentos sucesivos de la trayectoria.

En estas condiciones, cuando cambia la dirección de los segmentos de la trayectoria, resulta simple determinar que los movimientos de regulación están siendo realizados en un cierto ángulo respecto a la trayectoria hasta el final del segmento en curso y cambiar la dirección cuando se cruza un límite definido por la línea bisectriz con el siguiente  
25 segmento. En este punto, es por tanto posible evitar que se requiera que el electrodo de herramienta cambie abruptamente de posición causando una colisión que resultaría fatal para la herramienta.

Los movimientos de regulación elementales permanecen orientados la mayor parte del tiempo en el mismo ángulo respecto a la trayectoria, pero un cambio de orientación de estos movimientos puede ocurrir un poco antes del punto final del segmento en curso para que se correspondan con el movimiento planeado para el siguiente segmento.  
30 Procediendo de esta manera, se realiza una readaptación permanente de los movimientos de regulación; esta acción hace que sea posible eliminar las inestabilidades del desplazamiento del electrodo de herramienta. Cuando la herramienta es mantenida con efectividad sobre la trayectoria planeada, la transición de la orientación de los movimientos de regulación elementales orientados en un ángulo dado, respecto al segmento en curso, es realizada en el punto de intersección entre el segmento en curso y el siguiente segmento.

35 Gracias al método descrito por la invención, es posible, en la mecanización de superficies en las que la herramienta debe seguir más o menos exactamente el perfil de la parte, mantener la separación del arco o chispa a una distancia óptima, y hacerlo sometiendo dicha separación a movimientos de regulación adecuados a las condiciones encontradas y hacerlo de una manera que sea independiente de la progresión del electrodo de herramienta en o próximo a la trayectoria programada.

40 Otras ventajas y características de la invención pueden ser deducidas de las reivindicaciones dependientes y de la descripción siguiente, en la que se explican modos de ejecución ejemplares de la invención de una manera detallada haciendo referencia a las Figuras.

La Figura 1 es una representación esquemática en perspectiva de un electrodo de herramienta de forma cilíndrica girando alrededor de su eje de simetría y mecanizando con su extremo de fondo siguiendo una trayectoria nominal contenida dentro de un plano.  
45

La Figura 2 es otra representación esquemática en perspectiva de un electrodo de herramienta de forma cilíndrica, cuyo extremo de fondo se desvía en un grado mayor o menor de la trayectoria nominal.

La Figura 3 es una sección transversal vertical paralela al avance de un electrodo de herramienta de forma cilíndrica mecanizando con su extremo de fondo; la Figura ilustra la conformación de la separación de mecanización.

50 La Figura 4 es una sección transversal horizontal de un electrodo de herramienta de forma cilíndrica que sigue aproximadamente una trayectoria nominal formada por dos segmentos; la figura ilustra la línea bisectriz entre dichos dos segmentos.

Las Figuras 5a, 5b, 5c usan tres vistas perpendiculares para ilustrar un primer modo de ejecución de la invención.

Las Figuras 6a, 6b, 6c usan tres vistas perpendiculares para ilustrar un segundo modo de ejecución de la invención.

Las Figuras 7a, 7b, 7c usan tres vistas perpendiculares para ilustrar un tercer modo de ejecución de la invención.

La Figura 8 usa una sección transversal vertical perpendicular al avance de la herramienta para ilustrar un cuarto modo de ejecución de la invención.

5 Para explicar la invención de una manera detallada, se explican a continuación un número de modos de ejecución. Sin embargo, en primer lugar, es necesario definir los siguientes conceptos específicos: Trayectoria Nominal, Vectores de Control, Vector de Avance, Vector de Separación, Vector de Desgaste, Error de Posición, Vector de Posición y Línea Bisectriz Inter Segmentos.

10 Haciendo referencia a la Figura 1, La Trayectoria Nominal se define por medio de un archivo de ordenador suministrado aguas arriba del sistema de control numérico de la máquina; éste es una sucesión de segmentos lineales 1 o bloques definidos respecto a un sistema de coordenadas de la parte X, Y, Z. La Trayectoria Nominal describe, en cada capa, el movimiento de la herramienta 2 según debe proceder si no ocurre ninguna perturbación durante la mecanización y si no hubiera desgaste de la herramienta. Sin embargo, ya que usualmente hay desgaste, el soporte de la herramienta 3, para compensar este desgaste, debe seguir en tiempo real una trayectoria 4 que deriva constantemente respecto a la Trayectoria Nominal 1, mientras que el extremo de la herramienta 5, dependiendo de las perturbaciones, permanece más o menos próximo a la Trayectoria Nominal 1. La trayectoria 4 del soporte de la herramienta 3, al estar guiado éste por el sistema de control numérico y los ejes de la máquina, no observa por tanto la Trayectoria Nominal 1; ésta es una condición esencial para compensar el desgaste de la herramienta y asegurar que la trayectoria real del extremo de la herramienta (no representado) está todo lo cerca posible de la Trayectoria Nominal 1.

20 Cada bloque de esta Trayectoria Nominal 1 contiene la definición de cuatro vectores unitarios distintos  $V_a$ ,  $V_g$ ,  $V_u$ ,  $V_p$ , o Vectores de Control, que hacen que sea posible orientar respectivamente, dentro del sistema de coordenadas de la parte XYZ, cuatro acciones de regulación independientes que serán definidas más adelante. Sin embargo, si la orientación respectiva de dicho vector de control no cambia respecto al bloque precedente, la información no se repite.

25 Para definir el programa de desplazamiento ideal, cada bloque de la Trayectoria Nominal comprende también una mención de una velocidad de avance longitudinal de trabajo o cualquier otra información que haga que sea posible calcular en tiempo real la velocidad que debe ser aplicada en la dirección del vector  $V_a$ .

30 Con referencia a las Figuras 1 y 2, para regular con precisión el proceso según la invención, se distinguen cuatro Vectores de Control  $V_a$ ,  $V_g$ ,  $V_u$ ,  $V_p$ , esto es, Vector de Avance, Vector de Separación, Vector de Desgaste y Vector de Posición, respectivamente. Éstos son cuatro vectores unitarios que orientan cuatro acciones de regulación en el sistema de coordenadas de la parte XYZ. La amplitud de dichas acciones de regulación está determinada por cuatro escalares asociados  $M_a$ ,  $M_g$ ,  $M_u$ ,  $M_p$ , respectivamente.

35 Las definiciones de los vectores  $V_a$ ,  $V_g$ ,  $V_u$ ,  $V_p$  están explícita o implícitamente contenidas en cada bloque de la Trayectoria Nominal 1. Los escalares  $M_a$ ,  $M_g$ ,  $M_u$ ,  $M_p$  determinan la amplitud respectiva de cada una de las acciones de regulación. Éstas son calculadas en tiempo real por el regulador y el sistema de control numérico del proceso.

40 El Vector de Avance  $V_a$  genera el movimiento de la herramienta longitudinal o tangencialmente a la trayectoria. Su orientación se define por los datos contenidos en los bloques sucesivos de la Trayectoria Nominal 1; en otras palabras, según la Figura 2, el punto de llegada D del bloque precedente y el punto de llegada A del bloque en curso. El vector  $V_a$  es colineal al segmento de la trayectoria en curso DA. El escalar  $M_a$  asociado al vector  $V_a$  se define por el regulador del proceso según el valor de la velocidad de trabajo contenido en el bloque en curso de la Trayectoria Nominal, la velocidad es ajustada en tiempo real según las condiciones de mecanización locales.

45 Debido a perturbaciones inesperadas, el régimen de rebajado del material varía: por esta razón el programa de desplazamiento de la herramienta a lo largo de la Trayectoria Nominal no es conocido con precisión anticipadamente. En consecuencia, las velocidades de avance de trabajo longitudinales definidas previamente no son nunca observadas estrictamente.

50 Haciendo referencia a la Figura 3, se considera un volumen contenido entre dos superficies 6, 7 separadas por una distancia o separación 8, similar a la de un condensador eléctrico. Las dos superficies 6, 7 no son usualmente planas. Las chispas son generadas en cualquier parte de un polo al otro y pasan a través de la separación 8 con una multitud de vectores elementales. El conjunto constituye un borde de mecanización que se mueve según los movimientos del electrodo de herramienta. La suma normalizada de dichos vectores elementales durante un corto período de tiempo constituye el Vector de Separación  $V_g$ . Éste es un vector ideal fijado al centro momentáneo de gravedad del lugar donde está siendo rebajado el material. La dirección en la que este vector apunta indica dónde se encuentra el máximo riesgo de colisión.

55 El Vector de Separación  $V_g$  define la dirección óptima sobre la que el regulador de la mecanización debe trabajar para mantener el rebajado del material.

El escalador asociado al vector de separación  $M_g$  se calcula en tiempo real, con un elevado régimen dinámico, por el regulador del proceso según medidas realizadas por un sensor eléctrico conectado a los terminales de la separación de mecanización. En la mayoría de los modos de ejecución, el escalador  $M_g$  se caracteriza por una media de cero, que es por lo que el vector se simboliza en las Figuras por dos flechas opuestas.

- 5 El rebajado del material puede cesar abruptamente si la anchura de la separación (o separación de aire) cae por debajo del así llamado límite de cortocircuito. Si la velocidad de desplazamiento de la herramienta respecto a la parte es grande, el tiempo de reacción del sistema regulado puede ser demasiado largo para evitar la colisión. Ya que la herramienta es mantenida girando rápidamente, dicha colisión resulta frecuentemente fatal para ella.

- 10 Se puede tolerar un error de orientación de  $45^\circ$  respecto al Vector de Separación ideal; a partir de ahí, el regulador del proceso puede perder totalmente su efectividad y fallar al establecer el rebajado del material después de una perturbación. Debido a una perturbación local inesperada y deficientemente controlada, el rebajado del material puede cesar abruptamente, y causar un cortocircuito seguido de una colisión.

- 15 De ahora en adelante consideraremos sólo el desgaste de una herramienta de forma cilíndrica o tubular que mecaniza con su punta. Se conoce por el documento europeo EP 0 555 818 que el perfil de corte de dicha herramienta puede ser mantenido casi sin cambiar mecanizando en capas sucesivas y compensando el desgaste de la herramienta de una manera continua en la dirección de su eje de simetría. Sin embargo, Según este documento, como ya se ha explicado anteriormente, no se tiene previsto variar su orientación durante el desplazamiento. Para eliminar esta restricción, un vector de control  $V_u$  llamado Vector de Desgaste, es definido colinealmente al eje de simetría de la herramienta. Esto hace que sea posible, si es necesario, reorientar este eje durante el desplazamiento. Según la invención, la mecanización de la parte se realiza siempre mediante una pila de capas sucesivas que son sustancialmente paralelas entre sí, pero dichas capas no son exclusivamente planas. En cada paso, la superficie de la parte guía la herramienta durante la mecanización de la siguiente capa, pero la capa que está siendo mecanizada no es la copia homotética de la capa precedente.

- 25 El Vector de Desgaste  $V_u$  hace que sea posible mecanizar por la punta con una herramienta que está reduciendo continuamente su longitud haciendo que su punto de fondo progrese a lo largo de una trayectoria que es sustancialmente paralela a la superficie mecanizada.

- 30 El escalador  $M_u$  asociado a  $V_u$  se calcula en tiempo real por el regulador del proceso según una evaluación de la eficiencia de la mecanización en un electrodo y en el otro. Haciendo referencia a la Figura 2, el Vector de Separación  $V_g$  apunta en una dirección paralela a la dirección de avance a lo largo del segmento de trayectoria DA,  $V_g$  es por tanto colineal con  $V_a$  en este caso particular. En este desplazamiento próximo al segmento de trayectoria DA, el extremo de la herramienta 5, más específicamente su centro de herramienta O, hace énfasis, en cada instante de su desplazamiento, en un Error de Posición OP respecto al punto teórico P según define el programa teórico introducido en la Trayectoria Nominal 1.

- 35 La posición del punto O es adquirida por el sistema de control numérico por medio de los dispositivos de medida de la posición asociados a los ejes de la máquina, por ejemplo, reglas o codificadores angulares.

El error de posición OP se descompone en tres vectores ortogonales  $OH'$ ,  $H'H$ ,  $HP$  de tal manera que  $OH' + H'H + HP = OP$ ; siendo

$OH'$  perpendicular al eje de la herramienta y a los vectores  $V_a$  y  $V_g$ ,

$H'H$  paralelo al eje de la herramienta y al vector  $V_u$ ,

- 40  $HP$  paralelo al segmento de la trayectoria DA y a los vectores  $V_a$  y  $V_g$ .

Por una parte el control de la separación y por otra la monitorización de la trayectoria son dos módulos de regulación, parte del sistema de control del proceso global, que tienen que trabajar conjuntamente a un elevado régimen dinámico. Los dos módulos se caracterizan por pasos de banda de aproximadamente un centenar de Hertzios. Resulta esencial para estos dos módulos que no interfieran entre sí.

- 45 Obviamente, una corrección del error de posición puede conducir en ciertos casos a un defecto del control del ancho de separación con un resultado fatal. Por el contrario, una corrección inesperada de la separación puede dar como resultado una desviación de la trayectoria no deseada que a su vez se refleja en la separación, causando un bombeo entre los dos módulos de regulación. No se puede prever decelerar uno de estos dos módulos respecto al otro para impedir que interfieran entre sí.

- 50 En consecuencia, para eliminar dicho efecto perjudicial, la invención propone que la corrección del error de posición OP no debe incluir ninguna componente paralela al Vector de Separación y viceversa.

Dicha característica es implementada situando el Vector de Posición  $V_p$  perpendicular al Vector de Separación  $V_g$  y proyectando el error de posición OP sobre dicho Vector de Posición, dicha proyección, que es el vector  $OH'$ , hace que sea posible calcular el escalador  $M_p$  asociado a  $V_p$  según la fórmula  $M_p = K_p \cdot [OH']$  en la que  $[OH']$  es el módulo

del vector  $OH'$  y  $K_p$  es la ganancia del bucle de corrección del error de posición. Según esta fórmula, el escalador  $M_p$  es por tanto el producto de la ganancia  $K_p$  del bucle de la corrección del Error de Posición por el módulo  $[OH']$  de la proyección ortogonal del vector de error de posición  $OP$  sobre el Vector de Posición  $V_p$ .

5 En otras palabras, según la Figura 2, se aplica una restricción al vector  $OP$ , después de la que sólo el componente  $HO'$  de este vector es retenido para activar la corrección de la trayectoria; la última acción está dirigida a retornar el punto  $O$  al punto  $H'$ .

10  $HP$  es la proyección ortogonal de  $OP$  sobre  $DA$ , y representa un retraso de la herramienta respecto al programa de desplazamiento planeado en la definición de la Trayectoria Nominal. Corregir este retraso conduce a pérdidas de control del proceso con la aparición de riesgos de colisión y aberraciones respecto al mantenimiento del espesor de la capa mecanizada. Por tanto, la componente  $HP$  del error de posición  $OP$  no es corregida.

$OO'$  es la proyección ortogonal de  $OP$  sobre  $V_u$ . Debido al desgaste de la herramienta y a su compensación, no puede conocerse  $OO'$  con precisión en tiempo real; tampoco hay por tanto necesidad de corregirla.

Según los modos de ejecución de la invención, se pueden seleccionar otras orientaciones del Vector de Posición  $V_p$  para asegurar una perfecta estabilidad de la mecanización.

15 Dicho método que incluye restringir el error de posición a su proyección ortogonal sobre el vector  $V_p$ , proporciona una ventaja considerable: hace que sea posible dar a  $K_p$  un valor tan alto como lo permitan las condiciones de estabilidad del bucle de posición por sí solas. Si se observa la herramienta en la dirección de su eje de simetría, se obtiene una rigidez lateral extrema, y por tanto una precisión excelente, como si la herramienta fuera guiada sobre un raíl en su trayectoria. El bucle de regulación de la separación puede ser hecho también tan receptivo como lo permita el proceso de erosión por arco considerado por separado. Si no se aplica la restricción según se ha explicado anteriormente, es necesario reducir tanto la ganancia de posición  $K_p$  como debilitar la regulación de la separación para tener en cuenta las condiciones de estabilidad de los dos bucles de regulación involucrados; para garantizar la estabilidad del proceso deben aceptarse una precisión lateral y una eficiencia de mecanización mediocres.

25 Con referencia a la Figura 4, la trayectoria cambia la dirección de un segmento 10 al siguiente 12, estos dos segmentos sucesivos de la Trayectoria Nominal forman un ángulo más o menos agudo. La línea bisectriz 11 de dicho ángulo es la Línea Bisectriz Inter Segmentos contenida dentro del plano formado por dichos dos segmentos sucesivos; ésta línea constituye un límite que puede ser usado para reorientar los varios Vectores de Control en tiempo real y para recalcular sus módulos asociados, en la transición de un segmento de trayectoria al siguiente. En los cambios abruptos de dirección, pueden ocurrir colisiones que resultan fatales para la herramienta si no se monitoriza el cruce de dicho límite. En consecuencia, cuando el eje de simetría de la herramienta, simbolizado por el centro de la herramienta  $O$  de la Figura 4, cruza la Línea Bisectriz Inter Segmentos 11 en el punto  $C$ , los Vectores de Control son reorientados según las indicaciones contenidas en el siguiente bloque 12 y sus escalares asociados son recalculados. En otras palabras, en los cambios de dirección detallados por la Trayectoria Nominal, los vectores de control son reorientados, sus escalares son recalculados, cuando el eje de simetría de la herramienta cruza la Línea Bisectriz Inter Segmentos formada por el segmento de la trayectoria en curso y el siguiente segmento de la trayectoria.

40 Con referencia a las Figuras 5a, 5b y 5c, se describe a continuación un primer modo de ejecución de la invención. Se trata de un caso de mecanización de desbastado en el que la herramienta 2 mecaniza una capa 21 que es relativamente gruesa respecto a la separación de mecanización 20. La herramienta tubular adquiere una forma de núcleo truncado próximo a los  $45^\circ$ . La vista 5c en la dirección de su eje muestra que la herramienta mecaniza un sobrante lateral 22 menor que su diámetro. Resulta posible imaginar que el vector de separación ideal, fijado al centro de gravedad del lugar donde se está rebajando el material y que no está representado en las Figuras, no apunta en la misma dirección del avance de la trayectoria. Sin embargo, con interés de simplificar el proceso, se toma la decisión de orientar el Vector de Separación  $V_g$  efectivo de manera diferente de la orientación ideal, en otras palabras, que apunte en paralelo a la Trayectoria Nominal y perpendicularmente al eje de la herramienta. La experiencia muestra que la estabilidad de la mecanización no se deteriora por los sobrantes laterales 22 que no son demasiado pequeños respecto al diámetro de la herramienta.

50 En consecuencia, se obtiene una conformación bastante simple de los vectores de control, que se expresa como sigue a continuación:

el Vector de Avance  $V_a$  apunta en una dirección paralela a la trayectoria,

el Vector de Desgaste  $V_u$  apunta en una dirección paralela al eje de simetría de la herramienta y perpendicular a  $V_a$ ,

el Vector de Separación  $V_g$  apunta en la misma dirección que  $V_a$ ,

el Vector de posición apunta en una dirección perpendicular a  $V_a$ ,  $V_u$  y  $V_g$ .

55 Dicha disposición asegura, como ya se ha descrito anteriormente, que la corrección del Error de Posición no incluye

ningún componente paralelo al Vector de Separación, pero también que los bucles de regulación para el avance a lo largo de la trayectoria por una parte y el desgaste por otra, no interfieren entre sí ya que los vectores  $V_a$  y  $V_u$  son perpendiculares. Estos dos últimos bucles se caracterizan por un régimen dinámico significativamente más lento que el de los bucles de regulación de separación y posición pero pueden interferir entre sí. Por esta razón se puede permitir que  $V_a$  y  $V_g$  estén orientados en una y en la misma dirección, pero es preferible orientar los vectores  $V_a$  y  $V_u$  en direcciones perpendiculares entre sí. Sin embargo, la condición “ $V_a$  perpendicular a  $V_u$ ” es opcional. Es perfectamente posible imaginar inclinar el eje de la herramienta de manera diferente respecto a la trayectoria, aunque dicha conformación de los vectores de control no proporciona de antemano ninguna ventaja sustancial. En la práctica, el uso de una herramienta tubular, en este caso de desbastado, requiere que  $V_a$  y  $V_u$  estén perpendicularmente orientados para obtener una superficie mecanizada plana.

Haciendo referencia a las Figuras 6a, 6b y 6c, se describe a continuación un segundo modo de ejecución de la invención. Éste es un caso de mecanización de semiacabado, en el que la herramienta 2 mecaniza una capa 21 cuyo espesor está cerca de, pero es mayor que, el de la separación de mecanización 20. La herramienta cilíndrica tiene una forma de cono truncado muy aplanada en el extremo.

El vector de separación ideal, fijado al centro de gravedad del lugar donde se está rebajando el material, como resulta evidente según la Figura 6a, apunta fuertemente hacia abajo. Orientando el Vector de Separación  $V_g$  efectivo perpendicularmente al eje de la herramienta da como resultado una pérdida de control. Por esta razón resulta ventajoso en este caso orientarlo, por ejemplo, en una dirección intermedia entre los vectores  $V_a$  y  $V_u$  sin embargo, con objeto de simplificar el proceso, se puede elegir orientar  $V_g$  en el plano ( $V_a, V_u$ ) a  $45^\circ$  de  $V_a$  y de  $V_u$ .

En consecuencia, se obtiene la siguiente conformación de los vectores de control:

el Vector de Avance  $V_a$  apunta en una dirección paralela a la trayectoria,

el Vector de Desgaste  $V_u$  apunta en una dirección paralela al eje de simetría de la herramienta y perpendicular a  $V_a$ ,

el Vector de Separación  $V_g$  es paralelo al plano ( $V_a, V_u$ ) y apunta en una dirección intermedia entre  $V_a$  y  $V_u$ , de preferencia a  $45^\circ$  de  $V_a$  y de  $V_u$ ,

el Vector de posición  $V_p$  apunta en una dirección perpendicular a  $V_a, V_u$  y  $V_g$ .

Dicha disposición da lugar a los mismos comentarios y proporciona las mismas ventajas que el modo precedente, pero con una seguridad adicional: la corrección del error de posición no incluye ninguna componente paralela al Vector de Avance  $V_a$ ; sin embargo, sigue existiendo un riesgo de colisión en esta dirección, y debe ser eliminado.

Resultará evidente, como en el modo precedente, que el Vector de Separación  $V_g$  comprende componentes en la misma dirección de los vectores  $V_a$  y/o  $V_u$ . El riesgo de interferencia es evitado por el hecho de que el régimen dinámico de la velocidad de avance y de los bucles de regulación de desgaste son significativamente menores que los del bucle de regulación de la separación.

Haciendo referencia a las Figuras 7a, 7b y 7c, se describe a continuación un tercer modo de ejecución de la invención. Éste se refiere a un caso de mecanización de acabado en el que la herramienta 2 mecaniza una capa 21, cuyo espesor es menor o igual al de la separación de mecanización 20. La herramienta cilíndrica ha perdido su forma de cono truncado típica de los dos modos de ejecución precedentes: su extremo es plano.

El vector de separación ideal, fijado al centro de gravedad del lugar donde se está rebajando material, como resulta evidente según la Figura 7a, ya no incluye ninguna componente paralela a la trayectoria. Orientando el Vector de Separación  $V_g$  efectivo en el plano ( $V_a, V_u$ ) a  $45^\circ$  de  $V_a$  y de  $V_u$ , se consigue de nuevo que sea posible retener el control. Sin embargo, es claramente preferible en este caso orientarlo en una dirección paralela a  $V_u$ .

En consecuencia, se obtiene la siguiente conformación de los vectores de control:

el Vector de Avance  $V_a$  apunta en una dirección paralela a la trayectoria,

el Vector de Desgaste  $V_u$  apunta en una dirección paralela al eje de simetría de la herramienta y perpendicular a  $V_a$ ,

el Vector de Separación  $V_g$  apunta en la misma dirección que  $V_u$ ,

el Vector de posición  $V_p$  apunta en una dirección perpendicular a  $V_a, V_u$  y  $V_g$ .

Dicha disposición hace que sea posible realizar tratamientos superficiales con velocidades de barrido que son raras en el campo de la erosión por arco, de aproximadamente 20 mm/s. Este aumento del rendimiento se debe principalmente al hecho de que es posible forzar al máximo la ganancia del bucle de regulación de la separación. Además, aunque en este modo puede parecer que el riesgo de colisión ha desaparecido; esto no es exactamente cierto; el riesgo existe a veces si las transiciones de orientación del vector de control no son manejadas correctamente.

En el caso en el que el régimen de desgaste volumétrico es bajo, según los ajustes particulares de la máquina, por ejemplo, de un pequeño %, resulta posible que se prevea forzar que el escalar  $\mu$  asociado al Vector  $V_u$  sea igual a cero. La compensación del desgaste es proporcionada entonces por el bucle de regulación de la separación. En consecuencia, el escalar  $M_g$  asociado al vector  $V_g$  ya no tiene estrictamente una media de cero.

- 5 Resultará evidente que este tercer modo de ejecución, típico de las capas delgadas, es sin embargo efectivo en casos similares al ilustrado en las Figuras 6a, 6b y 6c.

Haciendo referencia a la Figura 8, se describe a continuación un cuarto modo de ejecución de la invención. Como en el modo de ejecución precedente, este modo es un caso de mecanización de acabado en el que la herramienta 2 mecaniza una capa relativamente delgada. Sin embargo, en este cuarto modo de ejecución, la superficie de la parte que guía la herramienta ya no es virtualmente perpendicular al eje de la herramienta, sino que está inclinada respecto a la herramienta y la guía lateralmente. La forma de la herramienta en su extremo puede llegar a ser aguda y sigue de cerca la forma de la parte debido al fuerte desgaste. El vector de separación ideal, fijado al centro de gravedad del lugar donde se está rebajando material, es virtualmente perpendicular a la superficie de la parte a ser tratada. Orientando el Vector de Separación  $V_g$  efectivo en una dirección paralela al eje de simetría de la herramienta, como en el modo de ejecución precedente, resulta de nuevo posible retener el control, mientras que los valores de inclinación de la herramienta respecto a la superficie puedan permanecer próximos a la normal. Sin embargo, para obtener una mayor flexibilidad, se propone que un Vector de Separación  $V_g$  efectivo sea orientado en una dirección próxima a la normal a la superficie a ser procesada.

En consecuencia, se obtiene la siguiente conformación de los vectores de control:

- 20 el Vector de Avance  $V_a$  apunta en una dirección paralela a la trayectoria,  
 el Vector de Desgaste  $V_u$  apunta en una dirección paralela al eje de simetría de la herramienta y perpendicular a  $V_a$ ,  
 el Vector de Separación  $V_g$  apunta en una dirección próxima a la normal a la superficie a ser procesada,  
 el Vector de posición  $V_p$  está contenido dentro de un plano paralelo al plano  $(V_u, V_g)$  y apunta en una dirección perpendicular a  $V_g$ .
- 25 Dicha disposición comprende las mismas ventajas que el modo de ejecución precedente, además de la posibilidad de acceder a superficies cóncavas de una parte a la que el eje de la herramienta no puede ser orientado según la normal a la superficie.

En el límite, resulta posible concebir una variante simplificada de este cuarto modo de ejecución en el que el eje de la herramienta es paralelo a la superficie a ser procesada. En este caso, el escalar  $\mu$  asociado al vector  $V_u$  debe ser hecho igual a cero. La compensación por el desgaste es proporcionada entonces por el bucle de control de la separación; en consecuencia, el escalar  $M_g$  asociado al vector  $V_g$  ya no tiene estrictamente una media igual a cero. Sin embargo, en ese caso es necesario usar solamente ajustes de la máquina que produzcan un desgaste casi igual a cero.

La máquina de mecanización por erosión por arco según la invención puede ser representada esquemáticamente mediante un diagrama de flujo. El índice 25 designa la función CAD (Diseño Asistido por Ordenador): se trata de una herramienta de ordenador que puede ser usada para dibujar la parte a ser mecanizada 26. La mecanización se realiza por capas sucesivas, de esta manera el CAD 25 convierte la cavidad a ser mecanizada en una secuencia de capas 36. Cada capa es segmentada por turnos en regiones o superficies, dentro de las que el CAD 25 define un desplazamiento de barrido para el punto de la herramienta 32, 5. El barrido consiste en una sucesión de segmentos en línea recta 1 definidos por un punto de origen y un punto final. El CAD 25 convierte por tanto una forma a ser mecanizada en una secuencia de trayectorias preprogramadas, o trayectorias nominales, definidas dentro de un sistema de coordenadas XYZ. En el CAD 25, el operador selecciona principalmente los diámetros de la herramienta y el espesor de las capas a ser mecanizadas. El CAD 25 está ligado a la interfaz hombre-máquina 26 (HMI) situada también aguas arriba del sistema de control numérico 27. El CAD 25 no es una función integral de la máquina de mecanización por erosión por arco; a diferencia del HMI 26 que, convencionalmente, es una función que permite al operador conducir esta máquina, crear programas de mecanización sencillos o modificar programas de mecanización derivados del CAD 25, etc. El HMI 26 se compone de al menos un teclado (no representado) y de una pantalla para presentar toda la información relativa a la máquina. El sistema de control numérico 27 de la máquina de mecanización por erosión por arco incorpora, entre otras cosas, las funciones de regulación del proceso 28 (o regulador de la mecanización) y un número de reguladores de eje 29. El regulador de función del proceso 28 ejecuta un software específico diseñado para manejar los varios modos de mecanización según la invención. Para mayor sencillez, se representan solamente tres reguladores de eje X, Y y Z bajo el índice 29. Dichos reguladores consisten convencionalmente, por ejemplo, en un motor y su tacómetro para medir la velocidad real alcanzada y una regla digital para medir la posición real alcanzada en el eje. El regulador del proceso 28 está conectado a otras dos funciones convencionales de la máquina de mecanización por erosión por arco: el generador de mecanización 30 y los parámetros tecnológicos 31. La función de generación 30 produce los pulsos eléctricos necesarios para la mecanización y remite al regulador del proceso 28 la información relevante respecto al progreso de la mecanización, tal como medidas de la separación y medidas de la eficiencia de la mecanización; la última información es usada

para evaluar el rebajado real de material de la parte 26 y/o el electrodo de herramienta 32. La función del parámetro 31 es una memoria que contiene los parámetros tecnológicos específicos de la erosión por arco. Convencionalmente, el operador usa el HMI 26 para asignar parámetros de mecanización particulares a elementos de la trayectoria.

- 5 Los reguladores de eje 29 mueven la parte 26 a ser mecanizada y/o el electrodo de herramienta 32 por medio de un conjunto mecánico que consiste en tornillos, correderas, engranajes, tablas de trabajo, mandril, etc., representados simbólicamente por el índice 33.

10 Aguas arriba del sistema de control numérico 27, hay por tanto dos funciones, el CAD 25 y el HMI 26, que permiten al operador de la máquina de mecanización por erosión por arco seleccionar el modo de mecanización apropiado, entre los varios modos de ejecución de la invención. El operador por tanto tiene que definir la orientación de los cuatro Vectores de Control Va, Vg, Vu, Vp en los modos de ejecución más completos de la invención; dos vectores Vg, Vp en los modos más simplificados.

15 El regulador del proceso 28, en colaboración con el sistema de control numérico 27, procesa estos cuatro vectores Va, Vg, Vu, Vp, de la manera siguiente para formar un conjunto de comandos Vx, Vy, Vz que pueden ser usados para activar los reguladores de eje 29.

20 Haciendo referencia a la Figura 2, el centro de la herramienta O, en su desplazamiento próximo al segmento de trayectoria DA, registra, en cada bucle de cálculo, un Error de Posición OP respecto al punto teórico P según está definido en el programa teórico introducido en la Trayectoria Nominal 1. La posición real del punto O es adquirida por medio de información en tiempo real x, y, z que representa las posiciones alcanzadas 34 por los ejes de la máquina; esta información es producida por los reguladores de eje 29.

25 Como ya se ha mencionado, los cuatro Vectores de Control Va, Vg, Vu, Vp, es decir, el Vector de Avance, el Vector de Separación, el Vector de Desgaste y el Vector de Posición, son cuatro vectores unitarios que orientan cuatro acciones de regulación independientes en el sistema de coordenadas XYZ. La amplitud de cada acción de regulación es determinada respectivamente por cuatro escalares asociados Ma, Mg, Mu, Mp. Partiendo de este principio, y usando métodos de cálculo vectorial elemental, las siguientes operaciones (desde la A a la G) son realizadas en tiempo real, es decir, en el tiempo de cada bucle de cálculo:

A) El vector de error de posición OP' es proyectado sobre el Vector de Posición Vp; dicha proyección, que es el vector OH' de la Figura 2, es usada para calcular el escalar Mp asociado a Vp según la fórmula  $Mp = Kp \cdot [OH']$ , en la que [OH'] es el módulo del vector OH' y Kp la ganancia del bucle de corrección del error de posición.

30 B) A la luz de las medidas hechas por un sensor convencional conectado a los terminales de la separación de mecanización e incorporadas al generador de mecanización 30, el regulador del proceso 28 calcula el escalar  $Mg = Kg \cdot \text{Separación}$ , asociado al vector de separación Vg, en donde Kg es la ganancia de regulación del bucle de corrección de la separación y en donde que "Separación" es una medida de la separación real.

35 C) El escalar Ma, asociado al vector de avance Va, es calculado según el valor de la velocidad de trabajo contenido en el bloque en curso de la Trayectoria Normal. Este valor de la velocidad puede ser modulado por un comando del operador por medio del HMI 26 o por una rutina automática gobernada por condiciones de mecanización locales.

40 D) El escalar Mu, asociado al vector de desgaste Vu, es calculado según una medida de la eficiencia de la mecanización. Ya que es probable que decrezca la longitud de la herramienta, el producto (Mu . Vu) hace que sea posible reposicionar el punto O en el sistema de coordenadas XYZ. Para más detalles relacionados con la evaluación del desgaste de la herramienta usando información suministrada por el generador de la mecanización 30, véase: Philip Bleys, Electrical discharge milling, technology and tool wear compensation, PhD thesis 2003, K.U. Leuven, Dept. of Mech. Engineering.

E) El vector suma de las cuatro acciones de regulación independientes  $Ma \cdot Va + Mg \cdot Vg + Mu \cdot Vu + Mp \cdot Vp$  constituye un vector resultante V.

45 F) Según un método convencional, el vector resultante V es proyectado sobre cada uno de los ejes XYZ del sistema de coordenadas de la máquina para producir un conjunto de comandos 35, Vx, Vy, Vz para cada uno de los reguladores de eje 29, las cantidades Vx, Vy, Vz son escalares que representan valores de las velocidades de trabajo.

G) Se detecta cualquier cruce de la línea bisectriz intersegmentos 11.

50 En un modo de ejecución simplificado de la invención, sólo se definen dos Vectores de Control: Vg, Vp, es decir, Vector de Separación y Vector de Posición.

De manera similar, el regulador del proceso 28, en colaboración con el sistema de control numérico 27, procesa estos dos vectores para formar un conjunto de comandos 35 para activar los reguladores de ejes 29.

La amplitud de cada una de las dos acciones de regulación es determinada por dos escalares asociados Mg, Mp

respectivamente. Las operaciones siguientes (desde la A' a la E') son realizadas en tiempo real, es decir, en el tiempo de cada bucle de computación:

A') Para calcular el escalar  $M_p$ , la proyección sobre el Vector de Posición  $V_p$  del vector error de posición  $O_p$  es multiplicada por  $K_p$  que es la ganancia del bucle de corrección del error de posición.

5 B') La medida de la separación, proporcionada por el generador de mecanización 30, permite al regulador del proceso 28 calcular el escalar  $M_g = K_g \cdot \text{Separación}$  asociado al Vector de Separación  $V_g$ , en donde  $K_g$  es la ganancia de la regulación del bucle de corrección.

C') El vector suma de las dos acciones de regulación independientes  $M_p \cdot V_p + M_g \cdot V_g$  constituye un vector resultante  $V$ .

10 D') Según un método convencional, el vector resultante  $V$  es proyectado sobre cada uno de los ejes XYZ del sistema de coordenadas de la máquina, para proporcionar un conjunto de comandos 34,  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ , etc. a cada uno de los ejes reguladores 29, las cantidades  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  son escalares que representan valores de las velocidades de trabajo.

E') Se detecta cualquier cruce de la línea bisectriz intersegmentos 11.

15 Los modos y variantes de ejecución descritos anteriormente no son de ninguna manera limitadores, sino que aceptan cualquier modificación que pueda ser deseable dentro del contexto definido por las reivindicaciones independientes.

20 En particular, la máquina de mecanización por erosión por arco puede incluir uno o más ejes de giro. En estas condiciones, el vector resultante  $V$ , que es el vector suma de las acciones de regulación independientes, no es simplemente proyectado sobre cada uno de los ejes lineales XYZ del sistema de coordenadas de la máquina. Usando métodos de cálculo conocidos, es necesario realizar transformaciones en tiempo real de coordenadas más complejas.

25 En la explicación anterior, los reguladores de eje 29 reciben comandos por medio de valores de velocidades de trabajo 35 obtenidas del regulador del proceso 28. Algunos reguladores de eje no incluyen la entrada de la velocidad; en este caso, deben ser controlados por medio de la posición. Dicha variante puede ser prevista, pero reduce el ancho de banda.

**REIVINDICACIONES**

1. Método para mecanizar por erosión por arco o chispa para máquina de mecanización por erosión por arco o chispa, implementando:
- 5 - una separación de mecanización (8), situada entre un electrodo de herramienta (2) y una parte, ambos conductores de electricidad, una separación (8) dentro de la que se generan una multitud de descargas eléctricas erosivas, constituyendo un borde de mecanización que es desplazado según los movimientos del electrodo de herramienta (2),
  - un medio dieléctrico presente dentro de la separación de mecanización (8),
  - 10 - siendo dicho electrodo de herramienta (2) de forma cilíndrica o tubular, movido a lo largo de un número de ejes de la máquina de mecanización respecto al borde de mecanización,
  - un regulador del proceso,
  - un sistema de control numérico para controlar los desplazamientos de los varios ejes de la máquina de mecanización,
  - 15 - una Trayectoria Nominal (1) del electrodo de herramienta (2) definida por medio de un archivo de ordenador suministrado aguas arriba del sistema de control numérico de la máquina de mecanización y consistiendo en una sucesión de segmentos lineales (10, 12) definidos respecto a un sistema de coordenadas de la parte (XYZ), describiendo esta Trayectoria Nominal (1) el movimiento del electrodo de herramienta (2) respecto a la parte procediendo como si no ocurriera ninguna perturbación durante la mecanización,
  - 20 **caracterizado por que** la información contenida en la Trayectoria Nominal (1) es usada para definir al menos dos vectores de control (Vg, Vp) que orientan, dentro del sistema de coordenadas de la parte, al menos dos movimientos de regulación independientes,
  - definiendo el primero de dichos vectores de control, o Vector de Separación (Vg) la dirección en la que el sistema de control numérico debe realizar un primer movimiento de regulación de los ejes de la máquina de mecanización diseñada para mantener el rebajado del material,
  - 25 - definiendo el segundo de dichos vectores de control, o Vector de Posición (Vp), la dirección en la que el regulador de la mecanización debe realizar un segundo movimiento de regulación de los ejes de la máquina de mecanización para corregir un error de posición del electrodo de herramienta (2) respecto a la Trayectoria Nominal (1), siendo las amplitudes respectivas de los movimientos de regulación calculadas en tiempo real por el regulador del proceso,
  - 30 - y que el Vector de Posición (Vp) no incluye ninguna componente del vector paralela al Vector de Separación (Vg) y viceversa.
2. Método según la reivindicación 1, **caracterizado por que** hay definido un tercer vector de control, o Vector de Desgaste (Vu), que hace que sea posible realizar un tercer movimiento de regulación destinado a compensar el desgaste de la herramienta (2), siendo tomada su definición de la Trayectoria Nominal (1).
- 35 3. Método según la reivindicación 1, **caracterizado por que** un cuarto vector de control, o Vector de Avance (Va) orienta la acción de avanzar la herramienta (2) paralela a la Trayectoria Nominal (1).
4. Método según las reivindicaciones precedentes, **caracterizado por que** los escalares (Mg, Mp, Mu, Ma) asociados al Vector de Separación, Vector de Posición, Vector de Desgaste, Vector de Avance respectivamente, determinan las amplitudes respectivas de cada uno de los movimientos de regulación orientados por dichos vectores de control, siendo calculados dichos escalares en tiempo real por el regulador del proceso junto con el sistema de control numérico.
- 40 5. Método según al menos una de las reivindicaciones precedentes, **caracterizado por que**, durante los cambios de dirección definidos por la Trayectoria Nominal (1), los vectores de control son, donde sea apropiado, reorientados y sus escalares asociados recalculados, cuando el eje de simetría del electrodo de herramienta (2) cruza la línea bisectriz intersegmentos (11) formada por el segmento de la trayectoria (10) en curso y el siguiente segmento de la trayectoria (12).
- 45 6. Método según las reivindicaciones 1, 2 y 3, **caracterizado por que** el vector de avance (Va) apunta en una dirección paralela a la trayectoria del electrodo de herramienta (2),
- 50 el Vector de Desgaste (Vu) apunta en una dirección paralela al eje de simetría de la herramienta (2) y perpendicular al Vector de Avance (Va),
- el Vector de Separación (Vg) apunta en la misma dirección que el Vector de Avance (Va),

el Vector de Posición (Vp) apunta en una dirección perpendicular al Vector de Avance (Va), al Vector de Desgaste (Vu) y al Vector de Separación (Vg).

7. Método según la reivindicación 6, **caracterizado por que** el eje de simetría de la herramienta (2) ya no es perpendicular sino que está inclinado respecto a la trayectoria y al Vector de Avance (Va).

5 8. Método según las reivindicaciones 1, 2 y 3, **caracterizado por que** el Vector de Avance (Va) apunta en una dirección paralela a la trayectoria,

el Vector de Desgaste (Vu) apunta en una dirección paralela al eje de simetría de la herramienta (2) y perpendicular al Vector de Avance (Va),

10 el Vector de Separación (Vg) es paralelo al plano del Vector de Avance, Vector de Desgaste (Va, Vu) y apunta hacia una dirección intermedia entre estos dos vectores, de preferencia a 45° del Vector de Avance (Va) y del Vector de Desgaste (Vu).

9. Método según las reivindicaciones 1, 2 y 3, **caracterizado por que** el Vector de Avance (Va) apunta en una dirección paralela a la Trayectoria Nominal (1),

15 el Vector de Desgaste (Vu) apunta en una dirección paralela al eje de simetría de la herramienta (2) y perpendicular al Vector de Avance (Va),

el Vector de Separación (Vg) apunta en la misma dirección que el Vector de Desgaste (Vu),

el Vector de Posición (Vp) apunta en una dirección perpendicular a los vectores de Avance, Desgaste y Separación (Va, Vu, Vg).

20 10. Método según la reivindicación 9, **caracterizado por que** en el caso en donde el régimen de desgaste volumétrico es bajo, según unos ajustes particulares de la máquina, el escalar (Mu) asociado al Vector de Desgaste (Vu) es forzado a ser igual a cero, siendo proporcionada la compensación por el desgaste por el primer movimiento de regulación definido por el Vector de Separación (Vg).

11. Método según las reivindicaciones 1, 2 y 3, **caracterizado por que** el Vector de Avance (Va) apunta en una dirección paralela a la Trayectoria Nominal (1),

25 el Vector de Desgaste (Vu) apunta en una dirección paralela al eje de simetría de la herramienta (2) y perpendicular al Vector de Avance (Va),

el Vector de Separación (Vg) apunta en una dirección próxima a la normal a la superficie (7) a ser procesada,

el Vector de Posición (Vp) está contenido en un plano paralelo al plano del Vector de desgaste, Vector de Separación (Vu, Vg) y apunta en una dirección perpendicular al Vector de Separación (Vg).

30 12. Método según la reivindicación 11, **caracterizado por que** el eje del electrodo de herramienta (2) es sustancialmente paralelo a la superficie (7) a ser procesada, en cuyo caso el escalar (Mu) asociado al Vector de Desgaste (Vu) es forzado a ser igual a cero, siendo proporcionada la compensación por el desgaste por el primer movimiento de regulación definido por el Vector de Separación (Vg).

13. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco implementando:

35 - una separación de mecanización (8), situada entre un electrodo de herramienta (2) y una parte, ambos conductores de electricidad, una separación (8) dentro de la que son generadas una multitud de descargas eléctricas erosivas, constituyendo un borde de mecanización que es desplazado según los movimientos del electrodo de herramienta (2),

- un medio dieléctrico presente dentro de la separación de mecanización (8),

40 - siendo dicho electrodo de herramienta (2) de forma cilíndrica o tubular, movido a lo largo de un número de ejes de la máquina de mecanización respecto al borde de mecanización,

- un regulador del proceso incorporado en un sistema de control numérico, que hace que sea posible controlar los desplazamientos de los varios ejes de la máquina de mecanización por medio de reguladores de eje,

45 - una Trayectoria Nominal (1) para el electrodo de herramienta (2) definida por medio de un archivo de ordenador suministrado aguas arriba del sistema de control numérico de la máquina de mecanización y consistiendo en una sucesión de segmentos lineales (10, 12) definidos respecto a un sistema de coordenadas de la parte (X,Y,Z), describiendo esta Trayectoria Nominal (1) el movimiento del electrodo de herramienta (2) respecto a la parte como procedería si no ocurriera ninguna perturbación durante la mecanización,

**caracterizado por que** la información contenida en la Trayectoria Nominal (1) es usada para definir al menos dos

vectores de control (Vg, Vp) que orientan en el sistema de coordenadas (X,Y,Z) al menos dos movimientos de regulación independientes,

5 - definiendo el primero de dichos vectores de control, o Vector de Separación (Vg), la dirección en la que el regulador de mecanización debe realizar un primer movimiento de regulación de los ejes de la máquina de mecanización diseñada para mantener el rebajado del material,

10 - definiendo el segundo de dichos vectores de posición, o Vector de Posición (Vp), la dirección en la que el regulador de mecanización debe realizar un segundo movimiento de regulación de los ejes de la máquina de mecanización para corregir un error de posición del electrodo de herramienta (2) respecto a la Trayectoria Nominal (1), siendo calculadas en tiempo real las amplitudes respectivas de los movimientos de regulación por el regulador del proceso,

- y porque el Vector de Posición (Vp) no incluye ninguna componente del vector paralela al Vector de Separación (Vg) y viceversa.

15 14. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según la reivindicación 13, **caracterizada por que** el regulador del proceso asocia, al Vector de Posición y al Vector de Separación (Vp, Vg) respectivamente, dos escalares (Mp, Mg) que determinan la amplitud de cada una de las al menos dos acciones de regulación independientes, calcula el vector suma de dichas acciones de regulación ( $Mp \cdot Vp + Mg \cdot Vg$ ) constituyendo un vector resultante (V) proyectado sobre cada uno de los ejes (XYZ) del sistema de coordenadas de la máquina, para proporcionar un grupo de comandos (Vx, Vy, Vz) a cada uno de los reguladores de eje.

20 15. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según la reivindicación 13, **caracterizada por que** un tercer vector de control, o Vector de Desgaste (Vu), es definido a partir de la Trayectoria Nominal (1), haciendo este vector que sea posible realizar un tercer movimiento de regulación destinado a compensar el desgaste de la herramienta (2).

25 16. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según la reivindicación 13, **caracterizada por que** un cuarto vector de control, o Vector de Avance (Va), orienta la acción de avanzar la herramienta (2) paralela a la Trayectoria Nominal (1).

30 17. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según las reivindicaciones 13 a la 16, **caracterizada por que** los escalares (Mg, Mp, Mu, Ma) asociados al Vector de Separación, al Vector de Posición, al Vector de Desgaste y al Vector de Avance respectivamente, determinan la amplitud respectiva de cada uno de los movimientos de regulación orientados por dichos vectores de control, siendo calculados dichos escalares en tiempo real por el regulador del proceso junto con el sistema de control numérico.

35 18. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según las reivindicaciones 13 a la 17, **caracterizada por que**, durante los cambios de dirección definidos por la Trayectoria Nominal (1), los Vectores de Control son, cuando sea apropiado, reorientados y sus escalares asociados recalculados, cuando el eje de simetría del electrodo de herramienta (2) cruza la Línea Bisectriz Inter Segmentos (11) formada por el segmento de la trayectoria en curso (10) y el siguiente segmento de la trayectoria (12).

40 19. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según las reivindicaciones 13, 15 y 16, **caracterizada por que** el Vector de Avance (Va) apunta en la dirección paralela a la trayectoria del electrodo de herramienta (2),

el Vector de Desgaste (Vu) apunta en una dirección paralela al eje de simetría de la herramienta (2) y perpendicular al Vector de Avance (Va),

el Vector de Separación (Vg) apunta en la misma dirección que el Vector de Avance (Va),

el Vector de Posición (Vp) apunta en una dirección perpendicular al Vector de Avance (Va), al Vector de Desgaste (Vu) y al Vector de Separación (Vg).

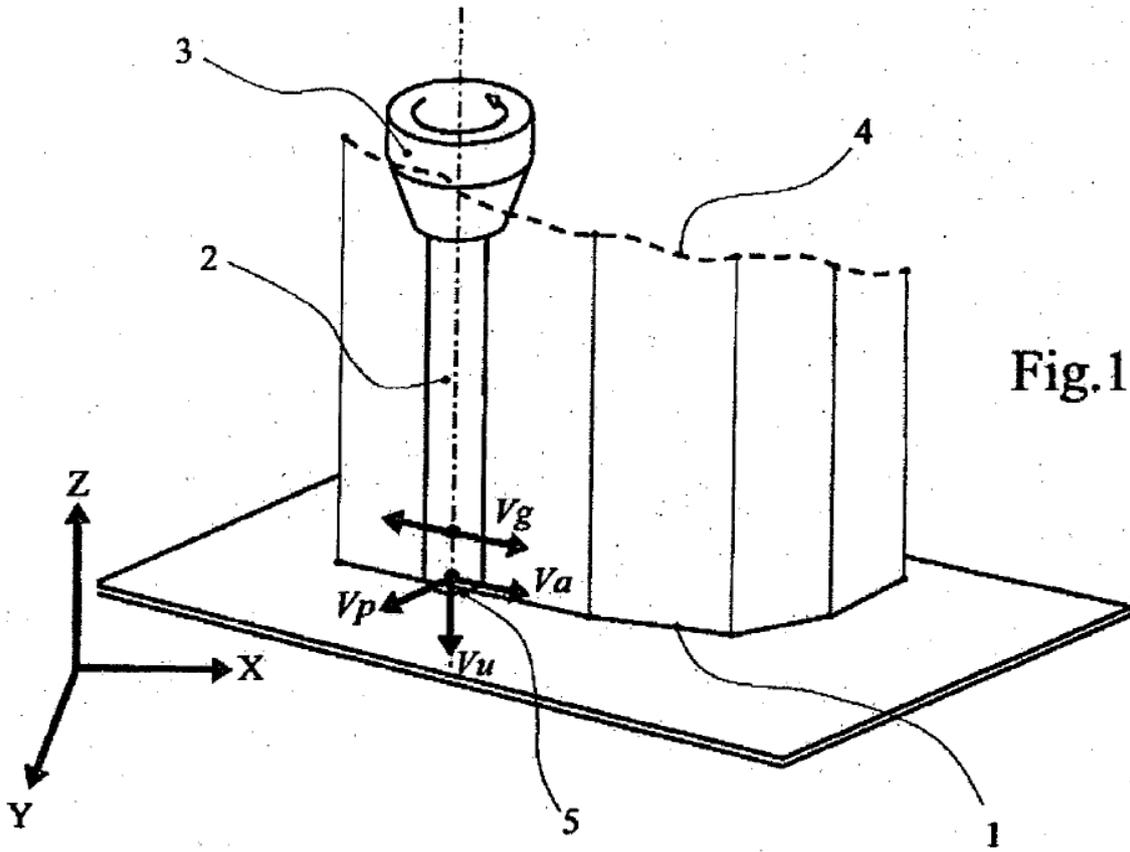
45 20. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según la reivindicación 19, **caracterizada por que** el eje de simetría de la herramienta (2) no es perpendicular sino que está inclinado respecto a la trayectoria y al Vector de Avance (Va).

50 21. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según las reivindicaciones 13, 15 y 16, **caracterizada por que** el Vector de Avance (Va) apunta en una dirección paralela a la trayectoria,

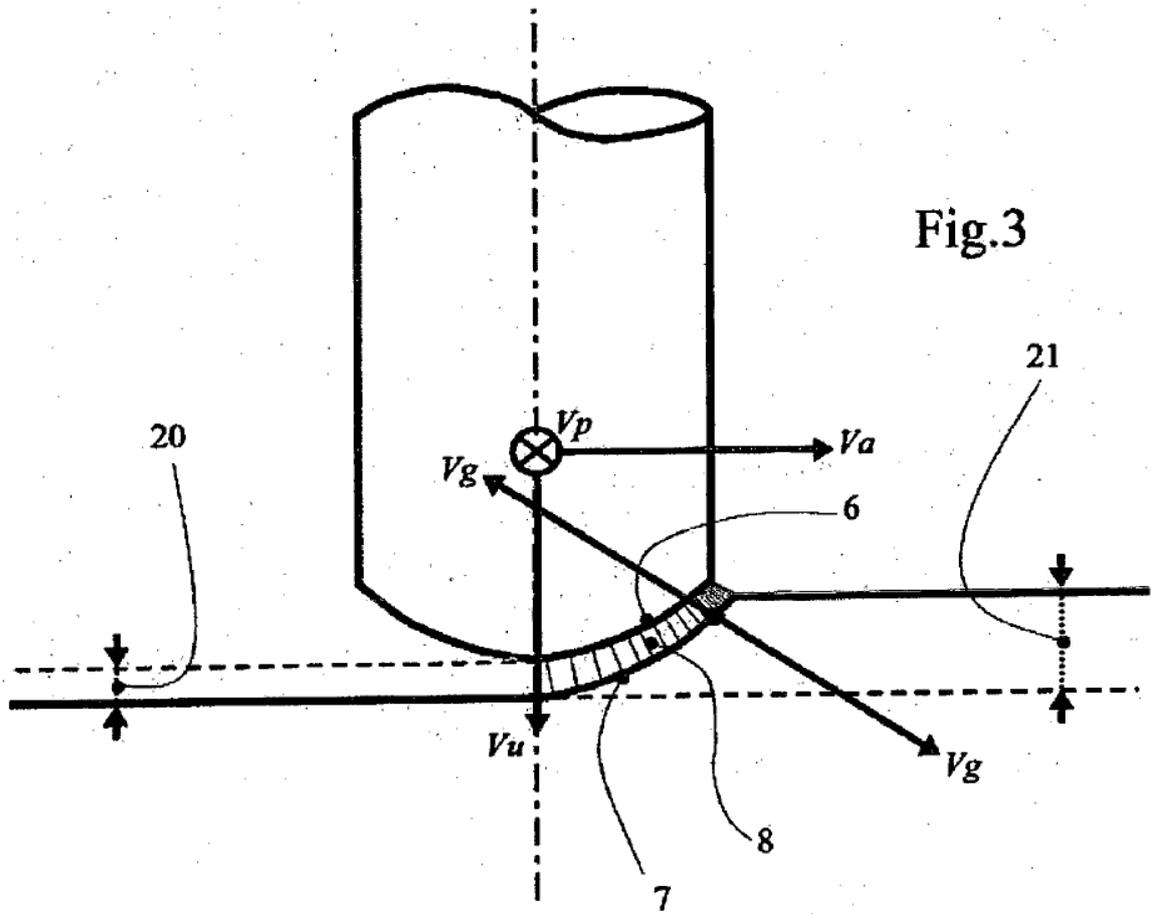
el Vector de Desgaste (Vu) apunta en una dirección paralela al eje de simetría de la herramienta (2) y perpendicular al Vector de Avance (Va),

el Vector de Separación (Vg) es paralelo al plano del Vector de Avance, Vector de Desgaste (Va, Vu) y apunta en una dirección intermedia entre estos dos vectores, de preferencia a 45° del Vector de Avance (Va) y del Vector de Desgaste (Vu).

22. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según las reivindicaciones 13, 15 y 16, **caracterizada por que** el Vector de Avance (Va) apunta en una dirección paralela a la Trayectoria Nominal (1),  
el Vector de Desgaste (Vu) apunta en una dirección paralela al eje de simetría de la herramienta (2) y perpendicular al Vector de Avance (Va),
- 5 el Vector de Separación (Vg) apunta en la misma dirección del Vector de Desgaste (Vu),  
el Vector de Posición (Vp) apunta en una dirección perpendicular a los Vectores de Avance, Desgaste y Separación (Va, Vu, Vg).
23. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según la reivindicación 22, **caracterizada por que**,  
10 en el caso en el que régimen de desgaste volumétrico es bajo, según los ajustes particulares de la máquina, el escalar (Mu) asociado al Vector de Desgaste (Vu) es forzado a ser igual a cero, siendo proporcionada la compensación por el desgaste por el primer movimiento de regulación definido por el Vector de Separación (Vg).
24. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según las reivindicaciones 13, 15 y 16, **caracterizada por que** el Vector de Avance (Va) apunta en una dirección paralela a la Trayectoria Nominal (1),  
15 el Vector de Desgaste (Vu) apunta en una dirección paralela al eje de simetría de la herramienta (2) y perpendicular al Vector de Avance (Va),  
el Vector de Separación (Vg) apunta en una dirección próxima a la normal a la superficie (7) a ser procesada,  
el Vector de Posición (Vp) está contenido dentro de un plano paralelo al plano del Vector de Desgaste, Vector de Separación (Vu, Vg) y apunta en una dirección perpendicular al Vector de Separación (Vg).
25. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según la reivindicación 24, **caracterizada por que**  
20 el eje del electrodo de herramienta (2) es sustancialmente paralelo a la superficie (7) a ser procesada, en cuyo caso el escalar (Mu) asociado al Vector de Desgaste (Vu) es forzado a ser igual a cero, siendo proporcionada la compensación por el desgaste por el primer movimiento de regulación definido por el Vector de Separación (Vg).
26. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según la reivindicación 13, **caracterizada por que**  
25 el sistema de control numérico comprende un número de reguladores de eje equipados de tal manera que son controlados por medio de los valores de las velocidades de trabajo (Vx, Vy, Vz).
27. Uso de una máquina de mecanización por erosión por arco según la reivindicación 17, en la que el regulador  
30 del proceso maneja cuatro Vectores de Control unitarios, el Vector de Avance, el Vector de Separación, el Vector de Desgaste y el Vector de Posición (Va, Vg, Vu, Vp), que orientan cuatro acciones de regulación independientes, siendo determinada la amplitud de cada una de las acciones de regulación por cuatro escalares asociados (Ma, Mg, Mu, Mp) respectivamente, caracterizados porque el vector suma de dichas acciones de regulación ( $Ma \cdot Va + Mg \cdot Vg + Mu \cdot Vu + Mp \cdot Vp$ ) constituye un vector resultante (V) que es proyectado sobre cada uno de los ejes (X,Y,Z,) del sistema de coordenadas de la máquina para producir un conjunto de comandos (Vx, Vy, Vz) para cada uno de los reguladores de eje.







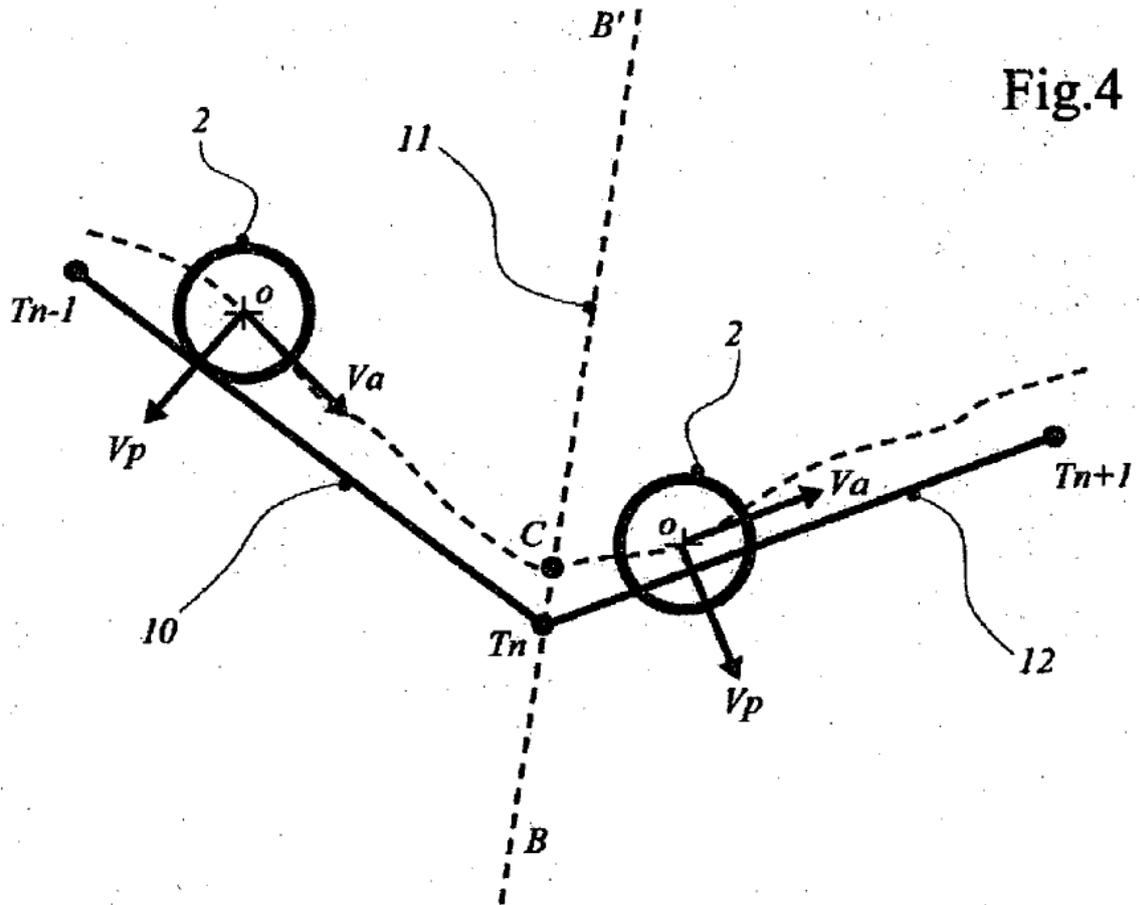
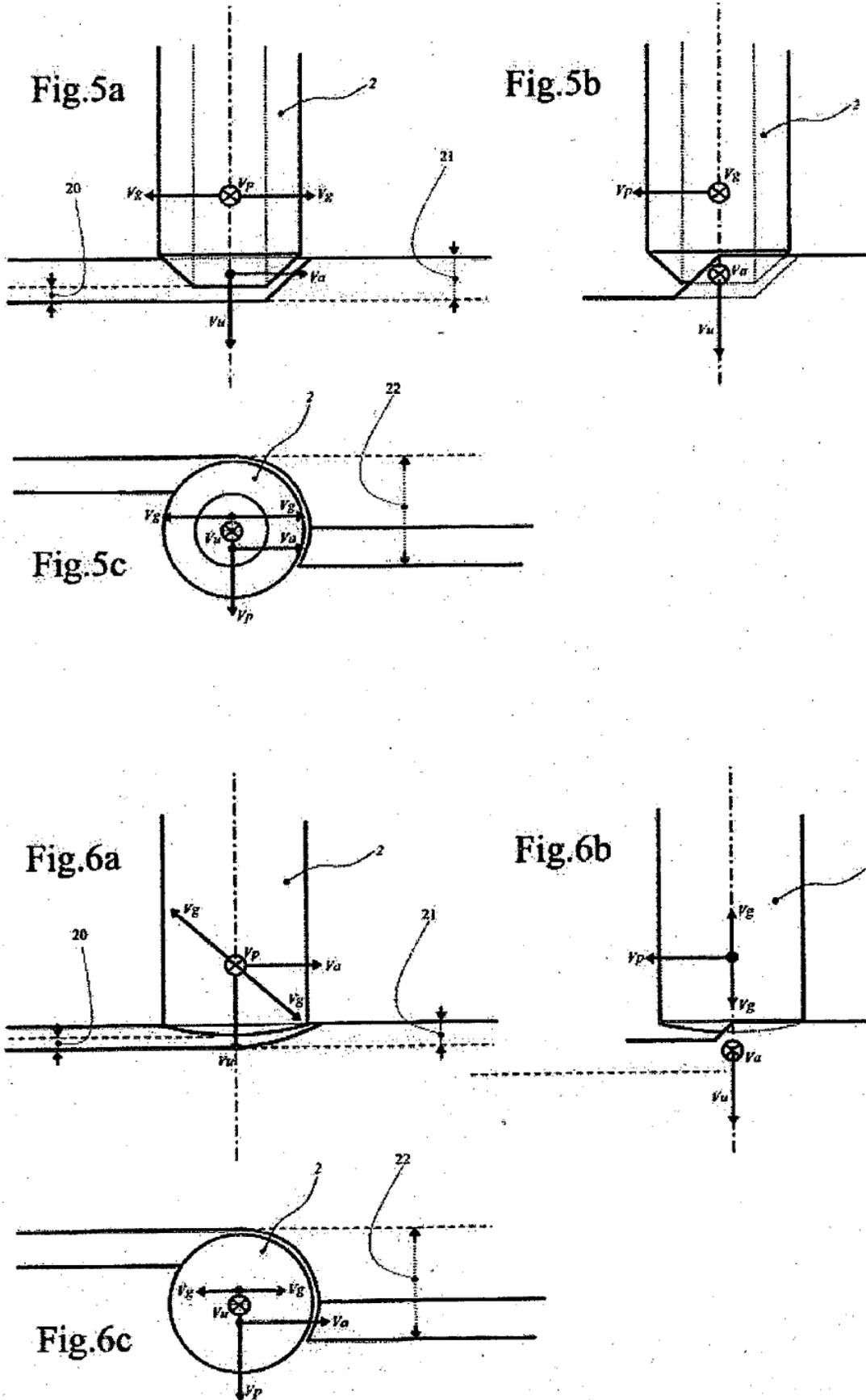


Fig.4



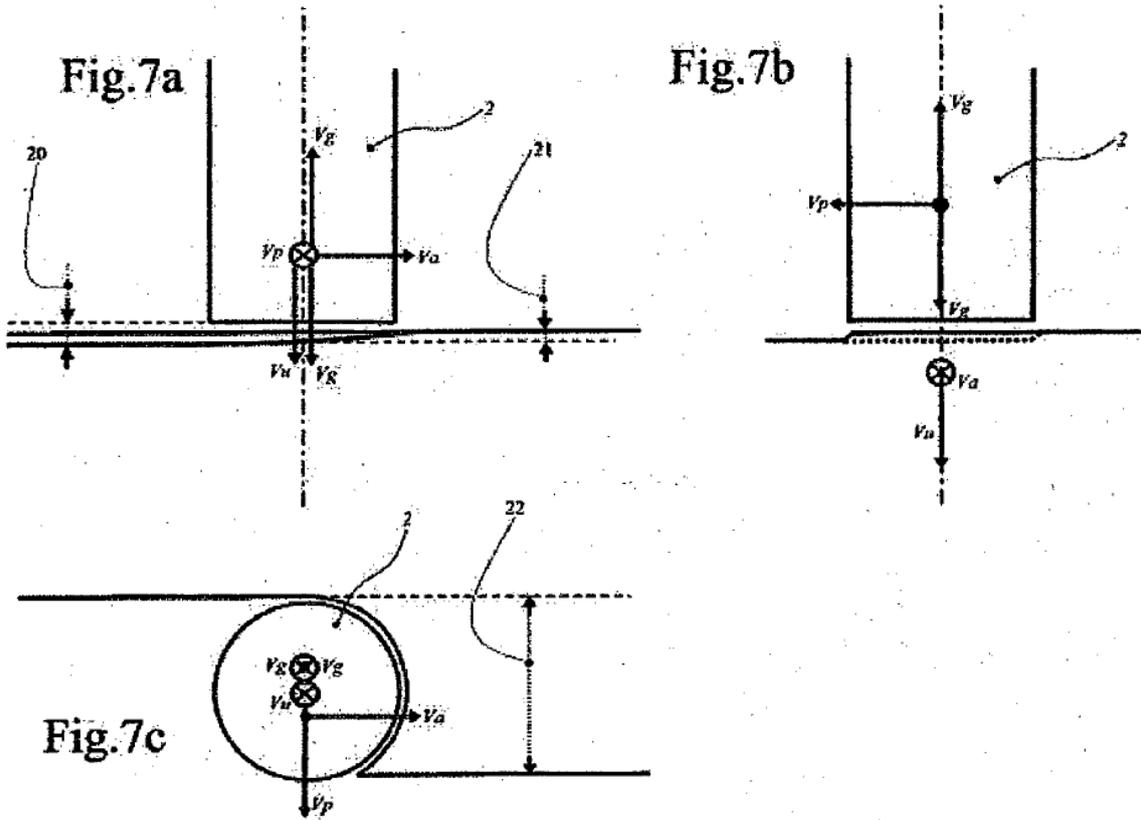


Fig. 8

