



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 314 048**

51 Int. Cl.:  
**B23K 9/095** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **02720700 .0**

96 Fecha de presentación : **28.03.2002**

97 Número de publicación de la solicitud: **1372896**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **02.01.2004**

54 Título: **Un método de soldadura por arco.**

30 Prioridad: **02.04.2001 SE 2001101163**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**16.03.2009**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**16.03.2009**

73 Titular/es: **ABB AB.**  
**721 83 Västerås, SE**

72 Inventor/es: **Kaddani, Ahmed;**  
**Windecker, Ulrike;**  
**Skarin, Dick;**  
**Lemarinier, Pavel;**  
**Zahrai, Said y**  
**Gu, Chun-Yuan**

74 Agente: **Ungría López, Javier**

ES 2 314 048 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

Un método de soldadura por arco.

5 **Campo de la invención y técnica anterior**

La presente invención se refiere a un método para controlar un equipo de soldadura por arco usado en una operación de soldadura y ajustable variando al menos el valor de un parámetro de soldadura, comprendiendo dicho método las etapas de: determinar dicho al menos un valor del parámetro de soldadura mientras que se usa un modelo teórico del proceso de soldadura asociado con la operación de soldadura y controlando la operación del equipo de soldadura y el proceso de soldadura asociado con el mismo usando dicho al menos un valor del parámetro de soldadura para ajustar el equipo de soldadura, a un método para simular un proceso de soldadura por arco, comprendiendo dicho método las etapas de: introducir datos en un modelo teórico que representa el proceso de soldadura y determinar al menos un valor del parámetro de soldadura mientras que se usa el modelo teórico y los datos introducidos con el fin de simular el proceso de soldadura y a un método para predecir la calidad de una soldadura obtenida a partir de una operación de soldadura por arco comprendiendo dicho método las etapas de: introducir datos en un modelo teórico que representa el proceso de soldadura asociado con la operación de soldadura y determinar al menos una propiedad de la soldadura relacionada con al menos un parámetro de soldadura del proceso de soldadura mientras que se usa el modelo teórico y los datos introducidos.

La invención se refiere también a un dispositivo que comprende un equipo de soldadura por arco usado en una operación de soldadura y que puede ajustarse variando al menos un parámetro de soldadura y una disposición para controlar la operación del equipo de soldadura por arco, incluyendo dicha disposición un medio adaptado para determinar el valor de dicho al menos un parámetro de soldadura mientras que se usa el parámetro teórico del proceso de soldadura y un miembro adaptado para controlar el funcionamiento del equipo de soldadura y el proceso de soldadura asociado con el mismo usando dicho al menos un parámetro de soldadura para ajustar el equipo de soldadura.

Adicionalmente, la invención se refiere a usos de los métodos y a los productos de un programa de ordenador de acuerdo con las reivindicaciones adjuntas.

Cuando las piezas de trabajo se unen por soldadura por arco la calidad de las juntas soldadas depende en gran medida de los parámetros ajustados durante la operación de soldadura por arco. Los ejemplos de estos parámetros de soldadura son la corriente de soldadura, la tensión de suministro, el tipo de gas de protección, el caudal de gas de protección, la velocidad de soldadura, el ángulo de la antorcha, la extensión del electrodo (cable), la velocidad de suministro de cable y otras propiedades del cable y de la pieza de trabajo, tales como dimensiones y materiales. Estos parámetros de soldadura interactúan entre sí en el proceso de soldadura de una manera compleja e influyen en las propiedades, es decir, en la geometría o tipo de soldadura, metalurgia y resistencia mecánica de la soldadura resultante de la operación de soldadura. Más precisamente, la calidad de una junta de soldadura depende en gran medida del modo de transferencia de metal presente durante la soldadura. En otras palabras, la manera en la que el metal se transfiere desde la punta del cable (por ejemplo, el ánodo) a la pieza de trabajo (por ejemplo, el cátodo) durante la soldadura tiene un efecto muy fuerte sobre las propiedades finales y la calidad de la junta soldada.

Por supuesto, hay una necesidad de conocer diferentes conjuntos de parámetros ajustables que afectarán a las propiedades de la junta soldada de manera que los parámetros pueden ajustarse de manera que da como resultado la soldadura deseada. Una manera es intentar predecir el modo de transferencia de metal basado en el conocimiento sobre la influencia de los diferentes parámetros. Sin embargo, de acuerdo con el estado de la técnica el modo de transferencia de metal se determina principalmente por métodos empíricos. Las personas con gran experiencia en soldadura por arco pueden identificarse el modo de transferencia de metal por el ruido generado por el proceso de soldadura. La inspección de la junta soldada después de acabada de la operación de soldadura puede dar pistas también de qué tipo de transferencia de metal estuvo presente durante la operación de soldadura. De esta manera, actualmente, los ajustes de los parámetros del proceso de soldadura importantes usados en soldadura por arco robótica se encuentran experimentalmente por ensayo y error de cada tarea de soldadura o condición de soldadura individual, que consume y tiempo y es costosa. Por ejemplo, en el caso de usar parámetros resultantes que dan como resultado un modo de transferencia de metal no deseado la junta soldada puede ser de una mala calidad y la pieza de trabajo puede destruirse.

Una razón para la ausencia de conocimiento sobre cómo los parámetros de soldadura afectan al proceso de soldadura en general y particularmente al arco y sobre las relaciones entre los parámetros de soldadura usados en la calidad de la junta soldada es la dificultad de realizar medidas del arco o en las proximidades del arco y en las regiones cerca del arco próximas al cable y la pieza de trabajo. De esta manera, como una consecuencia no deseada, es muy difícil diseñar un sistema de control basado en medidas directas de los parámetros de arco para controlar el equipo de soldadura por arco. El hecho es que la soldadura por arco automatizada o robótica se usa en bastantes pocas de las aplicaciones de soldadura por arco realizadas en el mundo actualmente, ya que es difícil predecir el resultado de la operación de soldadura y las propiedades del proceso de soldadura asociado con la misma para un conjunto dado de parámetros de soldadura junto con pequeñas series proporcionales de piezas de trabajo, hace más eficaz respecto a costes que los trabajadores especializados en soldadura realicen el trabajo manualmente.

El documento EP 0930125 muestra un método y aparato proporcionado para determinar el coeficiente de utilización, el amperaje medio y/o el número de inicios de arco durante una operación de soldadura. El aparato comprende

primer y segundos circuitos, siendo el primer circuito un circuito de control de CPU y siendo el segundo circuito un circuito detector de tiempo de arco que se programa para medir el amperaje, la velocidad de suministro de cable de soldadura y, preferiblemente, caudales de gas durante la soldadura. Una proporción del tiempo de soldadura acumulativo durante la revisión al total en el tiempo proporciona una medida de la eficacia del arco de soldadura. La eficacia de deposición de la soldadura puede calcularse entonces usando un amperaje medio y un coeficiente de utilización de soldadura medido y calculado por el aparato. El número de inicios de arco cuando el arco en tiempo supera un segundo puede proporcionar también una medida utilizable para dar información secundaria sobre la eficacia global de la operación de soldadura.

El documento WO0102125 muestra un aparato (10) para determinar la calidad de una soldadura producida por un dispositivo de soldadura (12) de acuerdo con la presente invención que puede comprender un detector (16, 18 o 20) asociado operativamente con el dispositivo de soldadura (12) para detectar al menos un parámetro del proceso de soldadura para producir una señal del parámetro del proceso de soldadura relacionada con el parámetro del proceso de soldadura. Un ordenador (26) conectado con el detector (16, 18 o 20) y sensible a la señal del parámetro del proceso de soldadura producida por el detector (16, 18 o 20) compara la señal del parámetro del proceso de soldadura con un parámetro inicial y produce una señal de salida (40) indicativa de si la señal del parámetro de soldadura es conforme al parámetro inicial.

El documento US 6133545 muestra un suceso de soldadura medido reproducido por un robot de soldadura. Los sucesos de soldadura se organizan en una base de datos mediante un dispositivo de medida tridimensional y un dispositivo de cálculo logarítmico de datos y los sucesos de soldadura se someten a procesos estadísticos y analíticos, produciendo de esta manera datos operativos de un robot.

### Sumario de la invención

Un primer objeto de la invención es proporcionar un método para controlar un equipo de soldadura por arco, permitiendo dicho método que el equipo de soldadura por arco pueda controlarse durante una operación de soldadura ajustando al menos un parámetro de soldadura determinado sin necesidad de medidas del proceso de soldadura o repetición de experimentos de soldadura antes de la soldadura.

El primer objeto se obtiene de acuerdo con la invención proporcionando un método tal, como al que se ha hecho referencia en la introducción, que comprende las etapas de:

- dividir el proceso de soldadura en al menos dos partes separadas, de las cuales al menos una parte representa el arco o una parte del mismo, en el modelo teórico,

- representar cada una de dichas al menos dos partes del proceso de soldadura y el parámetro/parámetros de soldadura asociados con el mismo mediante un componente del modelo,

- poner los componentes del modelo y una fuente de energía del modelo en un modelo de circuito eléctrico, y

- calcular al menos un parámetro del modelo de circuito eléctrico relacionado con dicho al menos un parámetro de soldadura a partir del modelo de circuito eléctrico.

Mediante dicho método es posible determinar al menos un valor del parámetro de soldadura tal como la corriente de soldadura o el suministro de tensión, la velocidad de suministro de cable, la extensión del cable, etc, y usar este valor del parámetro de soldadura para controlar el equipo de soldadura por arco de acuerdo con las presentes condiciones para obtener una soldadura con las propiedades deseadas.

Un segundo objeto de la invención es proporcionar un método para simular un proceso de soldadura por arco sin necesidad de medidas del proceso de soldadura real correspondiente o experimentos de soldadura repetidos.

El segundo objeto se obtiene de acuerdo con la invención proporcionando dicho método, al que se ha hecho referencia en la introducción, que comprende las etapas de:

- dividir el proceso de soldadura en al menos dos partes diferentes, de las cuales al menos una parte representa el arco o una parte del mismo, en el modelo teórico,

- representar cada una de dichas al menos dos partes del proceso de soldadura y el parámetro/parámetros de soldadura asociados con el mismo mediante un componente del modelo,

- poner los componentes del modelo y una fuente de energía del modelo en un modelo de circuito eléctrico, y

- calcular al menos un parámetro del modelo de circuito eléctrico relacionado con dicho al menos un parámetro de soldadura a partir del modelo de circuito eléctrico.

Mediante este método de simulación es posible obtener al menos un valor del parámetro de soldadura y/o el presente modo de transferencia en metales para un conjunto dado de otros parámetros de soldadura en la simulación

## ES 2 314 048 T3

y, por ejemplo, este método de simulación puede usarse para entender y diseñar procesos de soldadura reales y para ajustar por defecto parámetros de soldadura del equipo de soldadura por arco en diferentes operaciones de soldadura por arco.

5 Un tercer objeto de la invención es proporcionar un método para predecir la calidad de una soldadura obtenida a partir de una operación de soldadura por arco sin necesidad de experimentos de soldadura repetidos.

El tercer objeto se obtiene de acuerdo con la invención proporcionando dicho método, al que se ha hecho referencia en la introducción, que comprende las etapas de:

10

- dividir el proceso de soldadura en al menos dos partes diferentes, de las cuales al menos una parte representa el arco o una parte del mismo, en el modelo teórico,

15

- representar cada una de dichas al menos dos partes del proceso de soldadura y el parámetro/parámetros de soldadura asociados con el mismo mediante un componente del modelo,

20

- poner los componentes del modelo y una fuente de energía del modelo en un modelo de circuito eléctrico, y

- calcular al menos un parámetro del modelo de circuito eléctrico relacionado con dicho al menos un parámetro de soldadura y relacionado con dicha al menos una propiedad de la soldadura, a partir del modelo de circuito eléctrico.

25

Mediante dicho método es posible predecir una o más propiedades mecánicas de una soldadura resultante de una operación de soldadura por arco determinando uno o más parámetros de soldadura requeridos para la calidad deseada y uso de esta información en operaciones de soldadura por arco reales. Es posible usar el método para predecir la calidad de una soldadura para un conjunto dado de parámetros de soldadura así como para determinar uno o más parámetros de soldadura requeridos para obtener ciertas propiedades mecánicas de la soldadura.

30

De acuerdo con una realización preferida de la invención uno o más de dichos métodos comprenden la etapa de:

35

- dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la región de interacción de arco-cable del proceso de soldadura está representada por separado por uno de dichos componentes del modelo en el modelo de circuito eléctrico. Mediante dicho método, junto con un modelo físico adecuado, se obtiene información importante porque es posible tener en cuenta factores importantes en el proceso de soldadura tales como la caída de tensión en la zona cerca del ánodo y el flujo térmico desde el arco al ánodo, para determinar dicho al menos un valor del parámetro de soldadura. En la región de interacción arco-cable del proceso de soldadura están presentes altos gradientes de diferentes cantidades tales como temperatura y concentración de partículas y la caída de tensión en esta zona es muy alta. De esta manera, esta zona da una importante contribución a las características del proceso de soldadura.

40

De acuerdo con otra realización preferida de la invención uno o más de dichos métodos comprenden la etapa de:

45

- dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la región de interacción de arco-pieza de trabajo del proceso de soldadura está representada por separado por uno de dichos componentes del modelo en el modelo de circuito eléctrico. Mediante dicho método, junto con un modelo físico adecuado, se obtiene información importante porque es posible tener en cuenta factores importantes en el proceso de soldadura tales como la caída de tensión en la zona cerca del cátodo y el flujo térmico desde el arco al cátodo, para determinar dicho al menos un valor del parámetro de soldadura. En la región de interacción arco-pieza de trabajo del proceso de soldadura están presentes altos gradientes de diferentes cantidades tales como temperatura y concentración de partículas y la caída de tensión en esta zona es muy alta. De esta manera, esta zona da una importante contribución a las características del proceso de soldadura.

50

55

De acuerdo con otra realización preferida de la invención uno o más de dichos métodos comprenden las etapas de:

- dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la región de arco del proceso de soldadura se representa por separado por uno de dichos componentes del modelo en el modelo del circuito eléctrico. Mediante dicho método y particularmente junto con una realización que comprende la etapa de:

60

- determinar dicho componente del modelo que representa la parte de la región de arco mediante la información obtenida por cálculos a partir de un modelo físico de la parte de la región de la columna del arco del proceso de soldadura, se obtiene información importante tal como la temperatura media del arco, la temperatura cerca del cable, la temperatura cerca de la pieza de trabajo, el radio del arco y las características de corriente-tensión del arco, también es posible tener en cuenta las propiedades termofísicas de un gas de protección presente en la región de arco para determinar dicho al menos un valor del parámetro de soldadura.

65

## ES 2 314 048 T3

De acuerdo con otra realización preferida de la invención, uno o más de dichos métodos comprenden la etapa de:

- determinar dicho componente del modelo que representa la parte de la región de arco mediante la información obtenida a través de cálculos a partir de un modelo físico de la parte de la región de interacción arco-cable y/o de la parte de la región de interacción arco-pieza de trabajo de un proceso de soldadura, se obtiene información importante porque es posible tener en cuenta factores importantes en el proceso de soldadura tales como la caída de tensión en la zona cerca del ánodo/cátodo y el flujo térmico desde el arco al ánodo/cátodo, para determinar dicho al menos un valor del parámetro de soldadura. En la región de interacción arco-cable y en la región de interacción arco-pieza de trabajo del proceso de soldadura, están presentes altos gradientes de diferentes cantidades tales como temperatura y concentración de partículas y la caída de tensión en estas regiones es muy alta. Por lo tanto, estas regiones dan una importante contribución a las características del proceso de soldadura.

De acuerdo con otra realización preferida de la invención uno o más de dichos métodos comprende la etapa de:

- determinar dicho componente del modelo que representa la parte de la región de arco mediante dicho modelo físico que describe el arco con al menos una ecuación independiente de la extensión en el espacio del arco. Mediante dicho método y particularmente junto con una realización que comprende la etapa de:
  - determinar dicho componente del modelo que representa la parte de la región de arco mediante dicho modelo físico descrito mediante al menos una ecuación que únicamente depende del tiempo, el componente del modelo y de esta manera dicho al menos un valor del parámetro de soldadura puede determinarse rápidamente y con un tiempo computacional proporcionalmente corto que hace al método adecuado para usarlo por ejemplo para controlar un equipo de soldadura por arco en línea.

De acuerdo con otra realización preferida de la invención uno o más de dichos métodos comprende la etapa de:

- dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la región de la columna del arco del proceso de soldadura se representa por separado por uno de dichos componentes de modelo en el modelo de circuito eléctrico. Mediante dicho método, junto con un modelo físico adecuado, se obtiene información importante tal como la temperatura media del arco, la temperatura cerca del cable, la temperatura cerca de la pieza de trabajo, el radio del arco y las características de corriente-tensión del arco y también es posible tener en cuenta propiedades termofísicas de un gas de protección presente en la zona de la columna del arco para determinar dicho al menos un parámetro de soldadura.

De acuerdo con otra realización preferida de la invención dichos métodos comprenden la etapa de:

- dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de cable del proceso de soldadura se representa por separado por uno de dichos componentes del modelo en el modelo del circuito eléctrico. Mediante dicho método, junto con un modelo físico adecuado, se obtiene información importante tal como el modo de transferencia de metal, la frecuencia de inmersión, etc. y también es posible tener en cuenta propiedades materiales del cable para determinar el valor de dicho al menos un parámetro de soldadura.

De acuerdo con otra realización preferida de la invención dichos métodos comprenden la etapa de:

- dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la pieza de trabajo del proceso de soldadura se representa por separado por uno de dichos componentes del modelo en el modelo de circuito eléctrico. Mediante dicho método, junto con un modelo físico adecuado, se obtiene información importante sobre las características de calidad tales como perfil de junta de soldada, perfil de penetración, etc. y también es posible tener en cuenta propiedades de la pieza de trabajo para determinar el valor de dicho al menos un parámetro de soldadura.

Un cuarto objeto de la invención es proporcionar un dispositivo que tiene una disposición para controlar el equipo de soldadura por arco durante una operación de soldadura ajustando al menos un parámetro de soldadura determinado sin necesidad de medir el proceso de soldadura o experimentos de soldadura repetidos antes de la soldadura.

El cuarto objeto se obtiene de acuerdo con la invención es proporcionar dicho dispositivo, al que se ha hecho referencia en la introducción, en el que el medio incluido en la disposición de control se adapta para usar dicho modelo teórico que comprende al dos partes diferentes, de las cuales al menos una parte representa el arco o una parte del mismo, correspondiente a diferentes partes del proceso de soldadura, estando representada cada parte del modelo por un componente del modelo, incluyéndose dichos componentes del modelo junto con una fuente de energía del modelo en un modelo de circuito eléctrico y están adaptados para calcular al menos un parámetro del modelo eléctrico relacionado con dicho al menos un parámetro de soldadura a partir del modelo de circuito eléctrico para dicho control mediante dicho miembro. De esta manera, mediante el medio de acuerdo con la invención es posible determinar cómo ajustar al menos un valor del parámetro de soldadura tal como la corriente de soldadura o la tensión de suministro, la velocidad de suministro de cable, la extensión del cable, etc. con el fin de optimizar el proceso de soldadura en las presentes condiciones y usar este valor del parámetro de soldadura por dicho miembro para ajustar el

## ES 2 314 048 T3

equipo de soldadura por arco de acuerdo con las presentes condiciones para obtener una soldadura con las propiedades deseadas.

5 De acuerdo con una realización preferida de la invención dicho medio está adaptado para usar dicho modelo teórico que tiene la parte de la región de interacción arco-cable del proceso de soldadura representada por separado por uno de dichos componentes del modelo en el modelo de circuito eléctrico. Mediante dicho dispositivo, junto con un modelo físico adecuado, se obtiene información importante porque es posible tener en cuenta factores en el proceso de soldadura tales como la caída de tensión en la zona cerca del ánodo y el flujo térmico del arco al ánodo, para determinar dicho al menos un valor del parámetro de soldadura. En la región de interacción arco-cable del proceso de soldadura, están presentes altos gradientes de diferentes cantidades tales como temperatura de concentración y partículas y la caída de tensión en esta zona es muy alta. De esta manera, esta zona da una importante contribución a las características del proceso de soldadura.

15 De acuerdo con otra realización preferida de la invención dicho medio está adaptado para usar dicho modelo teórico que tiene una parte de región de interacción arco-pieza de trabajo del proceso de soldadura representada por separado mediante uno de dichos componentes del modelo en el modelo de circuito eléctrico. Mediante dicho dispositivo, junto con un modelo físico adecuado, se obtiene información importante porque es posible tener en cuenta factores importantes en el proceso de soldadura tales como la caída de tensión en la zona cerca del cátodo y el flujo térmico del arco al cátodo, para determinar dicho al menos un valor del parámetro de soldadura. En la región de interacción arco-pieza de trabajo del proceso de soldadura, están presentes altos gradientes de diferentes cantidades tales como temperatura y concentración de partículas y la caída de tensión en esta zona es muy alta. De esta manera, esta zona da una importante contribución a las características del proceso de soldadura.

25 De acuerdo con otra realización preferida de la invención dicho medio está adaptado para usar dicho modelo teórico que tiene la parte de la región de arco del proceso de soldadura representada por separado por uno de dichos componentes del modelo en el modelo de circuito eléctrico. Mediante dicho dispositivo y particularmente junto con una realización de la invención en la que el medio se adapta para usar dicho modelo teórico que tiene información obtenida a través de cálculos a partir de un modelo físico de la parte de la región de columna del arco del proceso de soldadura a usar para determinar dicho componente del modelo que representa la parte de la región de arco, se obtiene información importante tal como la temperatura media del arco, la temperatura cerca del cable, la temperatura cerca de la pieza de trabajo, el radio del arco y características de corriente-tensión del arco también es posible tener en cuenta las propiedades termofísicas de un gas de protección presente en la región de arco para determinar dicho al menos un parámetro de soldadura. De acuerdo con otra realización preferida de la invención, dicho medio está adaptado para usar dicho modelo teórico que tiene información obtenida a través de cálculos a partir del modelo físico de la parte de la región de interacción arco-cable y/o de la parte de la región de interacción arco-pieza de trabajo del proceso de soldadura que se usa para determinar dicho componente del modelo que representa la parte de la región de arco, obteniendo información importante porque es posible tener en cuenta factores importantes en el proceso de soldadura tales como la caída de tensión en la zona cerca del ánodo/cátodo y el flujo térmico del arco al ánodo/cátodo para determinar dicho al menos un valor del parámetro de soldadura. En la región de interacción arco-cable y en la región de interacción arco-pieza de trabajo del proceso de soldadura, están presentes altos gradientes de diferentes cantidades tales como temperatura y concentración de partículas y la caída de tensión en estas regiones es muy alta. De esta manera, estas regiones dan una contribución importante a las características del proceso de soldadura.

45 De acuerdo con otra realización preferida de la invención en la que dichos medios se adaptan para usar dicho componente del modelo determinado mediante dicho modelo físico que describe el arco mediante al menos una ecuación independiente de la extensión en el espacio del arco y particularmente junto con una realización de la invención en la que dicho medio está adaptado para usar dicho componente del modelo determinado mediante dicho modelo físico que describe el arco por dicha al menos una ecuación únicamente dependiente en el tiempo, el componente del modelo y de esta manera dicho al menos un valor del parámetro de soldadura puede determinarse rápidamente y con un tiempo computacional proporcionalmente corto que hace al dispositivo muy adecuado para usarlo en el control del equipo de soldadura por arco en línea.

55 De acuerdo con otra realización preferida de la invención dicho medio está adaptado para usar dicho modelo teórico que tiene una parte de la zona de la columna del arco del proceso de soldadura representada por separado por uno de dichos componentes del modelo en el modelo del circuito eléctrico. Mediante dicho dispositivo, junto con un modelo físico adecuado, se obtiene información importante tal como la temperatura media del arco, la temperatura cerca del cable, la temperatura cerca de la pieza de trabajo, el radio del arco y las características de corriente/tensión del arco, y también es posible, teniendo en cuenta propiedades termofísicas de un gas de protección presente en la zona de la columna del arco, determinar dicho al menos un parámetro de soldadura.

60 De acuerdo con otra realización preferida de la invención dicho medio está adaptado para usar dicho modelo teórico que tiene la parte de cable del proceso de soldadura representada por separado por uno de dichos componentes del modelo. Mediante dicho dispositivo junto con un modelo físico adecuado, se obtiene información importante tal como el modo de transferencia de metal, la frecuencia de inmersión, etc. y también es posible tener en cuenta las propiedades del material del cable para determinar el valor de dicho al menos un parámetro de soldadura.

65 De acuerdo con otra realización preferida de la invención dicho medio está adaptado para usar dicho modelo teórico que tiene la parte de la pieza de trabajo del proceso de soldadura representada por separado por uno de dichos

componentes del modelo. Mediante dicho dispositivo junto con un modelo físico adecuado, se obtiene información importante sobre las características de calidad tales como el perfil de la junta soldada, el perfil de penetración, etc. y también es posible tener en cuenta propiedades materiales de la pieza de trabajo para determinar el valor de dicho al menos un parámetro de soldadura.

5

La invención se refiere también a productos de programa de ordenador de acuerdo con las reivindicaciones adjuntas. Es obvio que los métodos de acuerdo con la invención definidos en el conjunto de reivindicaciones del método incluido son muy adecuados para realizar mediante instrucciones de programa desde un procesador que puede realizarse por un programa de ordenador.

10

Ventajas adicionales y características de los métodos y los dispositivos, los productos del programa del ordenador y los usos de los métodos resultan evidentes a partir de la siguiente descripción detallada y las otras reivindicaciones adjuntas en este documento.

### 15 **Breve descripción de los dibujos**

Con referencia a los dibujos adjuntos, a continuación se da una descripción de las realizaciones preferidas de la invención citadas como ejemplos.

20

En los dibujos:

La Figura 1 es una ilustración esquemática de un proceso de soldadura por arco,

25

La Figura 2 es una ilustración esquemática de la distribución de tensión en el hueco entre un cable y una pieza de trabajo en una operación de soldadura por arco,

La Figura 3 es una ilustración de un modelo de circuito eléctrico que representa un proceso de soldadura por arco,

30

La Figura 4 es una ilustración esquemática de un dispositivo de acuerdo con la invención y de aplicaciones de la invención.

La Figura 5 es un diagrama de bloques de un método de acuerdo con la invención.

35

La Figura 6 es un diagrama de bloques de otro método de acuerdo con la invención,

La Figura 7 es un diagrama de bloques de otro método de acuerdo con la invención,

La Figura 8 es una ilustración esquemática de un modelo físico del arco,

40

La Figura 9 es una ilustración de la geometría de un arco definido en un modelo físico,

La Figura 10 es una ilustración de un modelo físico de una región de interacción de cable-arco en un proceso de soldadura por arco,

45

La Figura 11 es una ilustración de un modelo físico de la región de interacción arco-pieza de trabajo en un proceso de soldadura por arco,

La Figura 12 es una ilustración del equilibrio de energía en la zona de ionización,

50

La Figura 13 muestra diferentes clases de parámetros de soldadura,

La Figura 14 es una definición esquemática para modelar una pieza de trabajo de una junta de filete horizontal-vertical por soldadura por arco con metal gaseoso,

55

La Figura 15 muestra un ejemplo de un modelo de regresión no lineal y

Las Figuras 16 y 17 son modelos analíticos de la pieza de trabajo.

### 60 **Descripción detallada de las realizaciones preferidas de la invención**

En esta solicitud, la expresión "proceso de soldadura" se usa como un término genérico de las partes principales incluidas en una operación de soldadura por arco y de los procesos físicos asociados con el mismo que tiene lugar cuando se genera un arco eléctrico entre un cable (ánodo) y una pieza de trabajo (cátodo).

65

En la Figura 1 se ilustra esquemáticamente un proceso de soldadura por arco. La fuente de energía 1 se conecta a un cable 2 y una pieza de trabajo 3 para crear un circuito eléctrico cerrado mediante un arco 4 generado en el hueco entre el cable 2 y la pieza de trabajo 3 con el fin de transferir material desde el cable 2 a la pieza de trabajo 3.

## ES 2 314 048 T3

El proceso de soldadura puede dividirse en las siguientes partes principales: parte de cable 5, parte de la región de arco 6 y parte de la pieza de trabajo 7. Adicionalmente, la parte de la región de arco 6 puede dividirse en subpartes, en concreto la parte de la región de interacción arco-cable 8, una parte de la zona de columna del arco 9 y una parte de la región de interacción arco-pieza de trabajo 10. Todas estas partes contribuyen a las características del proceso de soldadura y a una cierta caída de tensión en el circuito eléctrico.

Sin embargo, en las zonas del electrodo, es decir, en la parte de la región de interacción arco-cable 8 y la parte de la región de interacción arco-pieza de trabajo 10 del proceso de soldadura, la caída de tensión es muy alta comparada con la caída de tensión en la parte central del arco, es decir, en la parte de la región de columna del arco 9. En la Figura 2 se ilustra esquemáticamente la distribución de tensión a lo largo del arco o, en otras palabras, en el hueco entre el cable 2 y la pieza de trabajo 3. Se indica que la tensión cae mucho en las zonas cerca del cable y cerca de la pieza de trabajo. Esto significa que las zonas situadas cerca del cable y cerca de la pieza de trabajo son partes importantes en el proceso de soldadura y tienen una fuerte influencia sobre la junta soldada resultante de la operación de soldadura.

Adicionalmente, la distribución de tensión en el hueco es muy difícil de determinar midiendo directamente el arco mientras que la tensión cae debido a las resistencias e inductancias de los conductos 1 en el circuito y la propia fuente de energía 1 se determina fácilmente por medidas convencionales. De esta manera, hay necesidad de un modelo físico para describir los fenómenos del arco para predecir el comportamiento del proceso de soldadura. Sin embargo, como ya se ha indicado, el cable 2 y la pieza de trabajo 3 interactúan fuertemente con el arco 4 e influyen en el proceso de soldadura. De esta manera, se necesitan también buenos modelos físicos de estas partes para describir el proceso de soldadura en su totalidad.

La idea principal de la invención es obtener el valor de al menos un parámetro de soldadura mediante un modelo teórico y usar dicho al menos un parámetro de soldadura en una operación de un equipo de soldadura por arco y/o para estimular un proceso de soldadura por arco y/o para predecir la calidad de una soldadura obtenida a partir de una operación de soldadura. Esto se realiza dividiendo el proceso de soldadura en partes en un modelo teórico y dejando que cada una de estas partes del proceso de soldadura y los parámetros de soldadura asociados con las mismas se representen por un componente del modelo. Los componentes se ponen después en un modelo de circuito eléctrico junto con una fuente de energía del modelo con el fin de calcular al menos un parámetro del modelo de circuito eléctrico relacionado con dicho al menos un parámetro de soldadura del modelo de circuito eléctrico. Los componentes pueden ser componentes resistivos y/o inductivos, aunque pueden incluirse también otros elementos eléctricos distintos de resistores e inductores puros en el modelo de circuito eléctrico. Adicionalmente, los componentes del modelo pueden conectarse en serie y/o en paralelo.

En la Figura 3 se ilustra un ejemplo de un modelo de circuito eléctrico 12 que incluye componentes del modelo 13 y una fuente de energía del modelo 14. En este modelo de circuito eléctrico 12, la parte de cable 5 se representa por un resistor  $R_w$ , la parte de la pieza de trabajo 7 mediante un resistor  $R_{wp}$  y la parte de arco 6 se representa por un resistor  $R_a$ . Además de estas resistencias, es necesario definir una resistencia del modelo  $R_0$  y una inductancia del modelo  $L_0$  correspondiente a la resistencia e inductancia de la propia fuente de energía 1 y los cables 11 en el circuito de soldadura real. La resistencia del modelo de circuito  $R_0$  y la inductancia  $L_0$  son propiedades bien conocidas, o pueden elegirse, y para simplificación a continuación éstas se tratan como un solo componente  $(RL)_{rest}$ . (En este componente pueden incluirse también otras resistencias tales como resistencia de contacto entre el cable y la boquilla que sostiene el cable).

Aunque el modelo de circuito eléctrico 12 ilustrado en la Figura 3 comprende cuatro componentes diferentes:  $R_w$ ,  $R_{wp}$ ,  $R_a$  y  $(RL)_{rest}$ , de acuerdo con la invención el proceso de soldadura puede dividirse en dos o más partes, aunque al menos dos partes diferentes, de las cuales al menos una parte representa el arco o una parte del mismo presente en el proceso de soldadura. En el caso de los dos componentes de modelo separados 13 todas las resistencias en el circuito, con excepción de la resistencia  $R_a$  de la parte de la región de arco 6, se incluyen adecuadamente en  $(RL)_{rest}$ . Por supuesto, una mayor disolución, es decir más componentes del modelo 13 que representan diferentes partes en el proceso de soldadura, da una descripción más precisa del proceso de soldadura por arco y también la posibilidad de obtener información sobre más parámetros de soldadura y tener más características del proceso de soldadura en cuenta.

Sin embargo, también es posible usar dichos modelos físicos que representan subpartes de una parte del proceso de soldadura, la parte de la región de arco 6, por ejemplo que se basan en diferentes características de la parte en diferentes zonas, por ejemplo la región de interacción arco-cable 8, la zona de columna del arco 9 y/o la región de interacción de arco-pieza de trabajo 10 que da como resultado un componente del modelo común tal como la resistencia  $R_a$ . De esta manera diferentes partes del proceso de soldadura pueden describirse sin usar un componente del modelo diferente 13 para cada parte. Además es posible usar valores de entrada de otras partes del proceso de soldadura cuando se calcula el componente del modelo.

Usando las Leyes de Tensión de Kirchoff al menos un parámetro del modelo de circuito eléctrico puede calcularse a partir del modelo de circuito eléctrico 12. Por ejemplo si el suministro de tensión 14 y los otros componentes 13, la corriente puede calcularse o viceversa para una corriente dada puede calcularse un componente del modelo desconocido. Los componentes del modelo  $R_w$ ,  $R_a$  y  $R_{wp}$  en la Figura 3 y otros de estos componentes pueden calcularse a partir de uno o más de los modelos físicos del cable, el arco y la pieza de trabajo y de su interacción entre sí. A continuación, se dan ejemplos de modelos físicos.

## ES 2 314 048 T3

En la Figura 4 se ilustran esquemáticamente la invención y algunas de sus aplicaciones. El dispositivo de acuerdo con la invención comprende un equipo de soldadura por arco 21 para usar en una operación de soldadura para crear una junta soldada. El equipo de soldadura 21 se automatiza adecuadamente o es un equipo de soldadura de por arco robótico que puede ajustarse variando al menos un parámetro de soldadura, tal como la tensión de suministro, el caudal de gas de protección la velocidad de soldadura el ángulo del par de torsión, la extensión del cable, la velocidad de suministro del cable etc. Adicionalmente, el dispositivo incluye una disposición 22 para controlar el funcionamiento del equipo de soldadura por arco 21. La disposición de arco del control 22 comprende un medio 23, por ejemplo, un procesador y programas de ordenador y componentes eléctricos/circuitos del mismo adaptados para determinar el valor de dicho al menos un parámetro de soldadura mientras que se usa un modelo teórico 24 del proceso de soldadura y un miembro 25 por ejemplo cualquier clase de equipo de control que sea capaz de comunicar con el equipo de soldadura a dicho medio y de esta manera transferir una señal que representa el valor del parámetro de soldadura al equipo de soldadura, para ajustar el equipo de soldadura 21. El ajuste puede realizarse antes de la soldadura y/o en línea durante la soldadura. El medio 23 se adapta para usar dicho modelo teórico 24 que comprende al menos dos partes separadas 26, 27 de las cuales al menos una parte representa la parte de arco del mismo correspondiente a diferentes partes del proceso de soldadura. Cada parte del modelo 26, 27 está representada por un componente del modelo 13, véase también la Figura 3 y estos componentes de modelo 13 junto con la fuente de energía del modelo 14 se incluyen en el modelo de circuito eléctrico 12. El medio 23 está adaptado para calcular al menos un parámetro del modelo del circuito eléctrico 13 a partir del modelo de circuito eléctrico 12, y para usar el valor de este parámetro relacionado con dicho al menos un parámetro de soldadura, para dicho control del equipo de soldadura 21 mediante el ajuste de dicho al menos un parámetro de soldadura del proceso de soldadura mediante dicho miembro 25.

Como se indica en la Figura 4 el medio 23 puede usarse sin el miembro 25 y el equipo de soldadura por arco 21 para otros fines distintos de controlar directamente un equipo de soldadura por arco. De esta manera dicho medio puede usarse para simulación 28 de cualquier proceso de soldadura por arco y/o para predicción de la calidad 29 de una soldadura resultante de una operación de soldadura por arco.

Adicionalmente, dicho medio 23 y/o la disposición de control 22 pueden usarse para realizar cualquiera de los métodos descritos en este documento.

En la Figura 5 se ilustra un diagrama de bloques del método para controlar un equipo de soldadura por arco usado en una operación de soldadura y ajustable variando al menos un valor del parámetro de soldadura. El método comprende las etapas de determinar 30 dicho al menos un valor del parámetro de soldadura mientras que se usa 31 un modelo teórico del proceso de soldadura asociado con la operación de soldadura, controlar 32 la operación del equipo de soldadura y el proceso de soldadura asociado con el mismo usando dicho al menos un valor del parámetro de soldadura para ajustar el equipo de soldadura, cuando la determinación comprende las etapas de dividir 33 el proceso de soldadura en al menos dos partes diferentes de las cuales al menos una parte representa el arco o una parte del mismo, en el modelo teórico, representado 34 cada una de dichas al menos dos partes del proceso de soldadura y el parámetro/parámetros de soldadura asociados con el mismo mediante un componente del modelo, poniendo 35 los componentes del modelo y la fuente de energía del modelo en un modelo de circuito eléctrico y calculando 36 al menos un parámetro de modelo de circuito eléctrico relacionado con dicho al menos un parámetro de soldadura a partir del modelo de circuito eléctrico.

En la Figura 6 se ilustra un diagrama de bloques es el modelo para simular un proceso de soldadura por arco. El método comprende las etapas de introducir 40 datos en un modelo teórico que representa el proceso de soldadura, determinar 41 al menos un valor del parámetro de soldadura del proceso de soldadura mientras se usa 42 en el modelo teórico y los datos introducidos, con el fin de simular 43 el proceso de soldadura, donde la determinación comprende las etapas de dividir 44 el proceso de soldadura en al menos partes diferentes, de las cuales al menos una parte representa el arco o una parte del mismo en el modelo teórico que representando 45 cada uno de dichos términos dos partes del proceso de soldadura y el parámetro/parámetros de soldadura asociados con el mismo mediante un componente del modelo, poniendo 46 los componentes del modelo y una fuente de energía del modelo en un modelo de circuito eléctrico y calculando 47 al menos un parámetro del modelo de circuito eléctrico relacionado con dicho al menos un parámetro de soldadura del modelo de circuito eléctrico.

En la Figura 7 se ilustra un diagrama de bloques del método para predecir la calidad de una soldadura obtenida a partir de una operación de soldadura por arco. El método comprende las etapas de introducir 50 datos en un modelo teórico que representa el proceso de soldadura asociado con la operación de soldadura, determinar 51 al menos una propiedad de la soldadura relacionada con al menos un valor del parámetro de soldadura del proceso de soldadura mientras que se usa 52 el modelo teórico y los datos introducidos, donde la determinación comprende las etapas de dividir 53 el proceso de soldadura en al menos dos partes diferentes de las cuales al menos una parte representa el arco o una parte del mismo, en el modelo teórico, representando 54 cada una de dichas al menos dos partes del proceso de soldadura y el parámetro/parámetros de soldadura asociados con el mismo se representa mediante un componente del modelo, introducir 55 los componentes del modelo y la fuente de energía del modelo en un modelo de circuito eléctrico, y calculando 56 al menos un parámetro del modelo de circuito eléctrico relacionado con dicho al menos un parámetro de soldadura y relacionado con dicha al menos una propiedad de la soldadura, a partir del modelo de circuito eléctrico.

Los métodos pueden usarse para diferentes objetos tales como para predecir la formación de gota de metal en una operación de soldadura por arco para un conjunto dado de parámetros de soldadura, para predecir el modo de

## ES 2 314 048 T3

transferencia de metal en una operación de soldadura por arco para un conjunto dado de parámetros de soldadura, para calcular al menos un valor del parámetro de soldadura requerido para obtener un modo de transferencia de metal particular en una operación de soldadura y/o para calcular al menos un valor de ajuste de defecto para usar para ajustar un equipo de soldadura por arco automático antes de la soldadura. La predicción de la calidad puede usarse por ejemplo para predecir cualquier propiedad mecánica de una junta soldada para entradas dadas, es decir, ajuste de parámetros de soldadura, o en la dirección contraria para determinar uno o más valores del parámetro de soldadura para una entrada dada, es decir cualquier propiedad mecánica de una junta soldada. Una aplicación importante de los métodos y el dispositivo de acuerdo con la invención es la predicción de las características de un cierto proceso de soldadura como se ha mencionado anteriormente la predicción del modo de transferencia de metal presente durante la operación de soldadura por arco que hace posible predecir el modo de transferencia, la función de un cierto parámetro de soldadura tal como velocidad de suministro de cable o corriente y de esta manera predecir la zona de transición entre los denominados modos de arco corto y arco de pulverización.

En diferentes realizaciones de los métodos la etapa de dividir el proceso de soldadura puede incluir dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la región de interacción arco-cable y/o la parte de la región de arco y/o la parte de la región de columna del arco y/o la parte de cable y/o la parte de pieza de trabajo se representa por separado por uno de los componentes del modelo 13 en el modelo de circuito eléctrico 12. En las realizaciones de los métodos que usan un modelo de circuito eléctrico 12 de acuerdo con la Figura 3 dichos métodos comprenden las etapas de dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la región de arco 6, la parte de cable 5, la parte de pieza de trabajo 7 (y la parte correspondiente a  $(RL)_{rest}$ ) se representa cada una por separado por uno de dichos componentes del modelo 13 en el modelo del circuito eléctrico 12.

Adicionalmente, en una realización preferida descrita con más detalle a continuación, dicho componente del modelo  $R_a$  que representa la parte de la región de arco se determina mediante la información obtenida por el cálculo a partir de modelos físicos de la parte de la región de columna 9, la parte de la región de interacción arco-cable 8 y la parte de la región de interacción arco-pieza de trabajo 10.

En las Figuras 8, 9, 10 y 11 se ilustra esquemáticamente un ejemplo de modelo físico, incluyendo submodelos, basados en ecuaciones de energía, masa y momento. Como se indica en la Figura 8 el cable, el arco, la pieza de trabajo la interacción arco-cable y la interacción arco-pieza de trabajo se tienen en cuenta.

En la Figura 9 la columna del arco 60F se supone que es un conector cilíndrico con un diámetro medio 61 y una zona de transición de expansión 62 cerca del cable 63. En la Figura 10 la parte de la región de interacción arco-cable del proceso de soldadura se divide en una primera zona 64 más cerca del cable, denominada la zona de carga espacial y una zona 65 cerca de la columna del arco denominado la zona de ionización para describir las propiedades de las zonas a través de diferentes submodelos físicos. También la parte de la región de interacción arco-pieza de trabajo del proceso de soldadura en la Figura 11 se divide en una primera zona 66 más cerca de la pieza de trabajo, denominada zona de carga espacial y una segunda zona 67 más cerca de la columna del arco denominada zona de ionización para describir las propiedades de las zonas a través de diferentes submodelos físicos. A continuación sigue una descripción más detallada de los posibles modelos físicos que pueden usarse en relación con la invención.

### *Modelos físicos*

#### *Modelo de arco*

Como ya se ha mencionado el proceso de soldadura puede dividirse en partes diferentes y la parte de la región de arco puede dividirse en subpartes, en concreto la parte de la región de interacción arco-cable y la parte de la región de columna del arco y una parte de región de interacción de arco-pieza de trabajo. La columna del arco, descrita en este capítulo ocupa la mayor parte del espacio entre el cable y la pieza de trabajo. En esta zona, los gradientes de variables termodinámicas tales como temperatura y presión no son demasiado altos y el sistema está en equilibrio termodinámico local.

El modelo de arco sugerido aquí se basa en ecuaciones de energía masa y momento. La corriente de arco genera fuerzas de Lorentz que tienen un papel importante en el proceso de soldadura. El arco normalmente se contrae hacia la punta del cable. Esto hace subir el componente axial de la fuerza de Lorentz. El plasma por lo tanto se acelera hacia la pieza de trabajo. Las fuerzas electromagnéticas en el proceso de soldadura son importantes tanto para la estabilización del arco como para transferencia de material a la pieza de trabajo. Para poder predecir algunos fenómenos de los arcos de soldadura, se requieren las propiedades termo-físicas del gas de protección en el intervalo de temperatura 300-30000 Kelvin. Debido a las interacciones arco-cable y arco-pieza de trabajo, el gas de protección normalmente se contamina con vapores metálicos, lo que influye notablemente en las propiedades físicas del arco.

La estructura del modelo de arco propuesta en este documento se muestra en la Figura 8. Esta estructura da la posibilidad de considerar los efectos del gas de protección, el material de cable y el material de pieza de trabajo.

De acuerdo con el estado de la técnica, hoy en día se conoce una simulación bidimensional detallada del arco. Sin embargo, dicha simulación requiere un largo tiempo computacional. Se hace difícil usar dicha herramienta para controlar y monitorizar el proceso de soldadura por arco.

## ES 2 314 048 T3

En esta solicitud se propone, en lugar de ello, un modelo de arco rápido con la estructura ilustrada en la Figura 8 y 9. El modelo se basa en las siguientes consideraciones:

- 5 - el arco está en equilibrio termodinámico local,
- el arco se supone que es un conductor cilíndrico con una temperatura uniforme y un diámetro medio,
- se considera una zona de transición de expansión de arco entre el cable y la columna del arco,
- 10 - la temperatura media del arco y el diámetro se obtiene a partir del equilibrio de energía del arco y el principio mínimo de Steenbeck. Este principio se basa en la minimización de la pérdida de energía del arco,
- las propiedades termo-físicas se calculan en módulos diferentes y se acoplan al modelo de arco, y
- 15 - se tienen en cuenta la interacción arco-cable y la interacción arco-pieza de trabajo.

El equilibrio de energía del arco se da a continuación:

$$\begin{array}{ccccccc}
 20 & \frac{LI^2}{\sigma A} & + & (V_{an} + V_{ca})I & = & A\rho v(h - h_0) & + & ALU_{rad} & + & Q_{A-A} & + & Q_{A-C} \\
 & \text{Disipación} & & \text{Disipación debida} & & \text{Convección} & & \text{Radiación} & & \text{Transferencia de calor} & & \text{Transferencia de calor} \\
 & \text{en columna} & & \text{a caídas en ánodos} & & & & & & \text{arco-ánodo} & & \text{arco-cátodo} \\
 & \text{de arco} & & \text{y cátodos} & & & & & & & & \\
 25 & & & & & & & & & & & 
 \end{array}$$

donde L es la longitud de arco, I denota la corriente eléctrica,  $\sigma$  se refiere a la conductividad eléctrica, A es el área de la sección transversal de la columna del arco,  $V_{an}$  y  $V_{ca}$  son las caídas de tensión en la zona cerca del ánodo (cable) y en la zona cerca del cátodo (pieza de trabajo) respectivamente.  $\rho$  es la densidad de gas, h y  $h_0$  son las entalpías específicas del arco y los alrededores y  $U_{rad}$  es la densidad de radiación media todas las cuales son funciones de la temperatura del arco.  $v$  denota la velocidad media del gas. Los términos de transferencia de calor para arco-ánodo  $Q_{A-A}$  y arco-cátodo  $Q_{A-C}$  se obtienen a partir de modelos físicos detallados de las interacciones arco-cátodo y arco-ánodo.

Usando la ley de Ampere y la integración de las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo incompresible en la zona de expansión puede deducirse una ecuación sencilla para la velocidad media como

$$40 \quad v = C_a \frac{I}{\pi R_{arco}} \sqrt{\frac{C_b \mu_0 \left( \frac{R_{arco}^2}{R_{cable}^2} \right)}{2\rho}}$$

donde  $R_{arco}$  y  $R_{cable}$  son los radios de la columna del arco y cable respectivamente y  $\mu_0$  es la constante de campo magnético. Las constantes  $c_a$  y  $c_b$  dependen de los perfiles de densidad de corriente en el cable del ánodo y se derivará con la ayuda de simulación CFD y experimentos sencillos.

Las ecuaciones anteriores junto con la minimización de la pérdida de energía proporcionan toda la información necesaria tal como la temperatura media del arco, el radio del arco y las características de corriente-tensión del arco.

Los beneficios del modelo de arco propuestos son:

- 50 - el modelo de arco puede ejecutarse muy rápidamente y de esta manera puede usarse como parte de un programa informático para realizar la invención y por ejemplo puede usarse junto con un modelo para la interacción arco-cable de manera que la formación de gota y el transporte pueden predecirse.

### 55 *Modelo de Interacción arco-pieza de trabajo*

Cerca de los electrodos, están presentes altos gradientes de temperatura y concentración de partículas. Esto conduce a desviaciones del equilibrio térmico y químico. Se sabe bien que las caídas de tensión en la zona cerca del cable y en la zona cerca de la pieza de trabajo son muy altas y dependen de los materiales de electrodo y las propiedades de plasma de la columna del arco. Por lo tanto, es importante tener en cuenta las propiedades físicas de los fenómenos cerca de los electrodos para predecir un proceso de soldadura por arco. En esta sección, se presenta el modelo para la interacción entre el arco y la pieza de trabajo. El modelo se basa en lo siguiente:

- 65 - la zona cerca de la pieza de trabajo se divide en dos zonas: la zona de ionización y la zona de espacio de carga,
- las colisiones entre partícula son insignificantes en la zona de espacio de carga,

## ES 2 314 048 T3

- los electrones y partículas pesadas se consideran como dos fluidos con dos temperaturas diferentes,
- las densidades de iones y electrodos son iguales en la zona de ionización,
- 5 - las densidades de iones y electrones no son iguales en la zona del espacio de carga,
- el mecanismo de emisión de electrones es emisión de termo-campo, y
- las ecuaciones que describen las dos zonas se integran sobre las zonas.

10 Las entradas al modelo de la región de interacción de arco-pieza de trabajo son material de la pieza de trabajo y las propiedades de plasma en la zona de columna del arco (por ejemplo, temperatura y presión). Las salidas del modelo son la caída de tensión en la región de interacción arco-pieza de trabajo y el flujo térmico desde la pieza de trabajo al arco debido a las partículas cargadas. Adicionalmente, hay un flujo térmico conductivo debido a partículas neutras.

15 Estos datos son necesarios en el equilibrio de energía global de la columna del arco. El modelo se adapta de manera que puede acoplarse fácilmente al modelo de arco descrito anteriormente.

Los beneficios del modelo de interacción de arco-pieza de trabajo propuesto son:

- 20 - el modelo puede acoplarse al modelo de columna del arco y/o al modelo de la zona e interacción arco-cable y permite una descripción más completa del arco,
- el modelo da predicciones precisas del flujo térmico hacia la pieza de trabajo que es un factor importante que afecta a la calidad de la soldadura,
- 25 - el modelo predice la velocidad de vapores metálicos desde la pieza de trabajo
- el modelo puede ejecutarse muy rápidamente y de esta manera, puede no disminuir necesariamente la velocidad de una operación de soldadura cuando se usa el modelo para controlar una operación de soldadura por arco, y
- 30 - el modelo considera explícitamente las propiedades del material de la pieza de trabajo, como por ejemplo la función de trabajo y la conductividad térmica.

35 Para ilustrar la influencia del material de la pieza de trabajo sobre el proceso de soldadura por arco, se presenta a continuación un resumen de las características físicas.

El flujo de energía desde el plasma a la pieza de trabajo se da mediante:

$$40 \quad q = J_i \left[ k \left( 2T_i + \frac{T_i}{2} - 2T_w \right) + e(\phi_c + E_i - \phi_{ef}) \right] + J_e (2kT_e + e\phi_{ef}) - J_- (2kT_- + e\phi_{ef}) - q_w$$

45 Donde  $J_e$ ,  $J_{em}$  y  $J_i$  son la densidad de corriente de los electrones difundidos de vuelta al plasma, la densidad de corriente de electrones emitidos y la densidad de corriente de iones, respectivamente.  $T_w$ ,  $T_e$  y  $T_i$  indica la temperatura de la pared del cátodo, de los electrones e iones.  $\phi_c$  y  $E_i$  son la caída de tensión en la zona de espacio de carga y la densidad de ionización de gas.  $\phi_{ef}$  es la función de trabajo eficaz que se define como la diferencia entre la energía media de los electrones dentro del metal y la energía media de los electrones emitidos justo fuera del metal.  $q_{vap}$  es el flujo de energía sacador por vaporización.

50 El equilibrio de energía en la zona de ionización puede resumirse como se muestra en la Figura 12. Esta figura muestra que una parte de la densidad de energía total, el efecto Joule, recibido por el gas de electrones se transfiere a las partículas pesadas mediante colisiones elásticas e inelásticas. La otra parte de la energía se pierde por radiación y por el flujo térmico a las paredes frías. De acuerdo con investigaciones anteriores de la zona de ionización las pérdidas principales de energía electrónica se deben a ionización. Basándose en estos resultados, las pérdidas de energía debida a las colisiones elásticas pueden hacerse insignificantes. El equilibrio de energía se simplifica por integración sobre la zona:

$$60 \quad -J_- (2kT_- + e\phi_c) + \text{Efecto Joule} = J_e (2kT_e + e\phi_c) + e J_i E + 3,2kT_e$$

65 El primer término en el lado izquierdo es el flujo de los electrones que se lleva a la zona de ionización por los electrones emitidos acelerados en la zona del espacio de carga. El segundo término en el lado izquierdo presenta el trabajo del campo eléctrico sobre los electrones dentro de la zona de ionización. El primer término en el lado derecho es el flujo de energía llevado por los electrones que dejan la ionización para la zona de espacio de carga.  $eJ_i E$  son las

## ES 2 314 048 T3

pérdidas de energía de electrones debido a ionización. Finalmente, el último término en el lado derecho es el flujo de energía llevado por los electrones que salen de la zona de ionización para la columna del arco.

5 Para poder predecir el comportamiento de la zona del cátodo, se requieren las densidades de corriente  $J_e$ ,  $J_{em}$  y  $J_i$ . Estas densidades de corriente se obtienen mediante la cinética detallada de partículas en la zona del espacio de carga. Aquí únicamente se dan los resultados.

La densidad de corriente de iones y la densidad de corriente de electrones contra-difundidos se dan mediante

10

$$J_i = n_{i0} e \sqrt{\frac{k(T_i + T_e)}{m_i}}$$

15

$$J_e = \frac{n_{e0} e}{4} \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e}} \exp\left(-\frac{e\phi_c}{kT_e}\right)$$

20

De acuerdo con el mecanismo de emisión de campo termiónico, la densidad de corriente de electrones transmitidos se da mediante la ecuación de Richardson-Dushman con la corrección de Schottky

25

$$J_{-} = \frac{4\pi k^2 e m_e T_e^2}{h^3} \exp\left(\frac{e\phi_{ef}}{kT_e}\right)$$

30

En la ecuación anterior,  $h$  y  $m_e$  son las constantes de Planck y la masa de electrón, respectivamente. La función de trabajo eficaz está relacionada con el campo eléctrico de acuerdo con:

35

$$\phi_{ef} = \phi_0 - \sqrt{\frac{eE_c}{4\pi\epsilon}}$$

40

donde  $\phi_0$ ,  $\epsilon$  y  $E_c$  son la función de trabajo del material de la pieza de trabajo, la constante dieléctrica y la resistencia del campo eléctrico en la pared del cátodo.

45 Las densidades de electrón e ión en el borde de la zona del espacio de carga pueden calcularse con buena aproximación como:

50

$$n_{i0} \approx n_{e0} = n_{plasma} \frac{0,8}{2 + \alpha}$$

55 donde

60

$$\alpha = \left( \frac{kT_i}{m_i D_{i0} K_r n_{eq}^2} \right)^{1/2}$$

$D_{i0}$  y  $K_r$  son el coeficiente de difusión ión-neutro en la parte superior del límite del equilibrio y la velocidad de recombinación.

65

El conjunto de ecuaciones presentado es cerrado y puede resolverse fácilmente para predecir las propiedades de la zona de cátodo o las propiedades de la región de interacción arco-pieza de trabajo en el proceso de soldadura por arco.

*Modelo de la región de interacción arco-cable*

En esta sección se presenta el modelo para la interacción entre el arco y el cable (zona del ánodo). El modelo se basa en lo siguiente:

- la zona cerca del cable se divide en dos zonas: la zona de ionización y la zona de espacio de carga,
- las colisiones entre las partículas son insignificantes en la zona del espacio de carga,
- los electrones y partículas pesadas se consideran como dos fluidos con dos temperaturas diferentes,
- las densidades de iones son mucho menores que las densidades de electrones en la zona del espacio de carga,
- la temperatura de los electrones permanece constante a través de la zona del ánodo,
- la caída de tensión en la zona de ionización es insignificante, y
- se supone que no hay emisión de electrones desde el cable.

Las entradas al modelo de la región de interacción arco-cable son las propiedades del material de cable y del plasma en la zona de la columna del arco (por ejemplo, temperatura y presión). Las salidas del modelo son la caída de tensión en la región de interacción arco-cable y el flujo térmico desde el arco al cable debido a partículas cargadas. Estos datos son necesarios en el balance de energía global de la columna del arco. El modelo se adapta de manera que puede acoplarse fácilmente al modelo de arco descrito anteriormente.

Los beneficios del modelo de interacción arco-cable propuestos son:

- el modelo puede acoplarse al modelo de columna del arco y/o el modelo de la región de interacción arco-pieza de trabajo permite una descripción más completa del arco,
- el modelo da predicciones precisas del flujo térmico hacia el cable que es un factor importante para describir el proceso de soldadura,
- el modelo puede ejecutarse muy rápidamente y de esta manera por ejemplo no es necesario disminuir la velocidad de una operación de soldadura cuando se usa el modelo para controlar una operación de soldadura por arco, y
- el modelo considera explícitamente las propiedades del material de cable, por ejemplo en la función de trabajo.

Para ilustrar la influencia del cable sobre el proceso de soldadura por arco, a continuación se presenta un resumen de las propiedades físicas.

El flujo de energía total desde el plasma al cable será mediante las pérdidas desde el arco debido a partículas cargadas, conducción térmica y radiación menos la energía térmica utilizada para evaporación y radiación de la superficie de la punta del cable.

$$\dot{Q} = \underbrace{\dot{Q}_{ct} + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{rad}}_{\text{flujo de energía desde el arco}} - \underbrace{\dot{Q}_{ev,cable} - \dot{Q}_{rad,cable}}_{\text{flujo de energía desde la superficie de la punta del cable}}$$

Para el flujo de energía de partículas cargadas, se consideran únicamente electrones ya que el flujo de la densidad de corriente de iones en la región de interacción arco-cable es baja comparada con el flujo de densidad de corriente de electrones

$$\dot{Q}_d = j_e \left( \frac{5k_b}{2e} T_e + V_{an} + \phi \right)$$

Hay un flujo de energía debido a la energía térmica de electrones, energía cinética de electrones resultante de la aceleración en el campo eléctrico y energía potencial de electrones después de la transformación de fase en la superficie del cable (sin unión).  $j_e$  es la densidad de corriente de los electrones y  $T_e$  es la temperatura del electrón en la región de interacción arco-cable. La temperatura del electrón se toma como la temperatura media del núcleo de arco proporcionada por el modelo de arco.  $\phi$  es la función de trabajo nominal de la superficie de cable (conocida) y  $V_{an}$  es la caída de tensión en la zona de ánodo que consiste principalmente en la caída de tensión en la zona del espacio de carga.

## ES 2 314 048 T3

$$V_{an} = \varphi_{an}$$

donde  $j_e$  se obtiene a partir de la cinética

$$j_e = j_e(n_e, \varphi_{an})$$

donde  $n_e$  es la densidad de electrones en la zona del ánodo y se calcula usando la ecuación de estado, leyes de equilibrio termodinámico y las propiedades termodinámicas del arco (temperatura, presión).

Para obtener la caída de tensión en la región de interacción arco-cable se tiene en cuenta la densidad de corriente ión  $j_i$ . La siguiente relación puede derivarse de la cinética

$$j_i = j_i(n_i, \varphi_{an})$$

donde  $n_i$  es la densidad de iones en la zona de ionización que equivalente a la densidad de electrones  $n_e$ . Conociendo la densidad de corriente total  $j$

$$j = j_e + j_i$$

puede obtenerse la caída de tensión en la región de interacción arco-cable.

La conducción térmica a partir del arco resulta del gradiente de temperatura en la zona de ánodo que actúa sobre iones y los flujos de calor debido a la energía cinética de iones y electrones en la región de interacción arco-cable.

$$\dot{Q}_{cond} = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} + n_i v_i h_i + n_e v_e h_e$$

donde  $v_i$  y  $v_e$  son las velocidades de iones y electrones respectivamente que se dan mediante la cinética en el equilibrio termodinámico.

La energía de radiación desde el arco es la fracción de la energía radiada totalmente por el arco que alcanza la superficie de la punta del cable.

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon_{ef} \sigma T_{arco}^4$$

Donde  $\epsilon_{ef}$  es un coeficiente de emisión eficaz del arco que puede estimarse a partir del coeficiente de emisión de la columna del arco suponiendo un cilindro, los tiempos de la fracción de la superficie del cilindro dirigidos hacia el cable.

El flujo de energía debido a evaporación de la superficie de la punta del cable será mediante el producto de la velocidad de evaporación y el calor latente del material de cable

$$\dot{Q}_{ev,cable} = \dot{m} \Delta h$$

donde la velocidad de evaporación puede expresarse como una función de la presión de la columna del arco y la temperatura de la superficie de la punta del cable.

$$\dot{m} = \dot{m}(P, T_{an})$$

El flujo de energía debido a radiación desde la superficie de la punta del cable será mediante

$$\dot{Q}_{rad,cable} = \epsilon \sigma T_{an}^4$$

## ES 2 314 048 T3

La única incógnita restante es la temperatura de la superficie de la punta del cable  $T_{ans}$ . Esta temperatura puede obtenerse a partir del modelo de cable. Una estimación sencilla es que es igual a la temperatura de fusión del material de cable.

- 5 El conjunto de ecuaciones presentado anteriormente es cerrado y puede resolverse para predecir las propiedades de la zona del ánodo o las propiedades de la región de interacción arco-cable en el proceso de soldadura por arco.

### *Modelo de cable*

- 10 En el proceso de soldadura por arco, la transferencia de calor desde el arco al cable provoca la formación rápida de gotas en la punta del cable. El impacto de las gotas separadas y transferidas a través del arco a la pieza de trabajo puede dar como resultado deformaciones de volumen y la alteración de las propiedades mecánicas de la soldadura. A continuación, se sugiere un modelo para predecir la transferencia de masa, calor y momento desde las gotas que gotean hacia la pieza de trabajo.

- 15 La forma del metal fundido en la punta del cable está influida por fuerzas dependientes del tiempo tales como gravedad, inercia, tensión superficial, fuerza electromagnética, el efecto de la presión del arco, el empuje viscoso por el flujo de gas. Una descripción extensiva de los fenómenos termo-físicos implicados en los mecanismos de formación de gotas puede formularse con precisión con herramientas informáticas 2D en un análisis detallado de las interacciones plasma-electrodo en condiciones de equilibrio termodinámico local del plasma y flujo laminar en el dominio de cálculo. Sin embargo, los cálculos requeridos para estas operaciones pueden consumir tiempo y no ser aceptables en un programa de interfaz de usuario para usar para controlar y/o monitorizar la calidad de una soldadura en una operación de soldadura.

- 25 Un enfoque simplificado del problema puede ser considerar el equilibrio de energía unidimensional de un cable dominado por los efectos de evaporación, transferencia de metales del cable, calentamiento óhmico en el cable mediante la corriente del arco y la transferencia de corriente del plasma. En un modo de estado casi estacionario, el balance de energía total del cable puede escribirse como:

$$30 \quad E_v + E_m = E_{oh} + E_e$$

- 35 donde los procesos de transferencia de calor para valores integrados sobre el volumen total del cable que sobresale se definen como:

$$40 \quad E_v = \int_S q_{ev} L dS$$

debido a la evaporación desde la superficie de la punta del cable;

$$45 \quad E_m = \rho v_0 S_c \int_{T=300}^{T_{media}} C_p dT$$

las pérdidas de calor debido a transferencia de metal en forma de gotas que se separan de las puntas del cable;

$$50 \quad E_{oh} = \int_V \frac{j^2}{\sigma} dv$$

- 55 el calentamiento en el cable por la corriente de arco, y

$$60 \quad E_e = \int_S \left[ j_i \left( V_i - v_i + \frac{5k_b}{2e} T \right) + j_o \left( \phi + \frac{5k_b}{2e} T_p \right) \right] dS$$

- 65 el calor transferido desde el plasma a la gota en la punta del cable. En las relaciones anteriores,  $V_w$  es el volumen total de cable que sobresale,  $S$  es la superficie externa total de cable y  $S_c = \pi r^2$  es el área de la sección transversal del cable en el extremo del cable en  $z=0$  ( $T=300$ -K) y  $r$  es su radio. Las cantidades  $C_p$ ,  $\kappa$  y  $\rho$  son el calor específico,

## ES 2 314 048 T3

la conductividad térmica y la densidad del material de cable en la temperatura de cable local, respectivamente.  $T_{media}$  es la temperatura media de la gota en el momento de la separación y  $v_0$  es la velocidad de suministro de cable. La velocidad de evaporación en gramos/segundo en la punta del cable se denota como  $q_{ev} = P_{ev} m_a / 4(m_a k_b T_a / 3)^{0.5}$  donde  $P_{ev}$  y  $m_a$  son la presión de vapor y la masa atómica del cable respectivamente mientras que  $k_b$  es la constante de Boltzmann y  $T_a$  la temperatura de la superficie del cable. Otros símbolos son los siguientes:  $L$ , el calor latente de evaporación del material de cable,  $e$  la carga elemental,  $j_i$  la densidad de corriente de iones del plasma,  $j_e$  la densidad de corriente de electrones del plasma; la densidad de corriente total se denota  $j$ ;  $T_p$  es la temperatura inmediatamente delante del cable,  $\phi$  es la función de trabajo nominal de la superficie del cable;  $\sigma$  representa la conductividad eléctrica,  $V_i$  es el primer potencial de ionización del gas de plasma y  $V_s$  es la caída de tensión a través de la protección en la región del cable.

En esta aproximación, la conducción de calor convencional desde el plasma a través de las partículas neutras, la conducción a través del extremo del cable y la radiación de cuerpo negro se hacen insignificantes debido a que puede demostrarse teóricamente que su efecto es pequeño comparado con  $E_v$ ,  $E_m$ ,  $E_{oh}$  y  $E_e$ .

El calor transferido desde el plasma al cable puede expresarse en la ecuación

$$S_a = j_i \left( V_i - V_s + \frac{5k_b}{2e} T_i \right) + j_e \left( \phi + \frac{5k_b}{2e} T_p \right) - q_{ev} L$$

Resolviendo la ecuación de conservación de energía dependiente del tiempo en pequeñas etapas temporales,

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho v_0 \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{5k_b}{2e} \left( \frac{j_z}{C_p} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{j^2}{\sigma} + F$$

donde  $F$  es un término que se refiere a la entrada de calor  $S_a$ ; desde el plasma el perfil de temperatura del cable puede obtenerse, y por lo tanto la longitud fundida en la punta del cable puede estimarse como una función del tiempo.

La transferencia de metal en forma de gota ocurrirá cuando el cable fundido alcanza una longitud crítica  $L_{crit}$  para un conjunto dado de parámetros de soldadura. La estimación del volumen de gota puede deducirse de un tratamiento dinámico en la región del cable usando expresiones simplificadas de las tensiones superficiales, fuerzas electromagnéticas, gravedad, presión de arco y fuerza de empuje viscoso alrededor del metal fundido en la punta del cable en cada etapa del tiempo.

La forma inicial del electrodo en el momento  $t=0$  puede tomarse como cilíndrica con un diámetro igual al del cable cubierto por aproximadamente una capa de 0,1 cm de espesor de líquido fundido en la punta del cable. Las condiciones iniciales deben corresponder con un arco que funciona con un cable que se mueve continuamente de forma cilíndrica no deformada.

Las entradas requeridas para el modelo de cable son la corriente de arco, la velocidad de suministro de cable, el diámetro de cable, la distancia de separación del electrodo inicial, el ángulo de antorcha y las características del arco. Esto último puede suministrarse al modelo mediante las salidas desde el modelo de arco.

Las salidas incluyen la frecuencia de separación, el volumen de una gota separada del metal fundido, la temperatura media en la gota y la aceleración soportada por la gota en el eje de columna del arco en la separación. Este resultado proporciona la información para la evaluación del refuerzo de la junta para un proceso de soldadura por arco con gas dada y una geometría de pieza de trabajo. También está disponible a partir del modelo la longitud de lo que sobresale del cable y la resistencia, que permite un cálculo más preciso de la longitud de arco que desde el modelo simplificado descrito a continuación.

Como una primera etapa un modelo simplificado para el cable se ha usado. La longitud de arco se obtiene a partir de un equilibrio entre la velocidad de suministro de cable  $w_f$  y la velocidad de fusión de cable

$$\frac{d}{dt} \left( L + \tau \frac{dL}{dt} \right) = -w_f + \frac{I^2 R_m + I \Delta V}{\Delta H}$$

## ES 2 314 048 T3

donde  $\tau$  es una constante de tiempo que retrasa el cambio de la longitud de arco respecto al cable de la entrada de calor. La resistencia del cable que sobresale  $R_{an}$  se calcula suponiendo una temperatura constante de la parte que sobresale

$$R_{an} = \frac{\zeta}{A_w} (D - L)$$

donde  $\zeta$  es la resistividad eléctrica del cable,  $R_{an}$  el área de la sección transversal del cable de la distancia entre la boquilla y la pieza de trabajo.  $L$  es la longitud de arco que es la salida de este modelo.

La entrada de la energía considera tanto el calentamiento óhmico del cable que sobresale como la transferencia de energía del arco al cable. La velocidad de fusión del cable se obtiene relacionando la entrada de energía con la entalpía del cable por unidad de longitud  $\delta H$ . Esto último tiene en cuenta la energía liberada debido a la absorción de electrones en ánodo y energía térmica soportada por los electrones

$$\delta V = \phi_{an} + \frac{5k_B T_e}{2e}$$

donde  $\phi_{an}$  es la función de trabajo de un material de ánodo,  $k_B$  es la constante de Boltzmann,  $T_e$  es la temperatura del electrón y  $e$  es la carga de electrón.

### *Modelo de la pieza de trabajo*

Como parte del proceso multivariable, la soldadura por arco automatizada puede definirse por los denominados parámetros de soldadura indirectos (IWP), que actúan sobre un conjunto de parámetros de material (MP) con un conjunto resultante de parámetros de soldadura directos (DWP). Los IWP deben elegirse apropiadamente para los MP dados. Los DWP deben fijarse explícitamente por especificaciones de por ejemplo anchura de perla de soldadura óptima penetración y apariencia.

Un aspecto básico a considerar respecto al control para soldadura por arco es determinar lo que se debe controlar y qué parámetros son accesibles para acciones de control en el proceso. Véase las Figuras 13 y 14.

Las funcionalidades de control de calidad a implementar en el programa informático propuesto podrían consistir en:

- control de la estabilidad de proceso, es decir, seguimiento a alta velocidad por ejemplo análisis estadístico de dominio temporal basado en IWP medios medidos y predichos por ejemplo tensión de arco o intensidad de corriente. Puede permitir la detección de entradas de alteración (anomalías en la distancia de pistola a pieza de trabajo, envoltura insuficiente con gas de protección, etc.). Ventajosamente, los detectores de visión y las sondas de sonido pueden usarse también,

- aseguramiento de calidad de la geometría y propiedades mecánicas de las juntas soldadas (DWP) por parámetros de proceso que se ajustan desde modelos físicos avanzados rápidos sobre MP e IWP. Los modelos pueden incluir interacciones detalladas arco-pieza de trabajo desde los fenómenos de agrupación de soldadura (eficacia de arco, goteo de gota, difusión de gas e impurezas, etc.) y criterios microestructurales (microfases, tensiones residuales, dislocaciones, etc.).

En la Figura 17 se ilustra un modelo de pieza de trabajo. En la práctica, el modelado de las propiedades de soldadura a menudo se basa en redes neurales entrenadas para una geometría particular de juntas. Las redes neurales son modelos de regresión no lineal parametrizadas, véase la Figura 14. Pueden proporcionar soluciones adaptadas para el tratamiento de sistemas multivariables intrincados cuando los modelos físicos son difíciles de establecer o no existen. También un programa que usa redes neurales debe incluir transferencia de masa, calor y momento desde el arco y goteo de gotas hacia la pieza de trabajo. De hecho, estas cantidades pueden tener consecuencias considerables sobre la geometría global de la soldadura y su calidad intrínseca. Un componente importante en la elaboración de una red neural es el control de las magnitudes características de los pesos (obsérvese  $w_j^{(i)}$  en la Figura 15) de los parámetros de entrada. Esta operación requiere que la red se entrene preliminarmente a partir de un conjunto de salidas conocidas cuando los pesos se cambian sistemáticamente hasta que se obtiene una descripción de la red como una función de las entradas. Entre otras posibilidades para modelar la pieza de trabajo, un programa de red neural puede entrenarse sobre las juntas de gravedad obtenidas en las condiciones especificadas (acero de bajo contenido en carbono, gas de protección, velocidad de cable, velocidad de suministro de cable, espesor de la placa, etc.) mediante un robot de soldadura por arco.

## ES 2 314 048 T3

La solidificación del fundido durante el proceso de soldadura GMA depende de las condiciones o transferencia de calor en la agrupación de soldadura, véase la Figura 16. El mecanismo de fusión y las características de la soldadura resultantes son complejas para modelar analíticamente. Las redes neurales pueden representar una alternativa adecuada para un modelo de una pieza de trabajo.

La forma y propiedades mecánicas de las soldaduras pueden verse afectadas fuertemente por las fuerzas electromagnéticas, fuerzas de flotación y fuerzas de tensión superficial que inducen el flujo de metal fundido en la agrupación de soldadura posiblemente afectada por impactos de gotas, vaporización, presión de arco y contaminación molecular. Las predicciones suficientemente precisas de la calidad de la soldadura por el modelo analítico de estos fenómenos pueden ser difíciles de proporcionar puesto que exigen el cálculo detallado y rutinas de cálculo optimizadas incluyendo métodos numéricos apropiados para mover los sistemas de límite.

Las redes neurales son modelos de regresión no lineal parametrizados potentes para los que no se requiere un conocimiento fundamental del sistema a modelar. Pueden describirse generalmente como una serie de variables ponderadas (parámetros de entrada  $x_i$ )

$$y_j = \sum_i w_i^{(1)} x_i + \theta^{(1)}$$

a partir de argumentos de funciones de transferencia de regresión no lineal (variables ocultas).

Ejemplo

$$h_j = \tanh y_j$$

Como un modelo de una unidad oculta ( $h_j = h$ ,  $y = w^{(2)}H + \theta^{(2)}$  parámetro oculto) puede que no sea suficientemente flexible, pueden introducirse grados adicionales de no linealidad combinando diversas funciones de transferencia de regresión no lineal (parámetro de salida  $y$ )

$$y = \sum_j w_j^{(2)} h_j + \theta^{(2)}$$

permitiendo de esta manera que las redes neurales capturen relaciones no lineales casi arbitrariamente. La capacidad de las redes neurales para manipular la complejidad está relacionada en gran medida con el número de funciones de transferencia de regresión, es decir, el número de capas ocultas. Un componente importante en la elaboración de una red neural es el control de las magnitudes características de los pesos ( $w_i^{(1)}$ ) de las cantidades introducidas. Esta operación requiere que la red se entrene preliminarmente a partir de un conjunto de salidas cuando los pesos se cambian sistemáticamente hasta que se tiene una descripción del mejor ajuste de la red en función de las entradas. Los procedimientos numéricos pueden desarrollarse para evitar dificultades de sobreajuste. En algunos casos, las estimaciones de error pueden calcularse también para definir la incertidumbre de ajuste considerando distribuciones de probabilidad de conjuntos de pesos en lugar de usar uno solo.

Puede producirse una red neural para modelos que afectan a las transferencias de calor y masa sobre la geometría de la soldadura como parte de un programa informático de usuario final de soldadura por arco. Sin embargo, como ya se ha mencionado, muchos parámetros experimentales pueden influir en un proceso de soldadura por arco (por ejemplo, propiedades de cable, propiedades del gas de protección, suministro de energía, velocidad de suministro de cable, velocidad de soldadura, extensión del electrodo, etc. véase la figura). Una investigación sistemática de simplemente 10 parámetros solo a 3 niveles de variación daría como resultado  $3^{10}$ , es decir, aproximadamente  $59 \cdot 10^3$  posibles combinaciones que explorar. El conocimiento teórico del arco sugiere que la corriente de arco, la velocidad de soldadura y las propiedades del material son principalmente responsables de la transferencia de calor y masa hacia la pieza de trabajo. Un proceso GMAW puede descomponerse en módulos interdependientes en diferentes para respectivamente el circuito eléctrico, el cable (ánodo), el arco, para las interacciones entre el arco y el cable (es decir, la formación de gotas), las interacciones entre el arco y la pieza de trabajo y la propia pieza de trabajo (cátodo). La cantidad de soldaduras a producir para hacer un modelo de red neural de la pieza de trabajo por lo tanto puede reducirse a un número razonablemente pequeño comparando sucesivamente los resultados del modelo para los diversos módulos con unos pocos casos de ensayo experimental característicos de la funcionalidad del módulo ensayado, fijándose todos los parámetros críticos de otros módulos en otros aspectos. Para este fin, resistencias internas, inductancias y resistencias sobre el equipo de soldadura a usar para los experimentos deben medirse de antemano y registrarse las señales de proceso durante la soldadura (por ejemplo, corriente y tensión de arco, señal de codificación del sistema de suministro del cable, etc.) deben realizarse con una unidad de adquisición. La validación en el módulo para el circuito eléctrico puede conseguirse comparando la corriente de arco medida y la tensión con los valores predichos de estas cantidades a diferentes velocidades de suministro de cables y tensiones de suministro para diferentes modos de soldadura (arco

## ES 2 314 048 T3

corto, pulverización, arco rápido), manteniéndose constantes todos los demás parámetros entre los modelos y experimentos en otros aspectos. La validación del modelo de cable para simulación del modo de transferencia de masa (goteo de gota) puede conseguirse de una manera similar midiendo adicionalmente la velocidad de transferencia de masa adicional para diversas dimensiones del diámetro de cable. La validación del modelo de arco puede conseguirse variando la tensión de suministro y la extensión del electrodo para diferentes gases de protección y diámetros de cable, manteniéndose todos los demás parámetros constantes. Los ajustes de cada modelo pueden implementarse por etapas durante la validación de cada módulo. Finalmente los experimentos pueden realizarse para modelar los efectos completos de la transferencia de masa y calor hacia la pieza de trabajo simplemente están afectados por la influencia de los ángulos de la antorcha y de empuje/arrastre, velocidad de soldadura, espesor de la placa, material de placa y configuración de la junta, todos los demás aspectos estando incluidos supuestamente en las otras rutinas validadas previamente. Para una aplicabilidad máxima del programa informático, los experimentos deben realizarse en diferentes juntas (por ejemplo, solapamiento, junta en T) hechas por ejemplo en una configuración horizontal-vertical de configuración de gravedad u otra dependiendo del mercado final del programa informático.

Introducido desde los modelos dependientes de arco a un modelo de red neural de la pieza de trabajo, las distribuciones de temperatura de electrones e iones, intensidad de corriente debida a más especies y velocidad de evaporación en la superficie de la pieza de trabajo serán accesibles a partir de una matriz precalculada establecida con los modelos validados. Se hará referencia también a la masa, calor y velocidad de transferencia de gotas como entradas de la red neural a partir de predicciones obtenidas con el modelo validado para el cable.

La salida de la red neural debe permitir una determinación de la calidad de la soldadura como se define por la geometría y las propiedades mecánicas. Una versión completa del programa informático es incluir todos los posibles aspectos de calidad. Cuando la calidad se asocia con la forma de la soldadura, las salidas consistirán en dimensiones geométricas de las soldaduras. Un croquis de la geometría predicha de la soldadura se presentará o las dimensiones de acuerdo con la norma EN-25817 se mostrarán en la interfaz del usuario final. Cuando la calidad está asociada con las propiedades mecánicas, las salidas consistirán en valores predichos de, por ejemplo, resistencia a deformación, resistencia a tracción final, tenacidad Charpy y fragilidad.

## ES 2 314 048 T3

### REIVINDICACIONES

- 5 1. Un método para controlar el equipo de soldadura por arco usado en una operación de soldadura y ajustable variando al menos un valor del parámetro de soldadura que comprende:
- determinar (30) dicho al menos un valor del parámetro de soldadura mientras se usa (31) un modelo teórico del proceso de soldadura asociado con la operación de soldadura,
  - 10 - dividir (33) el proceso de soldadura en al menos dos partes separadas de las cuales al menos una parte representa el arco o una parte del mismo, en el modelo teórico,
  - representar (34) cada una de dichas al menos dos partes del proceso de soldadura y el parámetro/parámetros de soldadura asociados con el mismo mediante un componente del modelo,
  - 15 - poner (35) los componentes del modelo y la fuente de energía del modelo en un modelo de circuito eléctrico y
  - calcular (36) al menos un valor del parámetro del modelo de circuito eléctrico relacionado con dicho al menos un parámetro de soldadura a partir del modelo de circuito eléctrico.
  - 20
2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 que comprende controlar (32) la operación del equipo de soldadura y el proceso de soldadura asociado con el mismo usando dicho al menos un valor del parámetro de soldadura para ajustar el equipo de soldadura.
- 25 3. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2 que comprende:
- introducir (40) datos en un modelo teórico que representa el proceso de soldadura,
  - determinar (41) al menos un valor del parámetro de soldadura del proceso de soldadura mientras que se usa (42) el modelo teórico y los datos introducidos con el fin de simular (43) el proceso de soldadura.
  - 30
4. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-3 que comprende:
- introducir (50) datos en un modelo teórico que representa el proceso de soldadura asociado con la operación de soldadura,
  - 35 - determinar (51) al menos una propiedad de la soldadura relacionada con al menos un parámetro de soldadura del proceso de soldadura mientras que se usa un modelo teórico y los datos introducidos con el fin de predecir la calidad de una soldadura obtenida a partir de la operación de soldadura por arco.
  - 40
5. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-4 que comprende:
- dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la región de interacción arco-cable (18) del proceso de soldadura está representada por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo del circuito eléctrico (12).
  - 45
6. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-5 que comprende:
- dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la región de interacción arco-pieza de trabajo (10) del proceso de soldadura se representa por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo del circuito eléctrico (12).
  - 50
7. Un método con cualquiera de las reivindicaciones 1-4 que comprende:
- dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la región de interacción arco-cable (8) del proceso de soldadura se representa por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo de circuito eléctrico (12) y/o
  - 55 - dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la región de interacción arco-pieza de trabajo (10) del proceso de soldadura se representa por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo de circuito eléctrico (12).
  - 60
8. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-7 que comprende:
- dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la región de arco (6) del proceso de soldadura se representa por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo de circuito eléctrico (12).
  - 65

## ES 2 314 048 T3

9. Un método de acuerdo con la reivindicación 8 que comprende:

5 - determinar dicho componente del modelo que representa la parte de la región de arco (6) mediante la información obtenida por cálculos a partir del modelo físico de la parte de la región de columna del arco (9) del proceso de soldadura.

10. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8-9 que comprende:

10 - determinar dicho componente del modelo que representa la parte de la región de arco (6) mediante la información obtenida por cálculos a partir de un modelo físico de la parte de la región de interacción arco-cable (8) del proceso de soldadura.

11. Un método de acuerdo con la reivindicación 5 o 10 que comprende:

15 - dividir la parte de la región de interacción arco-cable (8) del proceso de soldadura en una primera zona (64) cerca del cable y una segunda zona (65) cerca de la columna del arco para describir las propiedades de las zonas a través de diferentes submodelos físicos.

12. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8-10 que comprende:

20 - determinar dicho componente del modelo que representa la parte de la región de arco (6) mediante la información obtenida a través de cálculos a partir de un modelo físico de la parte de la región de interacción arco-pieza de trabajo (10) del proceso de soldadura.

13. Un método de acuerdo con cualquiera de la reivindicación 6 o 12 que comprende:

25 - dividir la parte de la región de interacción del arco-pieza de trabajo (10) del proceso de soldadura en una primera zona (66) cerca de la pieza de trabajo y una segunda zona (67) cerca de la columna del arco para describir las propiedades de las zonas a través de diferentes submodelos físicos.

30 14. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8, 9, 10 o 12 que comprende:

- determinar dicho componente del modelo que representa la parte de la región de arco (6) mediante dicho modelo físico que describe el arco mediante al menos una ecuación independiente de la extensión en el espacio del arco.

35 15. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 14 que comprende:

- determinar dicho componente del modelo que representa la parte de la región de arco (6) mediante dicho modelo físico que describe el arco mediante al menos una ecuación que depende únicamente del tiempo.

40 16. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-15 que comprende:

- dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la región de columna del arco (9) del proceso de soldadura se representa por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo de circuito eléctrico (12).

45 17. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-16 que comprende:

- dividir el proceso de soldadura de manera que la parte del cable (5) del proceso de soldadura se representa por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo de circuito eléctrico (12).

50 18. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-17 **caracterizado** porque comprende la etapa de:

55 - dividir el proceso de soldadura de manera que la parte de la pieza de trabajo (7) del proceso de soldadura se representa por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo del circuito eléctrico (12).

19. Un dispositivo que comprende un equipo de soldadura por arco (21) usado en una operación de soldadura y ajustable variando al menos un parámetro de soldadura y una disposición (22) para controlar el funcionamiento del equipo de soldadura por arco, incluyendo dicha disposición de control un medio (23) adaptado para determinar el valor de dicho al menos un parámetro de soldadura mientras que usa un modelo teórico (24) del proceso de soldadura y un miembro (25) adaptado para controlar el funcionamiento del equipo de soldadura y el proceso de soldadura asociado con el mismo usando dicho al menos un valor del parámetro de soldadura para ajustar el equipo de soldadura, **caracterizado** porque el medio (23) está adaptado para usar dicho modelo teórico (24) que comprende al menos dos partes diferentes (26, 27) de las cuales al menos una parte representa el arco o una parte del mismo, correspondiendo a diferentes partes del proceso de soldadura, estando representada cada parte del modelo por un componente del modelo (13), dichos componentes del modelo junto con una fuente de energía del modelo (14) se incluyen en un modelo de circuito eléctrico (12) y dicho medio (23) está adaptado para calcular al menos un valor del parámetro del modelo de circuito eléctrico relacionado con dicho al menos un parámetro de soldadura a partir del modelo de circuito eléctrico para dicho control mediante dicho miembro (25).

## ES 2 314 048 T3

20. Un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 19, en el que el medio (23) está adaptado para usar dicho modelo teórico (24) que tiene la parte de la región de interacción arco-cable (8) del proceso de soldadura representada por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo de circuito eléctrico (12).
- 5 21. Un dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 18-20 en el que el medio (23) está adaptado para usar dicho modelo teórico (24) que tiene la parte de la región de interacción arco-pieza de trabajo (10) del proceso de soldadura representada por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo de circuito eléctrico (12).
- 10 22. Un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 19, en el que el medio (23) está adaptado para usar dicho modelo teórico (24) que tiene la parte de la región de interacción arco-cable (18) del proceso de soldadura representada por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo del circuito eléctrico (12) y/o la parte de la región de interacción arco-pieza de trabajo (10) del proceso de soldadura representada por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo del circuito eléctrico (12).
- 15 23. Un dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 19-22 en el que el medio (23) está adaptado para usar en dicho modelo teórico (24) que tiene la parte de la región de arco (6) del proceso de soldadura representada por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo de circuito eléctrico (12).
- 20 24. Un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 23 en el que el medio (23) está adaptado para usar dicho modelo teórico (24) que tiene información obtenida mediante cálculos a partir de un modelo físico de la parte de la región de la columna del arco (9) del proceso de soldadura para usar en la determinación de dicho componente del modelo (13) que representa la parte de la región de arco (6).
- 25 25. Un dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 23-24, en el que el medio (23) está adaptado para usar dicho modelo teórico (24) que tiene información obtenida mediante el cálculo a partir de un modelo físico de la parte de la región e interacción arco-cable (8) del proceso de soldadura para usar para determinar dicho componente del modelo (13) que representa la parte de la región de arco (6).
- 30 26. Un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 20 o 25 en el que el medio (23) está adaptado para usar dicho modelo teórico (24) que tiene la parte de la región de interacción arco-cable (8) del proceso de soldadura dividida en una primera zona (64) más cerca del cable y una segunda zona (65) más cerca de la columna del arco para describir las propiedades de las zonas a través de diferentes submodelos físicos.
- 35 27. Un dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 23-25 en el que el medio (23) está adaptado para usar dicho modelo teórico (24) que tiene información obtenida mediante cálculos a partir de un modelo físico de la parte de la región de interacción arco-pieza de trabajo (10) del proceso de soldadura para usar para determinar dicho componente del modelo (13) que representa la parte de la región de arco (6).
- 40 28. Un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 21 o 27 en el que el medio (23) está adaptado para usar dicho modelo teórico (24) que tiene la parte de la región de interacción arco-pieza de trabajo (10) del proceso de soldadura dividido en una primera zona (66) más cerca de la pieza de trabajo y una segunda zona (67) más cerca de la columna del arco para describir las propiedades de las zonas a través de los diferentes submodelos físicos.
- 45 29. Un dispositivo con cualquiera de las reivindicaciones 23, 24, 25 o 27, en el que el medio (23) está adaptado para usar dicho componente del modelo determinado mediante dicho modelo físico que describe el arco por al menos una ecuación independiente de la extensión en el espacio del arco.
- 50 30. Un dispositivo de acuerdo con la reivindicación 29 en el que el medio (23) está adaptado para usar dicho componente determinado mediante dicho modelo físico que describe el arco mediante dicho al menos una ecuación que depende únicamente del tiempo.
- 55 31. Un dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 19-30, en el que el medio (23) está adaptado para usar dicho modelo teórico (24) que tiene la parte de la zona de columna del arco (29) del proceso de soldadura representada por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo de circuito eléctrico (12).
- 60 32. Un dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 19-31 en el que el medio (23) está adaptado para usar dicho modelo teórico (24) que tiene la parte de cable (5) del proceso de soldadura representada por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo del circuito eléctrico (12).
- 65 33. Un dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 19-32, en el que el medio (23) está adaptado para usar dicho modelo teórico (24) que tiene la parte de la pieza de trabajo (7) del proceso de soldadura representada por separado por uno de dichos componentes del modelo (13) en el modelo de circuito eléctrico (12).
34. Uso de un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-18 para predecir la formación de gota de metal en una operación de soldadura por arco para un conjunto dado de parámetros de soldadura.

## ES 2 314 048 T3

35. Uso de un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-18 para predecir el modo de transferencia de metal en una operación de soldadura por arco para un conjunto dado de parámetros de soldadura.

5 36. Uso de un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-18 para calcular al menos un valor del parámetro de soldadura requerido para obtener un modo de transferencia de metal particular en una operación de soldadura.

10 37. Uso de un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-18 para calcular al menos un valor de ajuste por defecto que se usa para ajustar un equipo automático de soldadura por arco antes de la soldadura.

38. Un producto de programa de ordenador que comprende un medio de código y/o partes de código de programa informático que permiten a un procesador realizar las etapas de cualquiera de las reivindicaciones 1-18.

15 39. Un producto de programa de ordenador de acuerdo con la reivindicación 38 que hace funcionar un dispositivo de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 19-33.

40. Un producto de programa de ordenador de acuerdo con la reivindicación 38 o 39 proporcionado al menos parcialmente a través de una red tal como Internet.

20 41. Un medio legible por ordenador que contiene un producto de programa de ordenador de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 37-39.

25

30

35

40

45

50

55

60

65

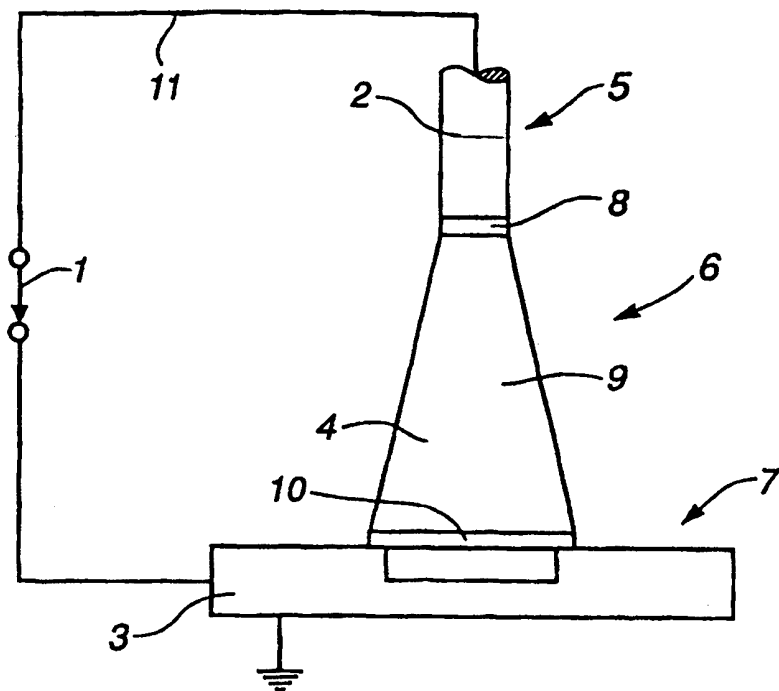


Fig. 1

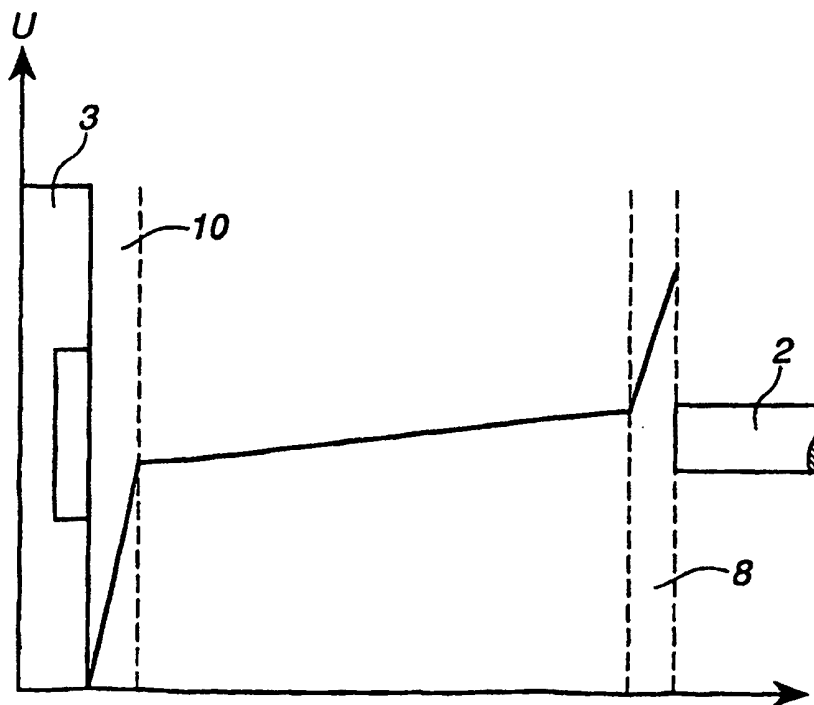


Fig. 2

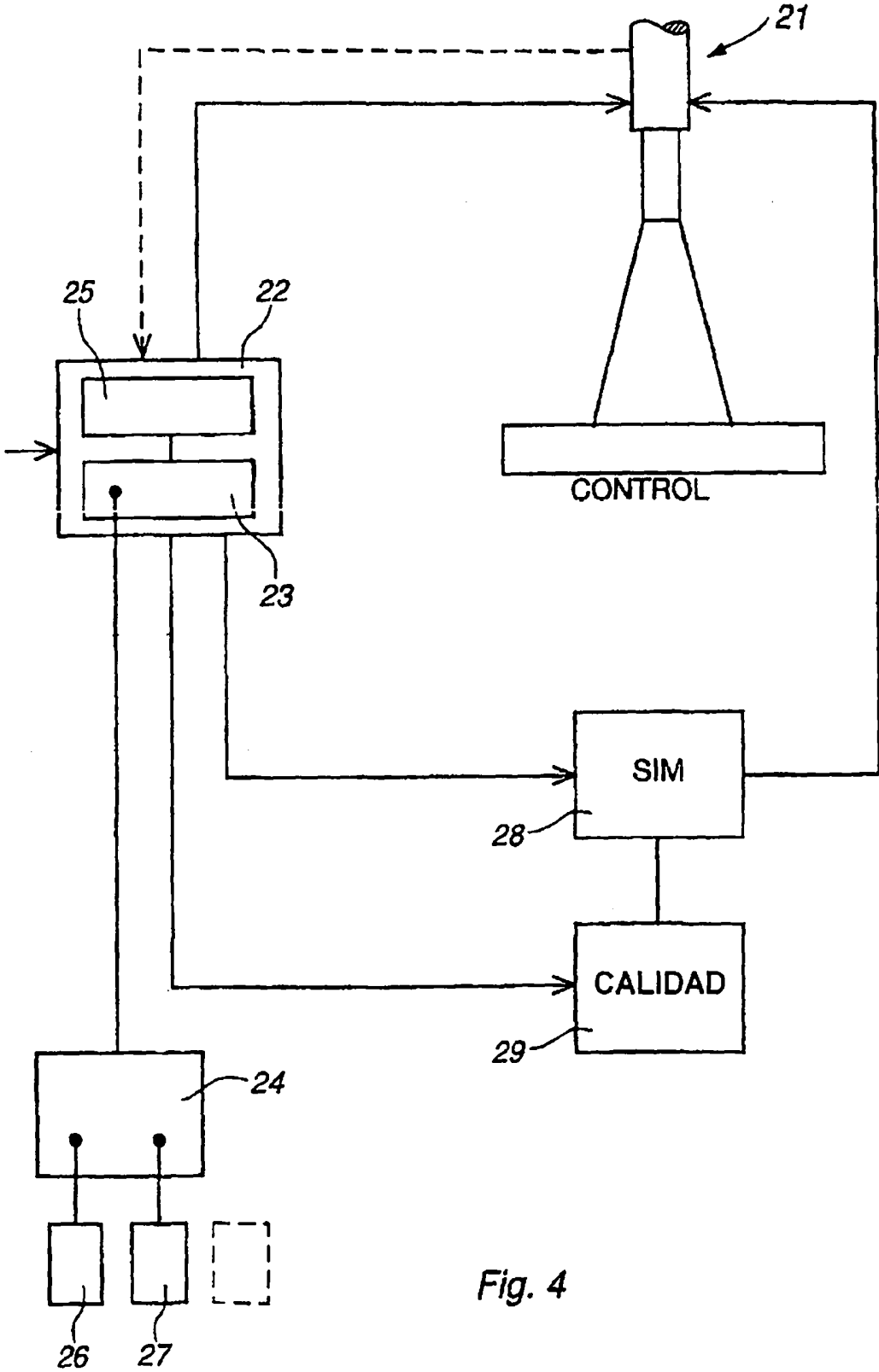


Fig. 4

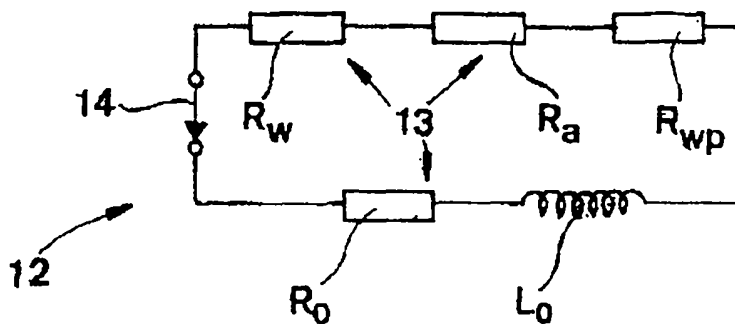


Fig 3

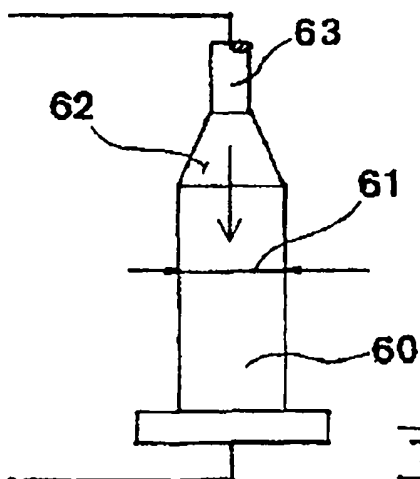
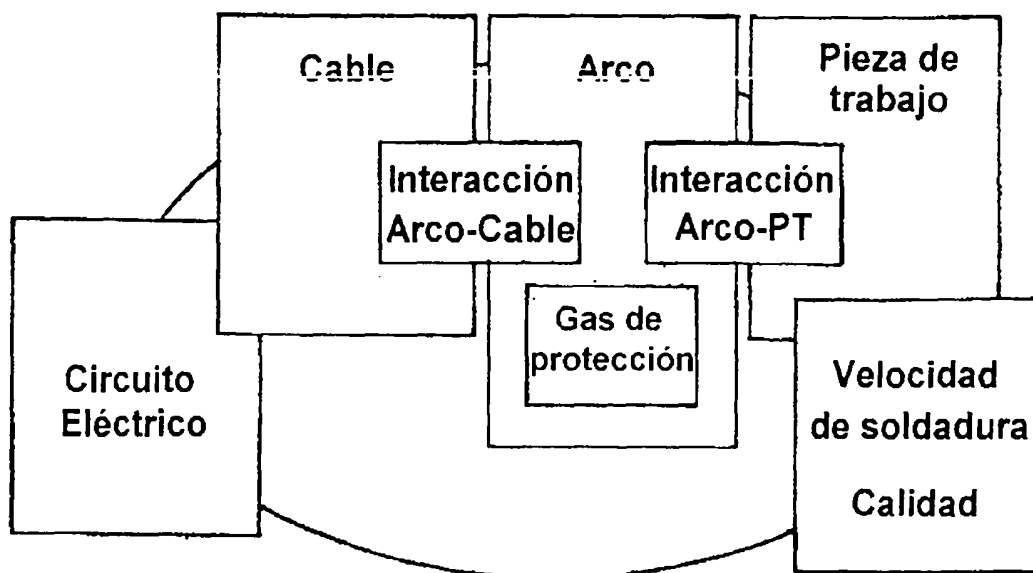


Fig 8

Fig 9

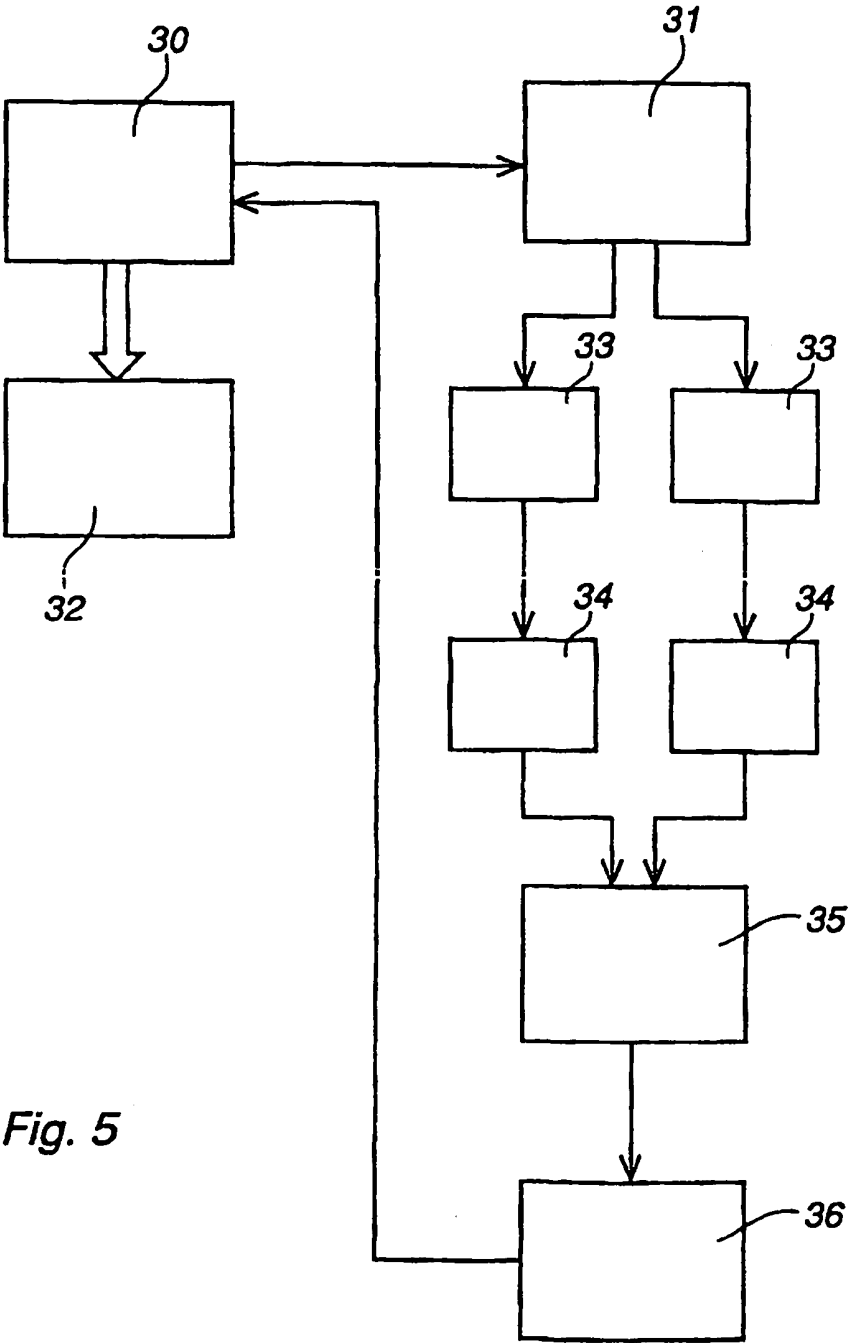


Fig. 5

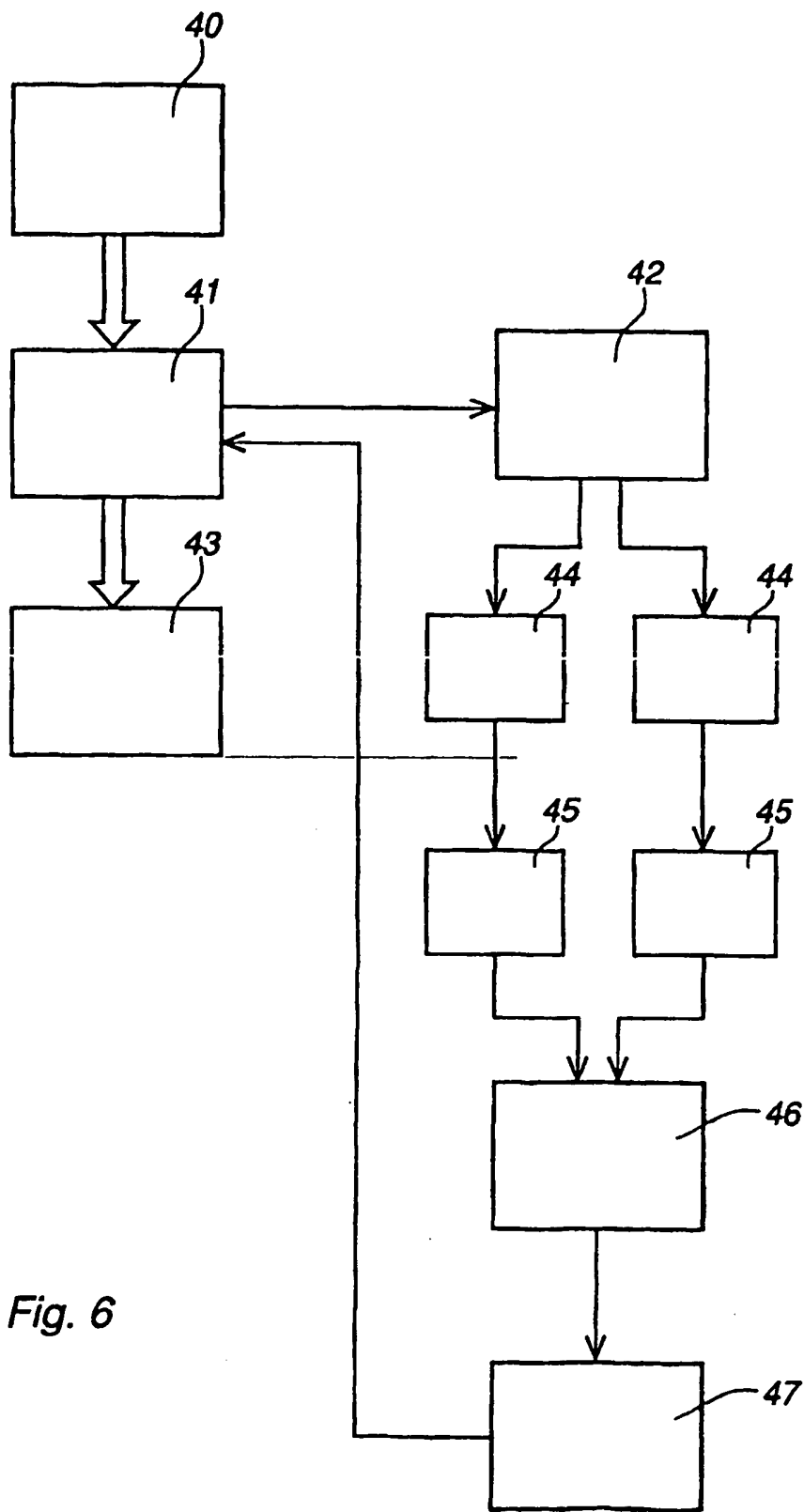


Fig. 6

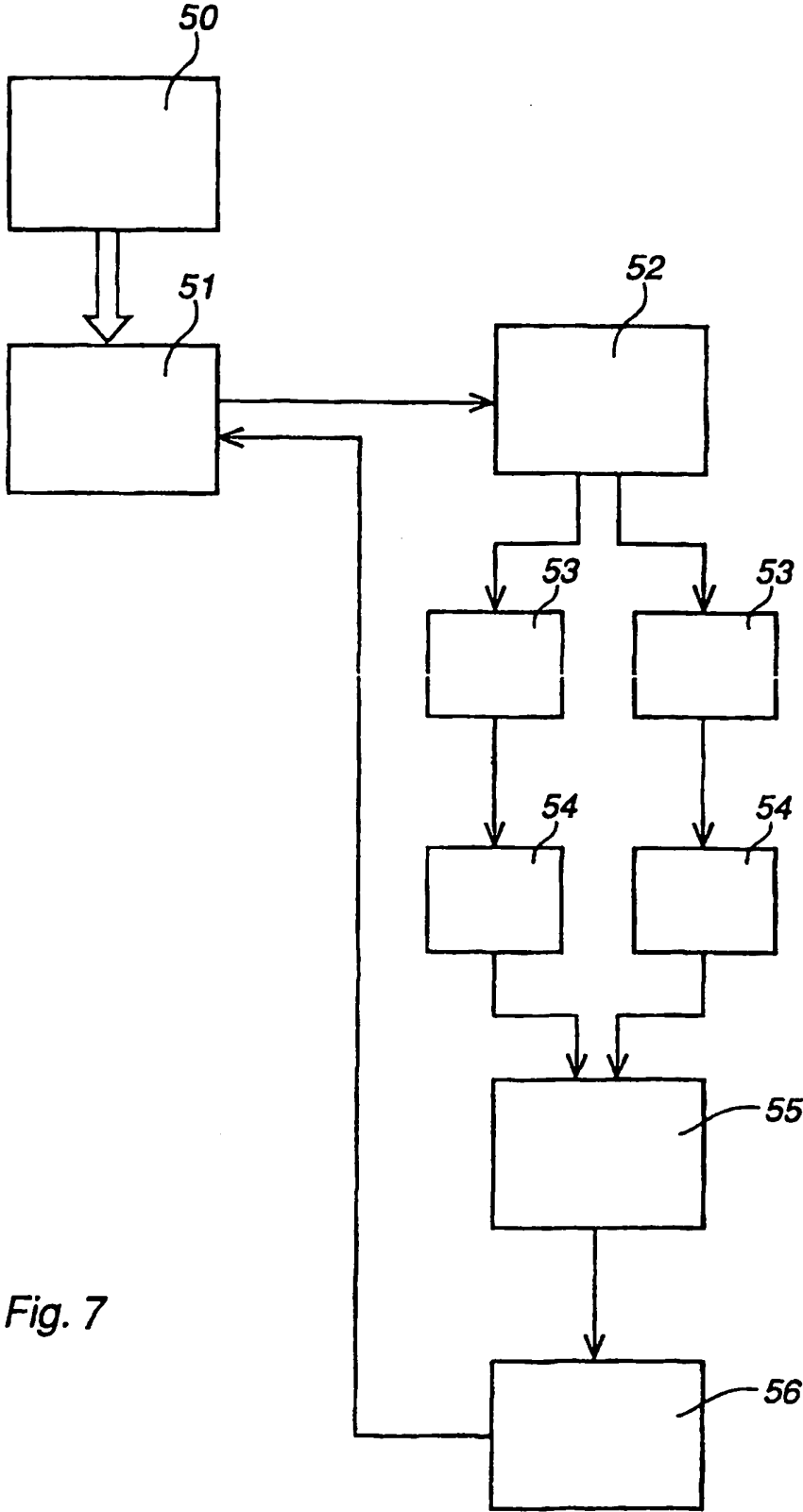


Fig. 7

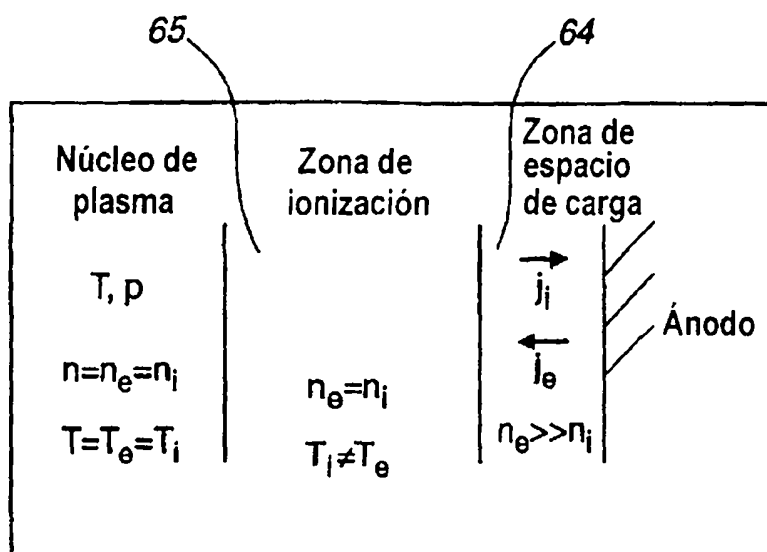


Fig. 10

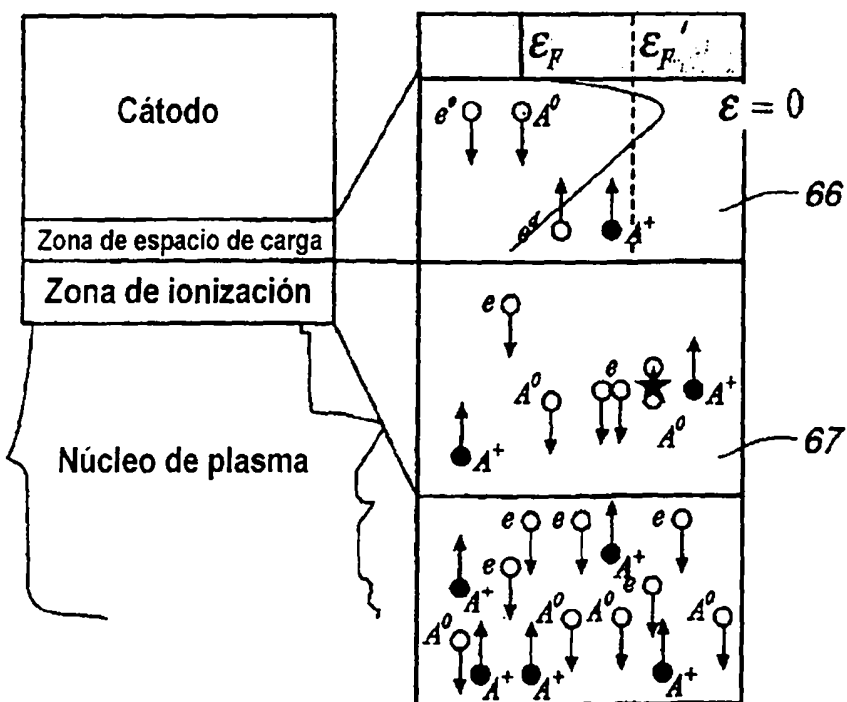


Fig. 11

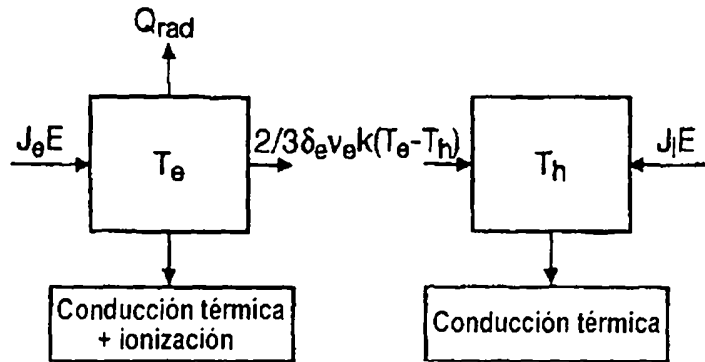
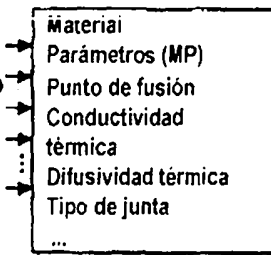


Fig. 12

Parámetros de Soldadura Indirecta (IWP)

- Corriente
- Tensión
- Velocidad de desplazamiento
- Velocidad de suministro electrodo
- Extensión de electrodo
- Ángulo de desplazamiento
- Tamaño de punto enfocado
- Profundidad de enfoque
- Duración del arco
- Velocidad de repetición arco
- Potencia del rayo
- ...



Parámetros de Soldadura Directa (DWP)

- Geometría:
  - Anchura de perla
  - Penetración
  - ...
- Propiedades mecánicas:
  - Ductilidad
  - Resistencia
  - ...
- Microestructura:
  - Tamaño de grano
  - Fase
- Discontinuidades:
  - Porosidad
  - Fusión incompleta
  - ...

Fig. 13

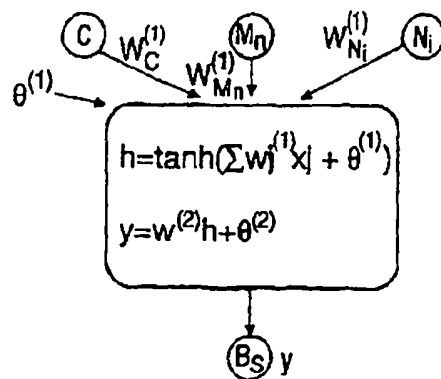


Fig. 15

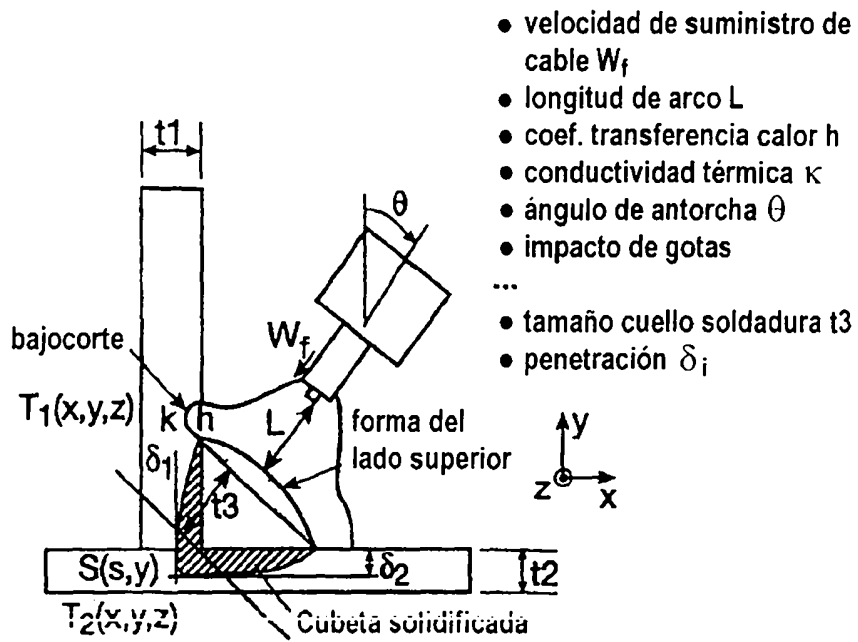


Fig. 14

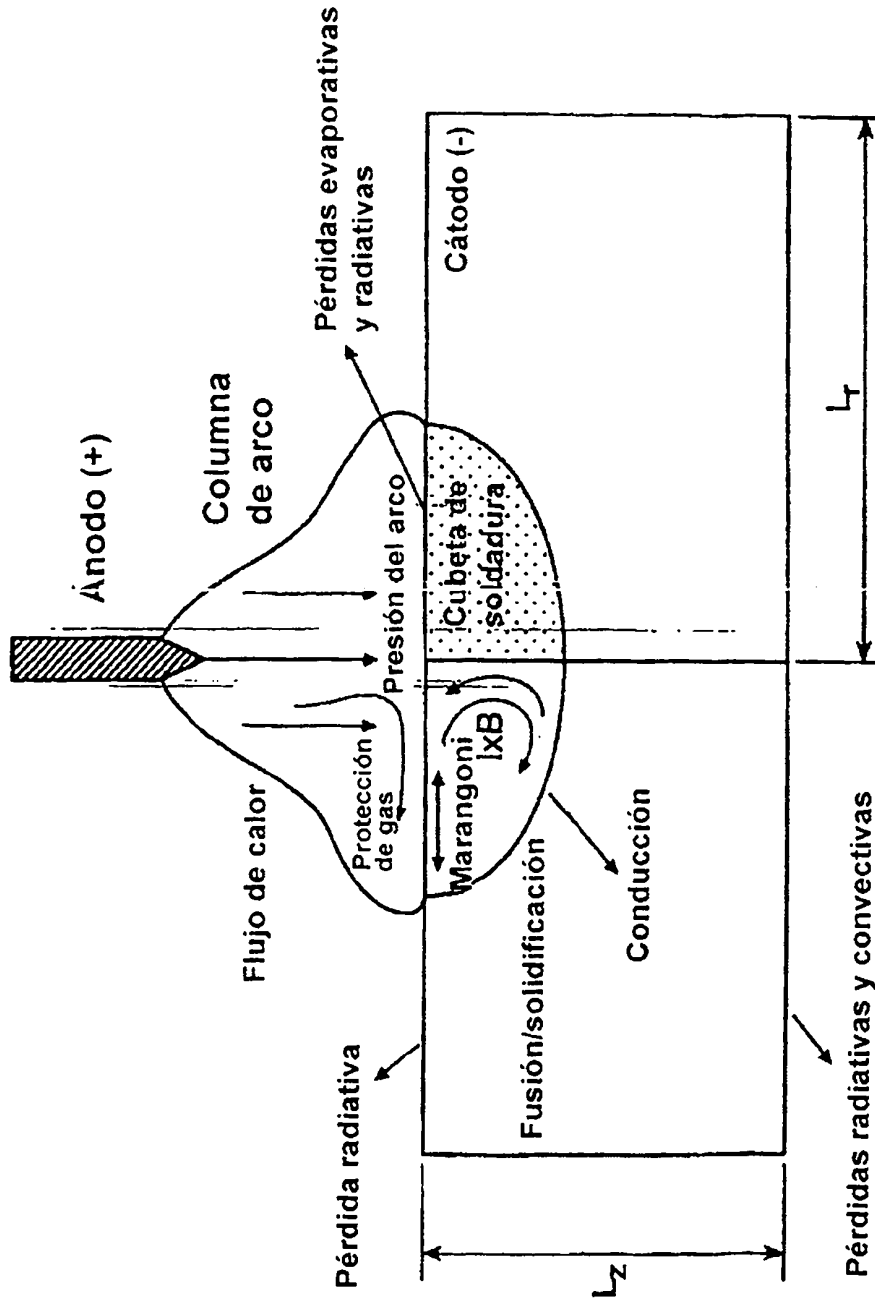


Fig. 16

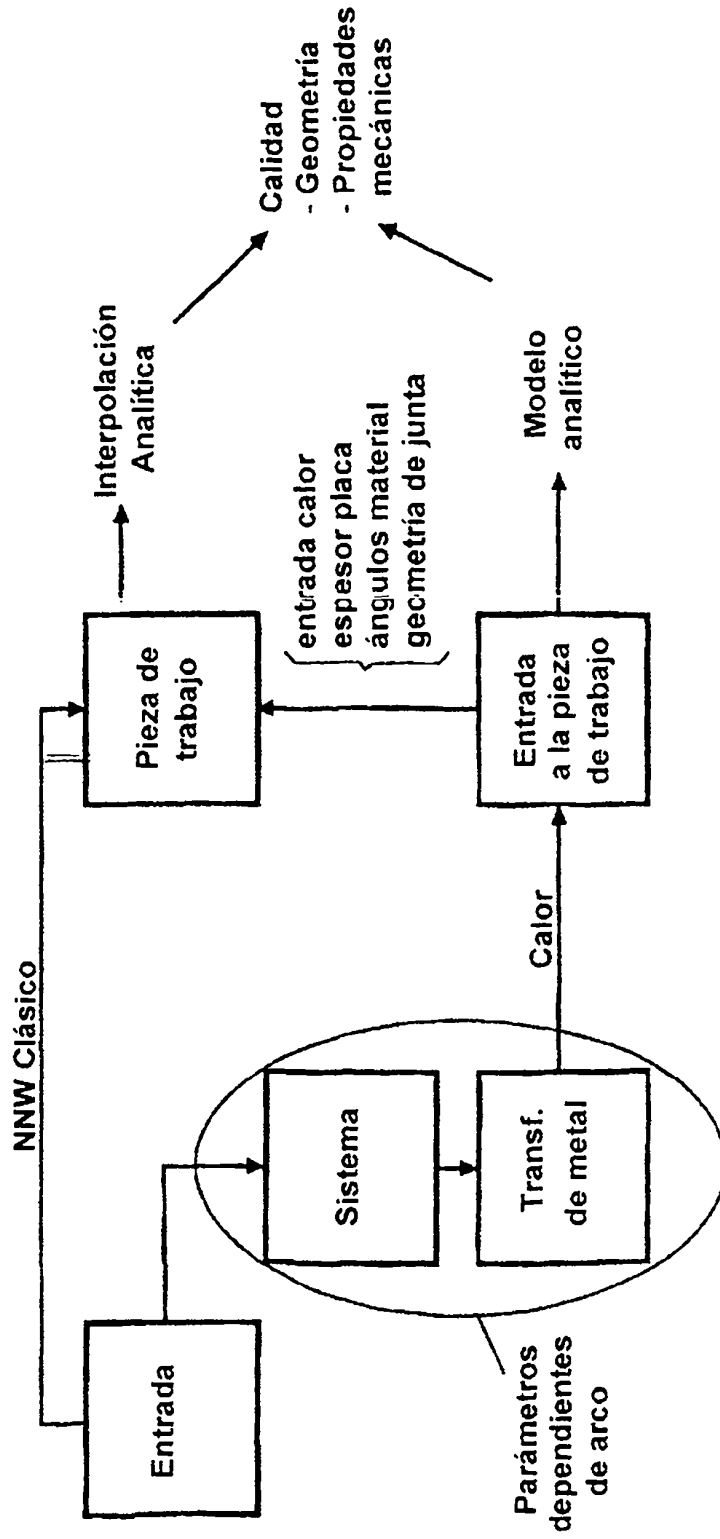


Fig. 17